



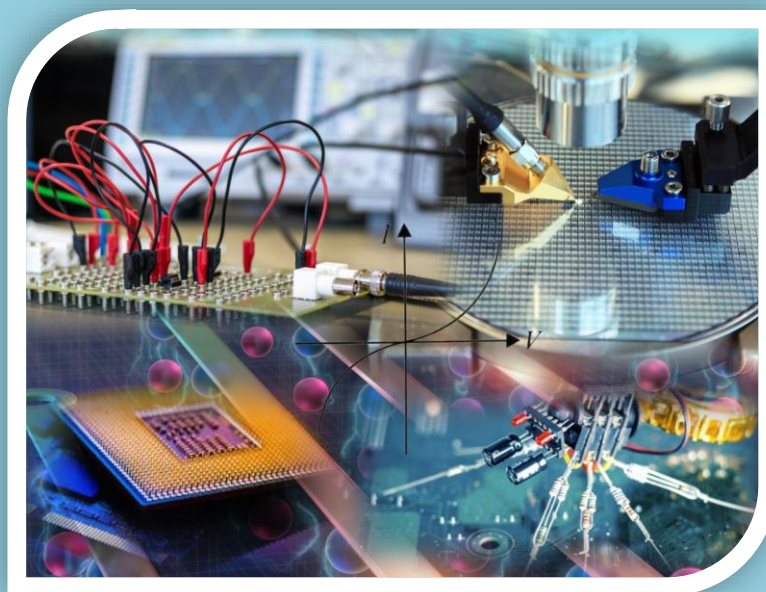
**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ТАЪЛИМ, ФАН ВА ИННОВАЦИЯЛАР ВАЗИРЛИГИ**

**МИРЗО УЛУҒБЕК НОМИДАГИ
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ХУЗУРИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

**ЎЗБЕКИСТОН ФИЗИК-ТАЛАБАЛАРИ ВА
ЁШ ОЛИМЛАР АССОЦИАЦИЯСИ**

**ЁШ ОЛИМЛАР ВА ФИЗИК
ТАЛАБАЛАРНИНГ VI РЕСПУБЛИКА
ИЛМИЙ АНЖУМАНИ (ЁОФТРИА-VI)
МАТЕРИАЛЛАРИ**



Тошкент-2026



**ЎЗБЕКИСТОН РЕСПУБЛИКАСИ
ОЛИЙ ТАЪЛИМ, ФАН ВА ИННОВАЦИЯЛАР
ВАЗИРЛИГИ**

**МИРЗО УЛУҒБЕК НОМИДАГИ
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ**

**ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ИЛМИЙ-ТАДҚИҚОТ ИНСТИТУТИ**

**ЎЗБЕКИСТОН ФИЗИК-ТАЛАБАЛАРИ ВА ЁШ ОЛИМЛАР
АССОЦИАЦИЯСИ**

**ЁШ ОЛИМЛАР ВА ФИЗИК ТАЛАБАЛАРНИНГ
VI РЕСПУБЛИКА ИЛМИЙ АНЖУМАНИ
(ЁОФТРИА-VI)**

МАТЕРИАЛЛАРИ

2026 йил, 13 март



Ёш олимлар ва физик талабаларнинг VI Республика илмий анжумани
(ЁОФТРИА-VI) материаллари тўпламини тайёрлаш учун масъуллар

ДАСТУРИЙ ҚЎМИТА Раис: И.У. Маджидов - ЎзМУ ректори Раис ўринбосари: Ш.Б. Утамурадова - ЯФМ ИТИ директори Масъул котиблар: А.Ш. Мавлянов Х.Ж. Матчонов Дастурий қўмиата аъзолари: Р.А. Муминов, академик - ЎЗР ФА С.З. Зайнабидинов, академик - ЎЗР ФА А.Т. Мамадалимов, академик - ЎЗР ФА Ё.С. Эргашев - ЎзМУ А.З. Рахматов - АЖ “ФОТОН” К.А. Исмаилов - ҚҚДУ Н.Ф. Зикриллаев - ТДТУ К.Э. Онарқулов - ФарДУ Р.Я. Расулов - ФарДУ Э.Х. Бозоров - ЎЗР ФА ЯФИ С.М. Отажонов - ФарДУ К.С. Аюпов - ТДТУ З.Т. Азаматов - ЯФМ ИТИ Н.А. Тургунов - ИИВ Академияси О.Х. Қўлдашов - ЯФМ ИТИ С.А. Музафарова - ЯФМ ИТИ Ж.Ж. Ҳамдамов - ЯФМ ИТИ О.Ф. Тукфатуллин - ЯФМ ИТИ Я.А. Сайдимов - ЯФМ ИТИ А. Утениязова - ЯФМ ИТИ Тўплам Ўзбекистон Республикаси Олий таълим, фан ва инновациялар вазирлигининг 2026-йил 16-январдаги 11-сон буйруғи 2-илова 54-бандига асосан нашрга тайёрланди.	ТАШКИЛИЙ ҚЎМИТА Раис: Х.С. Далиев («МЭИ» МТУ филиали) Раис ўринбосарлари: И.Х. Хамиджонов Д.А. Раҳманов Масъул котиблар: Қ.М. Файзуллаев, М.Б. Бекмуратов Ташкилий қўмиата аъзолари: Н. Хакимова - ЯФМ ИТИ Р. Закиров - ЯФМ ИТИ Ш. Норкулов - ЯФМ ИТИ Б. Сайдуллоев - ЯФМ ИТИ З. Бахронкулов - ЯФМ ИТИ С. Абдураимов - ЯФМ ИТИ К. Джумамуратов - ЯФМ ИТИ Ф. Йўлдошев - ЯФМ ИТИ А. Бахромов - ЯФМ ИТИ С. Даминов - ЯФМ ИТИ Б. Бокиев - ЯФМ ИТИ Н. Хайтимметов - ЯФМ ИТИ Ё. Мардиев - ЯФМ ИТИ Н. Ахмедова - ЯФМ ИТИ М. Рахмонова - ЯФМ ИТИ Б. Алиқулов - ЯФМ ИТИ Г. Турсынбаева - ЯФМ ИТИ О. Иноятов - ЯФМ ИТИ Г. Нурматова - ЯФМ ИТИ Матнларда фойдаланилган маълумотлар, илмий натижалар ва хулосалар аниқлиги учун муаллифлар жавобгар. © ЯФМ ИТИ, 2026
---	--



МУНДАРИЖА

I ШЎЪБА. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР МАТЕРИАЛШУНОСЛИГИ МУАММОЛАРИ	
С. Зайнабидинов, К. Мусаев. <i>Взаимодействие примесных атомов Ni в Si с дислокациями и дислокационными скоплениями.</i>	8
Х.С. Далиев, И.Х. Хамиджонов, Е.А. Каримбаев. <i>Иттрий киришма атомларининг кремнийдаги диффузия коэффициенти аниқлаш.</i>	12
A.S. Saidov, Sh.N. Usmonov, H.Sh. Abdullayev, O.Z. Turg'unov, T.X. Jalilov. <i>n-GaP binar birikmasida tok o'tish mexanizmlarining haroratga bog'liqligi.</i>	14
Sh.B. Utamuradova, J.J. Hamdamov, H.J. Matchonov, F.J. Matchanova, F.R. Yo'ldoshov, G. Nurmatova, E.A. Erkayeva. <i>Marganets bilan legirlangan kremniyda fazaviy va strukturaviy o'zgarishlar.</i>	17
Z.T. Azamatov, A.B. Baxromov, A.A. Sapaeva, M.Sh. Suyunova <i>LiNbO₃ yupqa plyonkalarining kristallik darajasiga termik ishlov berish jarayonlarining ta'siri.</i>	20
Ш.Б. Утамурадова, К.М. Файзуллаев, А.В. Станчик. <i>Влияние типа подложки на морфологию тонких плёнок CNTSSe/ZnO/ZnO:Al.</i>	22
Х.С. Далиев, З.Э. Бахронкулов, М.И. Бозорбаева. <i>Изменение типа контакта Шоттки в литецком легированном кремнии.</i>	25
Н.А. Тургунов, Р.М. Турманова, Н.Б. Хайтимметов. <i>Формирование примесных скоплений в образцах n-Si<Ni>.</i>	27
S.A. Muzafarova, N.A. Axmedova, O.Sh. Norqulov. <i>Zn_xCd_{1-x}S/ITO birikmasining tasnifi.</i>	29
Ш.Б. Утамурадова, Ж.Ж. Хамдамов, Г.С. Турсынбаева. <i>Влияние связанных состояний атомов кислорода на образование дефектов в кремнии, легированном переходными элементами.</i>	31
Н.А. Тургунов, Н.Б. Хайтимметов. <i>Формирование примесных скоплений Ni и Fe в Si.</i>	33
Sh.B. Utamuradova, Sh.Kh. Daliev, Sh.A. Ismoilov, Sh. Abdullayeva. <i>Sirkoniy bilan legirlangan kremniydagi tuzilmaviy o'zgarishlar.</i>	35
Sh.B. Utamuradova, J.J. Hamdamov, Y.Z. Mardiyev, M.O. Rahmonova, O.H. Ollayarova. <i>Kremniy monokristalini termik oksidlashning IQ-spektroskopiyasi tahlili.</i>	37
S.A. Muzafarova, N.A. Axmedova, O.Sh. Norqulov. <i>Gaz tashish uslubi asosida teksturali kremniyning sirtiga yupqa qatlam CdTe birikmasini o'stirish.</i>	39
Sh.X. Daliev, J.J. Khamdamov, Y.Z. Mardiyev. <i>Volfram bilan legirlangan p-tipli monokristall kremniyning strukturaviy, element va elektr xossalari tahlili.</i>	41
Ш.Б. Утамурадова, А.Б. Утениязова, М.М. Мухаммадиева, М.Х. Файзуллаева. <i>Исследование электрофизических свойств структур кремний - тантал методом эффекта Холла.</i>	44
Sh.B. Utamuradova, Sh.X. Daliev, J.J. Hamdamov, Y.Z. Mardiyev, M. Qambarova. <i>Volfram bilan legirlangan p-Si monokristall kremniyni EDX tahlili.</i>	46



Sh.B. Utamuradova, J.J. Hamdamov, A.M. Qo'shimmetov, S.B. Erkinova. <i>Lantan atomlarining monokristall kremniyga diffuziyasining raman spektrmetri tahlili.</i>	48
Sh.B. Utamuradova, Sh.X. Daliyev, J.A. Ergashev, M.R. Ro'ziyeva. <i>Titan bilan legirlangan kremniyning raman spektroskopik tadqiqi.</i>	51
Ж.Т. Абдурахимов, И.Р. Бекпулатов, Б.Д. Игамов, А.И. Камардин. <i>Термическая эволюция структуры и оптических свойств тонких пленок ZrO_2 при высокотемпературной обработке в вакууме и кислородной среде.</i>	53
Sh.B. Utamuradova, B.R. Bokiyeu, O.X. Qo'ldashev. <i>Izivalent kirishmalari bilan legirlangan kremniyning elektrofizik va energetik xususiyatlari.</i>	56
M.A. Alinazarova, H.A. Mamajonova. <i>Quyosh elementi fotoelektrik quvvatiga yorug'lik intensivligining ta'siri.</i>	58
С. Абдураимов. <i>Раман-спектроскопия монокристаллического кремния р-типа после диффузии серебра.</i>	61
R.R. Burkhonov, G.Sh. Ochilova. <i>Oxygen precipitation distribution in silicon during high-temperature thermal annealing.</i>	64
II ШЎБА. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ВА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА МУАММОЛАРИ	
X.S. Daliyev, F.F. To'yboyev, B.O. Abduraximova. <i>Yarimo'tkazgichlar fizikasida chuqur sathlar parametrlarini aniqlashda Arrenius grafigining o'rni.</i>	67
O.Kh. Kuldashov, D.O. Nabiev. <i>Optoelectronic device for monitoring dust on photoelectric module surfaces.</i>	69
A.S. Saidov, Sh.N. Usmonov, O.Z. Turg'unov. <i>$n(Si_2)_{1-x}(GaP)_x$ epitaksial qatlamlari elektr o'tkazuvchanligining aktivlanish energiyasi.</i>	71
S.Q. Qarshiyev. <i>Issiqxonalar uchun yorug'lik diodli fitonurlantirgich.</i>	72
A.R. Khudaybergenov. <i>Modeling the characteristics of a field-effect transistor with a quantum dot array chanel.</i>	74
O. Inoyatov. <i>G'ovakli kremniyning litiy-ion batareyalarning anod materiali sifatida qo'llanishi istiqbollari.</i>	77
III ШЎБА. ФОТОНИКА МУАММОЛАРИ	
Sh.X. Daliev, F.A. Saparov. <i>Quyosh elementlari uchun kremniy asosidagi oksid geterotuzilmalarining elektr xususiyatlarini taqqoslash.</i>	79
Q.A. Ismaylov, Z.T. Kenjayev, J.O. Jalg'asov. <i>Kremniy asosli quyosh elementlarining elektrofizik xossalriga kirishma atomlar klasterlarining ta'siri.</i>	80
A.A. Сапаева, З.Т. Азаматов, А.Б. Бахромов. <i>Угловое мультиплексирование брэгговских решеток в пленках As_2Se_3 для адаптивных фотонных устройств управления излучением.</i>	82
Q.A. Ismaylov, Z.T. Kenjayev, X.X. Bauetdinova. <i>Quyosh elementlari samaradorligini oshirishning yangi usullari: strukturaviy optimallashtirish yondashuvi.</i>	84
N.O. Abdulxafizova, O.O. Ochilov. <i>Application of mach-zehnder interferometer in magneto-optics.</i>	86



Y.A. Buriyev, Sh.R. Kamalov. <i>Investigation of nonlinear optical properties Ag₂S quantum dots thin film.</i>	88
N. Normatova, Sh. Ismoilov, O. Jabbarov. <i>Experimental and matlab-based comparison of temperature effects on optical fiber signal loss.</i>	89
Y.A. Buriyev, Sh. R. Kamalov. <i>Study of nonlinear optical properties Ag₂Se quantum dots thin film.</i>	92
N. Soliyeva. <i>Litiy niobat kristallarida pyezoelektrik effektning akustooptik xossalari ta'siri.</i>	93
B.A. Abduraxmanov, D.D. Matyakubov. <i>Turli to'liq uzunlikdagi nanosekundli impulsli lazer nurlanishi asosida polikristall kremniy shikastlanish xususiyatlari tadqiqi.</i>	95
I.Sh. Toshpulatov, V.N. Avdiyevich. <i>Temperature dependence of velocity of acoustic waves in silicon crystal.</i>	98
IV ШЎБА. МУҚОБИЛ ЭНЕРГИЯ МАНБАЛАРИ	
К.А. Исмаилов, Ж.У. Жамалова, С.Т. Таджибаева, Ж.А. Аюезжанова. <i>Факторы влияющие на эффективность солнечных элементов.</i>	102
О.Ф. Тукфатуллин, К.А. Джумамуратов, В.Г. Дыскин, Д.А. Фаткуллаев. <i>Обоснование выбора датчика давления для водяного контура автономной комбинированной фототеплопреобразовательной установки.</i>	103
В.Г. Дыскин, И.А. Юлдашев, Ю.М. Курбанов, И.А. Хамдамова. <i>Оптическая деградация инкапсулянта эва в солнечных модулях после 14 лет эксплуатации.</i>	105
О.Ф. Тукфатуллин, Б.Н. Бутунбаев. <i>Разработка модели прогнозирования производительности ФЭМ в зависимости от загрязняющих факторов.</i>	109
S.X. Sulaymonov, R.R. O'rinboyev. <i>Rux oksidini qaytarilishi jarayoni mujassamlangan quyosh nuri ta'sirida kechish.</i>	112
K.M. Kuchkarov, B.A. Ergashev, A. Nasirov, M.P. Pirimmatov, A.S. Matmurodov, X.Z. To'liboyeva. <i>SbxSey yurqa qatlamlaridagi xususiy nuqtaviy nuqsonlar.</i>	115
K.R. Yakubov, O.O. Qurbanov, R.Sh. Rahimboyev. <i>Biomassani oldindan ishlov berish texnologiyalari orqali qishloq xo'jaligi chiqindilaridan biogaz ishlab chiqarish samaradorligini oshirish.</i>	118
В.Г. Дыскин, И.А. Юлдошев, О.Ш. Жураев, Б.М. Ботиров. <i>Методика оценки рентабельности фотоэлектрических станций по показателю удельной выработки электроэнергии в климатических условиях Узбекистана.</i>	121
O.O. Bozarov, J.N. Usmonov, N.A. Kozimjonov. <i>Mikro GES turbina aktiv ishchi g'ildiragining optimal geometrik parametrlarini aniqlash.</i>	124
С.А. Даминов, О.Ф. Тукфатуллин, Д.С. Пулатова, Э.Д. Мухамедиев. <i>Защитный корпус вращательного механизма солнечного трекера.</i>	127
K. Yakubov, R. Rakhimbaev, R. Bazarbayev, D. Kurbanov, K. Ollashukur. <i>Biogas production potential from organic waste in the aral sea region: The case of Khorezm region and the Republic of Karakalpakstan.</i>	130
S. Saydullayeva. <i>Quvurlardagi ortiqcha evaziga ishlaydigan elliptik mikrogidroturbinani maqbullashtirish.</i>	132



O.O. Bozarov, J.N. Usmonov, N.A. Kozimjonov. <i>Oqar suv manbalarida ishlovchi 5 kW li mikro-GES ishchi g'ildiragining geometrik parametrlari va energetik ko'rsatkichlari o'rtasidagi analitik bog'lanishlarni tadqiq etish.</i>	134
K.R. Yakubov, D.Sh. Kurbanov, D.R. Aminov, S.Zh. Karazhanov, Guanggen Zeng. <i>Si-CdTe tandem quyosh elementiga SnS₂ qatlamini joylashtirish orqali samaradorlikni modellashtirish.</i>	137
N.O. Axmedjonov. <i>O'zbekiston sharoitida quyosh energiyasidan foydalanishning salohiyati va uni rivojlantirish istiqbollari.</i>	138
O'K. Sunnatova, M.M. Raxmatova, <i>Qazib olish sanoatida muqobil energiya tizimlari: ilmiy tahlili.</i>	141
V ШЎБА. ҚАТТИҚ ЖИСМЛАРНИНГ РАДИАЦИОН ФИЗИКАСИ	
A.T. Mamadalimov, N.K. Hakimova, Sh.M. Norbekov, S.U. Umarova. <i>Radioaktiv ishlov berilgan tabiiy tolalarning optik xossalarini tadqiq qilish.</i>	143
Ш.Б. Утамурадова, Д.А. Рахманов. <i>Влияние альфа-частиц на электрофизические свойства кремния, легированного атомами палладия.</i>	145
Ш.Б. Утамурадова, О.К. Атабоев. <i>Влияние электронного облучения на фотоэлектрические характеристики кремниевых гетероструктурных солнечных элементов, легированных галлием, для космического применения.</i>	148
Sh.B. Utamuradova, A.B. Uteniyazova, M.M. Muxammadiyeva, M.H. Fayzullayeva. <i>XRD patterns of the Ta-Si system at proton irradiation.</i>	152
Я.А. Сайдимов, Ф.Б. Умаров. <i>Материалиунослик ва нанотехнологияларда ЭГ-2 электростатик тезлаткичидан фойдаланишнинг перспектив имкониятлари.</i>	154
Г.Й. Ахматова, Ф.А. Искандарова, Р.Р. Иброхимов, Б.Л. Оксенгендлер, С.Х. Сулейманов, Н.Н. Тураева. <i>Общие эффекты радиационного синергизма в неживой и живой природе.</i>	156
G'N. Mavlonov, J.M. Nazirov. <i>Yevropiy kirishma atomlari bilan legirlangan kremniyning diffuziya chuqurligi tadqiqoti.</i>	159
Ж.Т. Азимов, Н.Н. Тураева, Б.Л. Оксенгендлер. <i>К проблеме особенностей радиационной деградации систем с высокой энтропией.</i>	162
VI ШЎБА. КОНДЕНСАЦИЯЛАНГАН МУҲИТЛАР ФИЗИКАСИ	
A.T. Mamadalimov, N.K. Hakimova, D.E. Hazratov, M.S. Ismatova, D.A. Azimova, N.A. Qushboqov. <i>G'ovakli kremniy morfologiyasini boshqarishning elektrokimyoviy usullari.</i>	165
J.J. Hamdamov, B.Sh. Aliqulov, M.U. Erkinov. <i>Erbii bilan legirlangan kremniyning raman spektroskopik xususiyatlarini tadqiq qilish.</i>	165
A.T. Mamadalimov, N.K. Hakimova, D.E. Hazratov, M.S. Ismatova, N.A. Qushboqov, D.A. Azimova. <i>Kimyoviy modifikatsiya qilingan biomaterialning volt-amper xarakteristikasi va fotoo'tkazuvchanlik kinetikasini tadqiq qilish.</i>	168



N. Matyakubov, M. Karimov, J. Madrakhimova, D. Isayev. <i>Design and optimization of a cylindrical dbd plasma reactor for plasma-assisted preparation of Ag/TiO₂ photocatalyst for wastewater treatment.</i>	171
M.S. Paizullakhanov, E.Z. Nodirmatov, F.N. Ernazarov, M.M. Sulaymanov. <i>The cobaltite of barium and strontium, synthesized in a solar furnace.</i>	172
H.Sh. Atanazarova, N.A. Xudayshukurova, Sh.F. Bardiboyeva, D.S. Sapayev, A.S. Ashirov. <i>SiO₂ (001) sirtidan past energiyali Ne⁺ va Ar⁺ ionlarining sochilishida energiya spektrining shakllanish mexanizmlari.</i>	175
K.R. Yakubov, D. Sh. Kurbanov, N.M. Nazarova, XIA HAO. <i>CsPbCl₃ dan CsMnCl₃ ga o'tishda elementlarni almashtirish orqali taqiqlangan zona energiyasini o'zgarishini o'rganish.</i>	177
Sh.B. Utamuradova, X.S. Daliyev, J.J. Hamdamov, A.G'. Mardonqulova, M.N. Marseva. <i>Si<Er> va Si<Eu> materiallarida fazaviy o'zgarishlar va nuqsonli struktura.</i>	179
С.Б. Донаев, Г.М. Ширинов, Р.С. Мирзаева. <i>Исследование параметров энергетической структуры нанопленок GaInP/GaP.</i>	182
I.A. Muminov, A.M. Axmadjonov, A.B. Qurbonov, G.R. Madaminova. <i>Qauntum transport and particle statistics.</i>	184
G.O. Abdurazzoqova. <i>Oltingugurt va rux bilan ketma-ket legirlangan monokristall kremniyning elektrofizik xossalari va Si-ZnS klasterlarining hosil bo'lish mexanizmi.</i>	187
A.Y. Boboyev, U.R. Karimberdiyev, M.M. Arabboyeva, G.I. Numonjonova. <i>Si substratlarda Ge oraliq qatlami asosida (Ge₂)_{1-x-y}(GaAs_{1-δ}Biδ)_x(ZnSe)_y qattiq eritmalarini suyuq fazali epitaksiya usulida o'stirish texnologiyasi.</i>	189
U.Q. Omonova, F.R. Muxamadiyeva, D.B. Ahmadjonova, A.A. Mashrabboyev. <i>Condensation of exciton-polariton.</i>	191
A.Y. Boboyev, U.R. Karimberdiyev, F.A. Abdulkhayev, M.M. Arabboyeva. <i>(Ge₂)_{1-x-y}(GaAs_{1-δ}Biδ)_x(ZnSe)_y epitaksial qatlamlarining strukturaviy va elektrofizik xususiyatlari.</i>	194
G.U. To'xtarova, A.R. Maxmudov, Sh.E. Xomidjonov, O.Yu. Nazirova. <i>Bose-Einstein condensation of ideal gas.</i>	196

**I ШЎБА. ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР ФИЗИКАСИ ВА
ЯРИМЎТКАЗГИЧЛАР МАТЕРИАЛШУНОСЛИГИ МУАММОЛАРИ**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ Ni В Si С ДИСЛОКАЦИЯМИ
И ДИСЛОКАЦИОННЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ**

С. Зайнабидинов, К. Мусаев

*Андижанский государственный университет, г. Андижан, ул. Университетская
129, Республика Узбекистан
quyoshcha2@gmail.com*

В работе исследуется взаимодействие примесных атомов никеля (Ni) в монокристаллическом кремнии (Si) с дислокационными скоплениями, формируемыми источниками Франка–Рида. На основе анализа экспериментальных данных по низкотемпературной термообработке легированных образцов показано, что в присутствии внутренних напряжений возможно инициирование генерации концентрических дислокационных петель даже в исходно бездислокационном кремнии. Предложена интерпретация наблюдаемых кольцевых примесных образований как результата осаждения междоузельных атомов никеля и их кластеров на дислокационных петлях, возникающих при работе источника Франка–Рида. Рассмотрена математическая модель динамики дислокационного сегмента с учетом упругого взаимодействия, вязкого торможения и критического напряжения активации. Показано, что формирование дислокационных скоплений сопровождается перераспределением внутренних напряжений, что ограничивает дальнейшую генерацию петель. Полученные результаты позволяют уточнить механизмы образования примесно-дислокационных структур и их влияние на структурные и электрофизические свойства кремния, а также открывают возможности целенаправленного управления дефектной структурой полупроводниковых материалов.

1. Введение

В настоящее время изучение различных наноразмерных структур и образований в кристаллической решетке Si является очень актуальной темой.

Поведение различных примесей, таких как Ni, Mn, Cu и др. достаточно хорошо изучены [1, 2, 3, 4]. Достаточно подробно изучено их влияние на электрофизические свойства исходного материала.

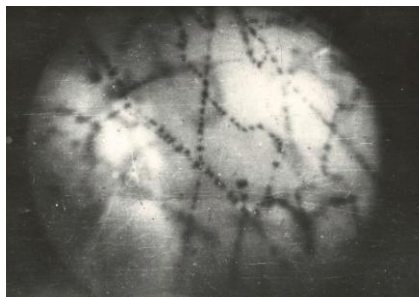
Особый интерес представляет Ni поскольку основная часть введенных атомов этой примеси находятся в электронейтральном состоянии в виде различных кластеров и дефектных комплексов. Эти кластеры и примесные образования оказывают значительное влияние на электрофизические свойства кремния. выступать в качестве геттерирующих центров в ходе различных внешних воздействий [5].

В данной работе рассмотрено поведение примесных атомов Ni в процессе после диффузионной низко температурной обработки. Выдвинуто предположение о взаимодействии примесных атомов с собственными дефектами кристаллической решетки монокристаллического Si. Сделана попытка связать процессы образования дислокационных концентрических петель, создаваемых источниками Франка-Рида, с

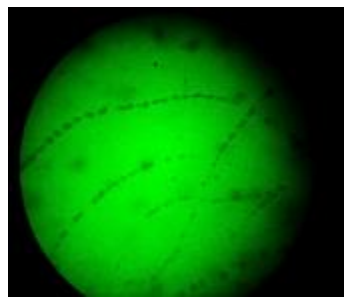
круговыми образованиями появляющимся в бездислокационном Si в ходе последиффузионной низкотемпературной обработки.

2. Эксперимент

При низко температурной обработке образцов Si легированных атомами Ni наблюдается оседание примесных преципитатов на дислокационных линиях [5, 6] (рис.1)



а)

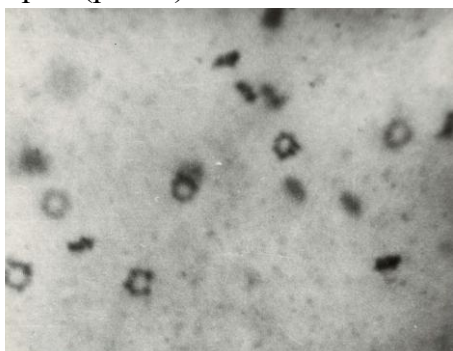


б)

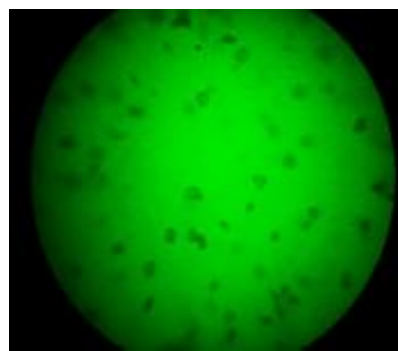
Рис.1. ИК снимки дислокационных образцов после низкотемпературной обработки

Согласно [6] термообработка образцов Si(Ni) с плотностью дислокаций $\sim 10^4$ см⁻² в интервале температур 450-800° С в течении 4 часов приводит к образованию линейных цепочек показанных на рис.1.а. Авторы полагают, что это является следствием осаждения преципитатов на линейных дислокациях. Авторы [7] получили схожий результат (рис.1.б) в результате термообработки образцов Si(Ni) при температуре 750° С в течении 9 часов. Как видно из рис.1 результаты идентичны. Наблюдаемую картину можно объяснить оседанием примесных преципитатов(кластеров) на дислокационных линиях.

Интересная картина наблюдается в без дислокационных образцах. После термообработки в них образуются примесные скопления очень интересной формы(рис.2.).



а)



б)

Рис.2. ИК снимки бездислокационных образцов после термообработки

В работе [5] термообработка без дислокационных образцов Si(Ni) при 800° С в течении 4 часов привело к образованию петлеобразных скоплений показанных на рис.2.а. Похожий результат получен и авторами [7](рис.2.б).

3. Результаты и обсуждение

Данная работа есть попытка объяснить механизмы формирования и саму форму наблюдаемых скоплений на основе математической модели, описывающий поведение

концентрических дислокационных петель, генерируемых источниками Франка-Рида, приведенной авторами [7, 8].

Под названием без дислокационный подразумеваются образцы Si с изначально низкой плотностью линейных дислокаций примерно $\leq 10 \text{ см}^{-2}$. Но как известно дислокации могут генерироваться в процессе термообработки. Наличие в кристаллической решетке Si различных примесных атомов, имеющих отличный от Si атомный радиус и относительно высокие температуры вызывают внутренние напряжения которые в свою очередь способствуют генерации концентрических дислокаций источниками которых являются источники Франка-Рида. Любой закрепленный сегмент дислокации, способный скользить в другой плоскости скольжения может являться источником Франка-Рида.

В работе [7] предложена теоретическая схема формирования дислокационных скоплений, возникающих при функционировании источника Франка-Рида. В рамках данной модели динамика дислокационного сегмента описывается дифференциальным уравнением, учитывающим вязкое торможение движения, упругие свойства кристалла, внешнее приложенное напряжение, а также кривизну линии дислокации.

В случае когда длина сегмента в криволинейных координатах d намного больше смещения точек дислокационного сегмента S то есть при $d \gg S$ справедливо уравнение (1)

$$q(\lambda, t) = \sum \frac{\sigma_{yz}}{\sigma_{cr}} \quad (1)$$

где q -усилие создаваемое ранее испущенными источником дислокационных петель, σ_{yz} и σ_{cr} -суммирующее напряжение в точке с координатами (x, y) и минимальное напряжение необходимое для образования дислокационной петли соответственно.

Компонента σ_{yz} определяет взаимодействие дислокаций в плоскости скольжения.

Первая дислокационная петля, образованная источником, удаляется от него и фиксируется на определенном расстоянии. Каждая последующая петля, приближаясь к предыдущей, испытывает возрастающее упругое отталкивание, что приводит к постепенному замедлению её движения и, в конечном итоге, к остановке. В результате формируется дислокационное скопление, в котором линии взаимодействуют посредством собственных полей напряжений.

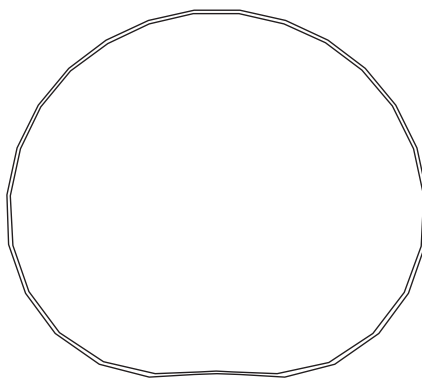


Рис.3. Модель скопления дислокационных петель

По мере роста скопления влияние совокупного внутреннего напряжения усиливается, что отражается на работе источника. Генерация новых петель прекращается тогда, когда суммарное напряжение — внешнее плюс индуцированное скоплением — становится меньше критического значения σ_{cr} , необходимого для активации источника.

4. Заключение

Как видно из рис.3 форма концентрических дислокационных скоплений совпадает с формами образований, показанных на рис.2. Можно предположить, что в процессе термической обработки происходит генерация концентрических дислокационных скоплений источниками Франка-Рида. Междоузельные атомы примесей могут притягиваться и оседать на круговых дислокациях образуя кластерные петли. Благодаря высокой скорости охлаждения петли не успевают разрастаться.

Детальное изучение процессов взаимодействия различных дефектных структур с атомами примеси позволит в дальнейшем лучше управлять свойствами полупроводников и приборов на их основе.

Литература:

1. В. И. Фистуль. Атомы легирующих примесей в полупроводниках. М. ФМ. 2004, 431 стр.
2. S.S. Nasriddinov, D.M. Esbergenov. A study of complex defect formation in silicon doped with nikel. Russian Physics Journal, Vol. 65, No. 9, 2023.
3. Y. Benkrima. Theoretical Study of the Electronic Properties of Nickel Clusters. Journal of Nano- and Electronic Physics, Vol. 12 No 6, 06013(5pp) (2020)
4. С. Зайнабидинов. Физические основы образования глубоких уровней в кремнии. Т. Фан. 1984. 160 стр.
5. М.К. Бахадирханов, Б.К. Исмаилов. Геттерирующие свойства кластеров атомов никеля в решетке кремния. Технология, оборудование и новые материалы. Приборы. 2020. №6 (240) С. 44-48.
6. С. Зайнабидинов. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Ташкент 1987.
7. М.К. Bakhadyrkhanov, K.A. Ismailov, B.K. Ismaylov, Z.M. Saparniyazova. Clusters of nickel atoms and controlling their state in silicon lattice. SPQEO, 2018. V. 21, N 4. P. 392-396.
8. В. В. Благовещенский, И. Г. Панин, Д. С. Андрианов, С. Н. Суслина. Образование дислокационного скопления источником Франка-Рида. Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, No 2. С.133-136.
9. Hudson T, Rindler F, Rydell J. 2025 Aquantitative model for the Frank–Read dislocation source based on pinned mean curvature flow. Proc.R.Soc.A481: 20240740. <https://doi.org/10.1098/rspa.2024.0740>

**ИТТРИЙ КИРИШМА АТОМЛАРИНИНГ КРЕМНИЙДАГИ ДИФФУЗИЯ
КОЭФФИЦИЕНТИНИ АНИҚЛАШ**

Х.С. Далиев¹, И.Х. Хамиджонов², Е.А. Каримбаев²

¹*“МЭИ миллий тадқиқот университети” Федерал давлат бюджети олий таълим муассасасининг Тошкент шаҳридаги филиали, Тошкент, Ўзбекистон.*

²*Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий - тадқиқот институти, Тошкент, Ўзбекистон.*

e-mail: islomjon_xx@mail.ru

Яримўтказгич материалнинг асосини ташкил этган кремнийнинг электрофизик ва оптик хусусиятларини яхшилашда, яримўтказгичли асбобларнинг температура ва радиацияга чидамлилигини оширишда кремнийни нодир ер элементлари билан легирлаш муҳим аҳамиятга эга. Шунингдек оптоэлектроникада нодир ер элементлари билан легирланган материаллардан фойдаланиш истиқболларига ва кремнийга нодир ер элементларининг диффузиясини ўрганишга қизиқиш кун сайин ортиб бормокда [1-4]. Шунинг учун ҳам мазкур ишда нодир ер элементлардан бири бўлган иттрий киришма атомларининг кремнийдаги диффузия коэффицентини аниқлашга бағишланган.

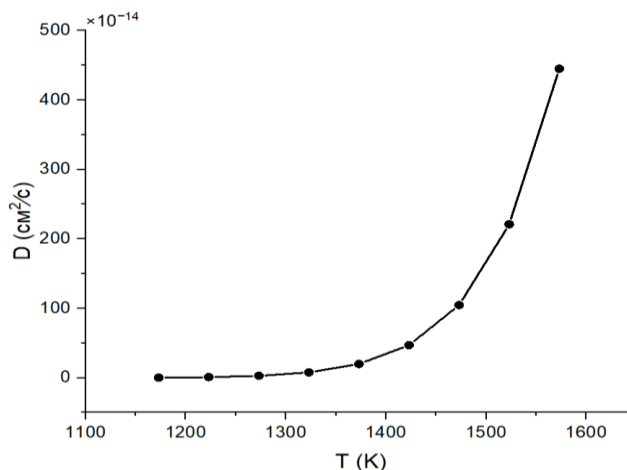
Тадқиқот учун, солиштирма қаршилиги 48 Ом·см бўлган, Чохраль усулида ўстирилган р-типли монокристалл кремнийдан фойдаланилган. Киришма элементи сифатида, тозалиги 99.9999 % бўлган иттрий элементи олинган. Монокристалл кремний намуналарнинг ўлчами 14х7х1 мм га тенг. Диффузиядан олдин монокристалл кремний намуналарига механик ва кимёвий ишлов берилган. Шу намуналар сиртига ВУП-5 қурилмаси ёрдамида иттрий атомлари юқори вакуум (10^{-6} мм. сим. уст.) остида пуркалди. Ушбу намуналар кварц шишадан тайёрланган ампулаларга жойлаштирилди. Ампула ичидаги ҳаво сўриб олинди ва юқори вакуум ҳосил қилинди. Диффузия жараёни СУОЛ-4 печи ёрдамида $T=1200^{\circ}\text{C}$ температурада $t=20$ соат вақт давомида олиб борилди. Диффузиядан кейин, намуналар тез совитилди.

Иттрий атоми радиуси кремний атоми радиусидан катта бўлганлигини инобатга олган ҳолда диффузиядан кейин, иттрий атомларининг кремнийдаги тақсимотини ўрганиш бўйича тадқиқот олиб борилди. Иттрий киришмаси учун диффузия коэффицентининг температурага боғлиқлиги қуйидаги муносабат билан аниқлаш мумкин [5]:

$$D = 8 \cdot 10^{-3} \cdot \exp [-2,9 \text{ эВ}/kT] \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

Диффузия температурасини 900°C дан 1300°C гача ўзгартириб, диффузия коэффицентини қиймати ҳисоблаб чиқилди [6]. Диффузия температурасининг ортиши билан диффузия коэффицентини ҳам ортиши кузатилди. Кремнийдаги иттрийнинг диффузия коэффицентини температурага боғлиқлиги қуйида (1-расм) берилган.

Диффузия коэффицентини қиймати олинган натижаларга кўра, $3,11 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ дан $4,45 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ гача ўзгаришини кузатиш мумкин. Биз ўтказган тадқиқот учун, диффузия температураси $T=1200^{\circ}\text{C}$ ва диффузия вақти 20 соат бўлганда диффузия коэффицентини қиймати $1,05 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ тенг эканлиги аниқланди.



1-расм. Кремнийдаги иттрийнинг диффузия коэффицентини температурага боғлиқлиги

Шунингдек тадқиқот натижалари бўйича иттрийнинг кремнийдаги диффузия коэффицентини 900-1300°C температура интервалида назарий ва 1100-1300°C температура интервалида экспериментал қийматлари олинди. Олинган экспериментал тадқиқотларга кўра, кремнийдаги иттрийнинг диффузия коэффицентини температура ошиши билан экспоненциал қонун асосида ошиши кузатилди.

Фойдаланилган адабиётлар рўйхати:

1. Н.В.Латухина, В.М.Лебедев. Диффузионное легирование кремния редкоземельными элементами. Материалы электронной техники. 2011 г. №1. с. 7-12.
2. Х.С. Далиев, Ш.Б.Утамурадова, И.Х.Хамиджонов. Рентгеноструктурные исследования p-Si<Y>. Физика полупроводников и микроэлектроника. 2023 г., Том 5, Вып.5, стр. 8-15.
3. Х.С.Далиев, И.Х.Хамиджонов. Кремнийдаги иттрий атомларининг электрофизик ва оптик хусусиятлари Кремнийдаги иттрий атомларининг электрофизик ва оптик хусусиятлари. “Яримўтказгичли опто – ва наноэлектроника, муқобил энергия манбалари ҳамда уларнинг истиқболлари” мавзусидаги халқаро илмий - амалий анжумани. 2023 йил 12-13 октябрь. 143-144 бетлар.
4. Х.С.Далиев, Ш.Б.Утамурадова, И.Х.Хамиджонов, С.М.Абдураимов. Радиационное дефектообразование в кремнии, легированном иттрием. Материалы II-международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики полупроводников, микро - и наноэлектроники». Ташкент. 27-28 октября 2023 г. с.247-249.
5. Д.Э.Назыров, М.И.Базарбаев, А.А.Иминов. Диффузия иттрия в кремнии. ФТП. 2006. том 40, вып. 7, с.788-789.
6. Х.С.Далиев, И.Х.Хамиджонов. Иттрий киришма атомларининг диффузия жараёнида кремнийдаги тақсмотини ҳисоблаш дастури. Ўзбекистон Республикаси адлия вазирлиги №DGU 27237. Ўзбекистон Республикасининг Дастурий маҳсулотлар давлат райистериди 05.09.2023 йил рўйхатдан ўтказилди. Талабнома рақами DGU20235900.

***n*-GaP BINAR BIRIKMASIDA TOK O‘TISH MEXANIZMLARINING
HARORATGA BOG‘LIQLIGI**

A.S. Saidov¹, Sh.N. Usmonov¹, H.Sh. Abdullayev¹, O.Z. Turg‘unov¹, T.X. Jalilov²

¹*O‘zR FA S.A. Azimov nomidagi Fizika-texnika instituti Toshkent shahri, Ch. Aytmatov
ko‘chasi 2B.*

²*Chirchiq davlat pedagogika universiteti Chirchiq shahri, Amir Temur ko‘chasi 104 uy.*

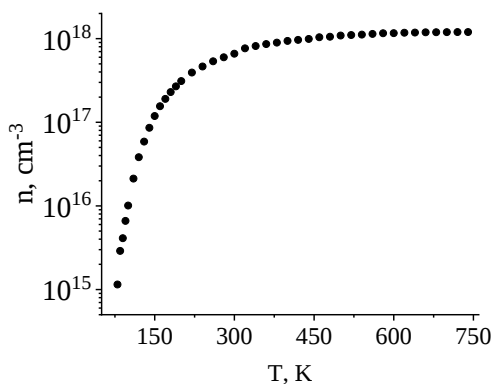
E-mail: habibabdullayev04@gmail.com

Yarimo‘tkazgichli qurilmalarni loyihalash va tayyorlashda materialning asosiy parametrlarini aniqlash, xususan, yarimo‘tkazgichli materiallarni tavsiflashda galvanomagnit o‘lchash usuli keng tarqalgan metodlardan biri hisoblanadi. Jumladan Xoll effektidan foydalanish namunaning elektrofizik parametrlari - solishtirma elektr o‘tkazuvchanligi (σ), asosiy zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (n) va harakatchanligini (μ) yuqori aniqlikda o‘lchash imkonini beradi [1]. Mazkur omillarni inobatga olgan holda, Te bilan legirlangan n -turli GaP binar birikmasida zaryad tashuvchilarning transport mexanizmlari 80–740 K harorat diapazonida tadqiq etildi.

Yarimo‘tkazgich namunalarining elektrofizik parametrlarini o‘rganishda ularda omik kontaktlar olish juda muhim ahamiyat kasb etadi. Chunki omik kontaktlar o‘lchash jarayonida qo‘shimcha parazit qarshilik va zararli potentsiallar farqining paydo bo‘lishining oldini olib, namuna elektr parametrlarining aniqroq qiymatlarini o‘lchash imkonini beradi [2]. Shu boisdan n -GaP namunasida Ni–Ag–Sn–GaP ko‘p qatlamli struktura asosida omik kontaktlar hosil qilindi. Namunaning solishtirma elektr qarshiligi hamda Xoll koeffitsiyentini aniqlash uchun to‘rt zondli Van der Pau usulidan foydalanildi.

Namunalarning elektrofizik parametrlari HMS-7000 (ECOPIA, Janubiy Koreya) o‘lchash majmuasi yordamida 80-740 K harorat oralig‘ida tadqiq etildi.

O‘lchashlardan oldin namuna 5 daqiqa davomida distillangan suvda qaynatildi, hamda 473 K haroratda azotli muhitda ushlab turildi. Mazkur ishlov namunaning sirt faolligini kamaytirish orqali o‘lchash natijalarining aniqligini oshirishga yordam beradi [3].



1-rasm. *n*-GaP namunasida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bog‘liqligi.

1-rasmda n -GaP namunasida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining haroratga bogliqlik grafigi keltirilgan. Ushbu rasmdan ko‘rinib turibdiki harorat 80 K dan 740 K gacha ortganda n -

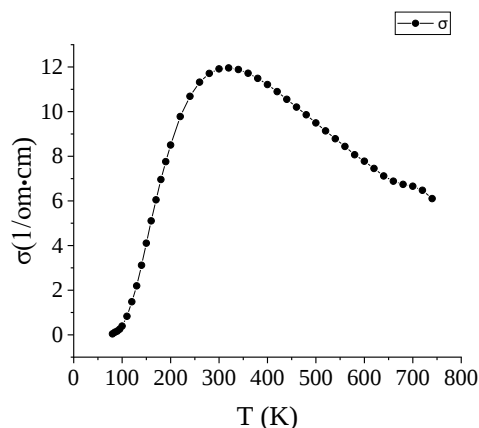
GaP namunasida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ dan $\sim 1.2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ gacha monoton tarzda ortadi.

1-rasmda keltirilgan grafik tahlili shuni ko'rsatadiki harorat 80 K dan 140 K gacha ortib borganda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi deyarli 100 marta, so'ngra haroratning to 740 K gacha ortishida esa ~ 10 marta ortishi kuzatiladi. Demak 80 – 140 K haroratlar oralig'ida namunada tok o'tish mexanizmida erkin elektronlarning faol termik generatsiyasi muhim rol o'ynaydi. Haroratning 80 K dan 110 K oralig'ida erkin elektronlar konsentratsiyasi (n)ning haroratga bog'liqligi eksponensial qonunga bo'y sinadi:

$$n = n_0 e^{-\frac{E_d}{kT}}, \quad (1)$$

bu yerda E_d – nGaP da elektr o'tkazuvchanlik turini aniqlab beruvchi sayoz sathli donor markazlarining energetik sathi, k – Boltsman doimiysi, T – absolyut harorat. Namuna Te bilan legirlanganligi boisidan E_d Te kirishma atomlarining ionlanishi energiyasi bilan bog'liq. Haqiqatdan $\ln(n) = f(1/T)$ bog'lanish grafigi 80 – 110 K oralig'ida aynan to'g'ri chiziq grafigi bilan juda yaxshi ekstrapolyatsiyalanadi. Ushbu to'g'ri chiziqning burchak koeffitsiyenti orqali hisoblab topilgan E_d ning qiymati 70 meV ni tashkil etdi. Demak Te atomlarining energetik sathlari GaP o'tkazuvchanlik zonasi tubidan 70 meV pastda joylashar ekan.

2-rasmda n -GaP namunasining solishtirma elektr o'tkazuvchanligini haroratga bog'liqlik grafigi keltirilgan.



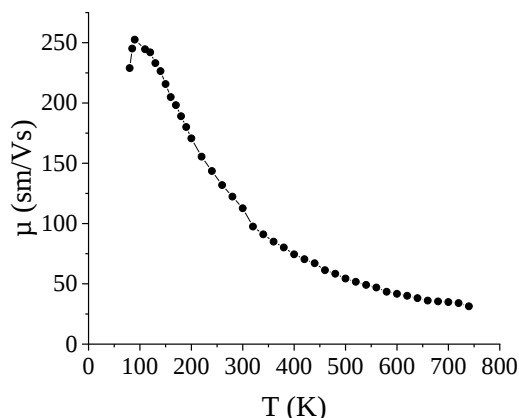
2-rasm. n -GaP namunasining solishtirma elektr o'tkazuvchanligini haroratga bog'liqligi.

Grafikdan ko'rinib turibdiki harorat 80 K dan 320 K gacha ortganda namunaning solishtirma elektr o'tkazuvchanligi monoton tarzda ortib boradi, so'ngra 740 K gacha monoton tarzda kamayib boradi.

3-rasmda n -GaP namunasida zaryad tashuvchilar harakatchanligining haroratga bog'liqlik grafigi keltirilgan. Grafik tahlili shuni ko'rsatadiki harorat 80 K dan 90 K gacha ortganda elektronlar harakatchanligining ortishi, so'ngra 740 K gacha esa - monoton tarzda kamayishi kuzatiladi. Demak 90 K gacha erkin elektronlarning sochilishida ionlashgan kirishma atomlarining ta'siri, 90 K dan 740 K oralig'ida esa - kristall panjara atomlari issiqlik tebranma harakatining ta'siri muhim rol o'ynar ekan.

Ma'lumki, yarimo'tkazgich materiallarning elektr o'tkazuvchanligi muayyan haroratda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi n ga va harakatchanligi μ ga bog'liq:

$$\sigma(T) = qn(T)\mu(T), \quad (2)$$



3-rasm. *n*-GaP namunasida zaryad tashuvchilar harakatchanligining haroratga bogʻliqligi.

ya'ni, harorat o'zgarishi bilan namunada tok o'tish mexanizmining o'zgarishiga zaryad tashuvchilar konsentratsiyasining o'zgarishi bilan bir vaqtda ular harakatchanligining o'zgarishi ham ta'sir qiladi.

Demak, past haroratlarda 90 K gacha *n* – GaP<Te> namunasida tok o'tish mexanizmida erkin elektronlarning ionlashgan kirishma atomlarida sochilishi, 90 – 320 K haroratlar oralig'ida sayoz donor sathlaridan elektronlarning termik generatsiyasi, 320 – 740 K oralig'ida esa elektronlarning fononlarda sochilishi muhim rol o'ynar ekan.

Te bilan legirlangan *n*-GaP monokristall namunalarida 80–740 K haroratlar oralig'ida o'tkazilgan eksperimental tadqiqotlar zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi va harakatchanligining haroratga bog'liqlik xususiyatlarini aniqlash imkonini berdi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, harorat oshishi bilan zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi $\sim 1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ dan $\sim 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ gacha ortadi, bu esa donor atomlarining termik ionlashuvi bilan bog'liq. Tadqiqot davomida donor sathining ionlanish energiyasi $\sim 70 \text{ meV}$ ga teng ekanligi aniqlandi. Elektronlar harakatchanligining tahlili esa past haroratlarda zaryad tashuvchilarning sochilishi asosan ionlashgan kirishmalar bilan, yuqori haroratlarda esa fononlar bilan bog'liq ekanligini ko'rsatdi.

Olingan natijalar GaP asosidagi yarimo'tkazgich materiallarda zaryad tashuvchilar transport jarayonlarining fizik mexanizmlarini chuqurroq tushunishga imkon beradi. Aniqlangan transport parametrlaridan GaP asosidagi optoelektron va yuqori harorat sharoitida ishlovchi yarimo'tkazgich qurilmalar (masalan, yorug'lik diodlari, yuqori haroratli sensorlar va elektron komponentlar)ni loyihalash hamda ularning ish rejimlarini optimallashtirishda foydalanish mumkin. Bu esa GaP asosidagi materiallarning zamonaviy mikroelektronika va optoelektronika texnologiyalarida qo'llanilish imkoniyatlarini kengaytirishga xizmat qiladi.

Adabiyotlar:

1. Schacham, S. E., & Finkman, E. (1986). Light-modulated Hall effect for extending characterization of semiconductor materials. *Journal of Applied Physics*, 60(8), 2860–2865. <https://doi.org/10.1063/1.337071>
2. Saidova A. S., Usmonova Sh. N., Turgunova O. Z. Investigation of the Features of the Thermovoltaic Effect in GaSb, GaAs and GaP Binary Compounds // *Applied Solar Energy*. – 2023. – Vol. 59. – № 4. – P. 400–409.
3. Schroder, D. K. *Semiconductor Material and Device Characterization* / D. K. Schroder. – 3rd ed. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. –P. 72.

**MARGANETS BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYDA FAZAVIY VA
STRUKTURAVIY O‘ZGARISHLAR**

**Sh.B.Utamuradova, J.J.Hamdammov, H.J. Matchonov, F.J. Matchanova,
F.R. Yo‘ldoshov, G. Nurmatova, E.A. Erkayeva**

*O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va
mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O‘zbekiston*

Kremniyni o‘tuvchi elementlar bilan legirlash funksional yarimo‘tkazgich materiallar muhandisligining strategik muhim yo‘nalishi hisoblanadi. Bu yo‘nalish kremniyning elektron, magnit va issiqlik xossalari spektrini kengaytirishga qaratilgan. 3d-elementlarning keng doirasi orasida marganets alohida e‘tiborni tortadi, chunki u barqaror silitsid fazalarini hosil qilish, shuningdek Si kristall panjarasida spinga bog‘liq o‘tkazuvchanlik va kuchsiz ferromagnetizmni yuzaga keltirish xususiyatiga ega [1-2]. Kremniy-marganets (Si-Mn) tizimi murakkab ikki komponentli tizim bo‘lib, o‘zgaruvchan tarkibli ko‘plab intermetall birikmalardan iborat boy fazaviy diagramma bilan tavsiflanadi. Eng ko‘p o‘rganilgan va amaliy ahamiyatga ega bo‘lgan fazalar MnSi, Mn₄Si₇ va Mn₁₁Si₁₉ kabi kremniyga boyroq birikmalardir [3-4].

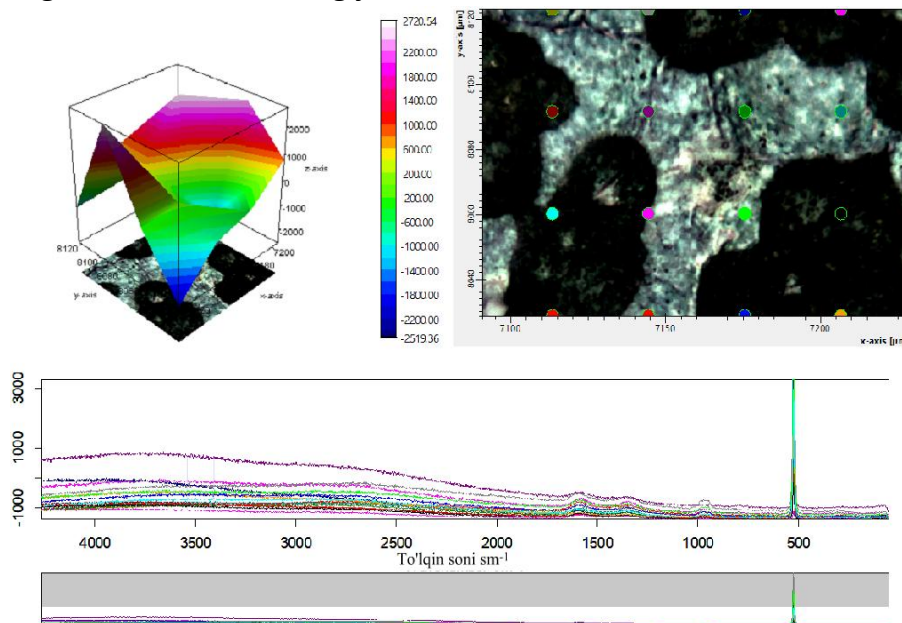
Si-Mn tizimi bo‘yicha sezilarli miqdordagi eksperimental va nazariy ma‘lumotlar mavjud bo‘lishiga qaramay, bir qator muhim masalalar hali ham hal etilmagan. Termik ishlov berish jarayonida fazaviy o‘tishlarning mexanizmlari va harorat chegaralari to‘liq aniqlanmagan. Termik ishlovning dastlabki bosqichlarida marganets atomlarining joylashuvi jumladan, tugunlararo va klaster holatlari noaniq qolmoqda. Mn₄Si₇ fazasining hosil bo‘lish sharoitlari va uning keyingi termik ishlovda MnSi ga qayta o‘zgarishi ehtimoli yetarlicha o‘rganilmagan.

Past haroratlarda silitsid hosil bo‘lishining dastlabki bosqichlarini ishonchli aniqlash alohida qiyinchilik tug‘diradi, chunki bu sharoitda Mn hali tartibsiz shaklda yoki a-Si da erigan atom ko‘rinishida bo‘lishi mumkin. Bunday holatlarni rentgen-difraksiya usullari bilan farqlash qiyin, biroq yuqori sezgirlikka ega tebranish spektroskopiyasi ayniqsa, Raman spektroskopiyasi yordamida qisman aniqlash mumkin [5-6]. Shunday qilib, Mn bilan legirlangan kremniyda marganets silitsidlarining faza hosil bo‘lishi va faza barqarorligini termik ishlov berish sharoitlariga bog‘liq ravishda o‘rganish qattiq jismlar fizikasi, materialshunoslik va amaliy nanotexnologiyalar kesishmasidagi dolzarb vazifa hisoblanadi.

Dastlabki material sifatida solishtirma qarshiligi 1 dan 40 Om·sm gacha bo‘lgan monokristall p- va n-turdagi kremniy plastinkalari ishlatildi. Yuqori tozalikdagi ($\geq 99,999\%$) metall marganets bilan legirlash moysiz turbomolekulyar nasos tizimi yordamida ta‘minlangan yuqori vakuumli muhitda ($P \leq 10^{-7}-10^{-8}$ Torr) termovakuumli bug‘latish usuli orqali amalga oshirildi. Marganets bilan legirlash yopiq vakuumli kvarts ampulalarda 600 dan 1200°C gacha bo‘lgan haroratda 0,5 soatdan 10 soatgacha davom etgan yuqori haroratli diffuziya jarayoni amalga oshirildi. Diffuziyadan so‘ng, namunalar tez sovitish yoki sekin pechda sovitish usullarida sovutildi. Ushbu turli xil issiqlik yo‘nalishlari silitsid fazalarining morfologiyasiga va Si kristall panjarasida ichida Mn ning taqsimlanishiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatadigan kristallanish va fazaviy o‘zgarishlarning deyarli muvozanatli va metastabil holatlarini tadqiq qilish imkonini berdi [7-9].

Strukturaviy ma‘lumotlar ko‘rsatadiki, issiqlik bilan ishlov berish MnSi nanofazalarining paydo bo‘lishi va o‘sishiga olib keladi, hamda kremniy bilan yanada to‘yinishi natijasida MnSi→Mn₄Si₇ o‘zgarishini yuzaga keltiradi. Bu o‘zgarish Mn ning qayta taqsimlanishi, elastik zo‘riqishlarning ortishi va aniq “silitsid/Si” chegarasining shakllanishi kuzatiladi. Mn bilan

legirlangan kremniyda $E_c-0,54$ eV chuqur sath MnSi birikmalari qobig'idagi Mn bilan bog'liq komplekslar bilan o'zaro bog'liqlikni ko'rsatadi. $E_c-0,42$ eV chuqur sath yuqori silitsid fazasi Mn_4Si_7 hosil bo'lishi va nomuvofiq dislokatsiyalar o'sishi paytida o'zining maksimal hissasiga erishadi. $E_c-0,20$ eV sayoz sathi "silitsid/Si" chegarasidagi interfeys tutqichlarining mavjudligini aks ettiradi, ularning hissasi birikmalarning yiriklashishi bilan ortib boradi.



1-rasm. 1200°C haroratda termik ishlovdan so'ng p-Si<Mn> namunasining kimyoviy Raman tasviri: signal jadalligi taqsimoti (rangli shkala, 3D), faza kontrast xaritasi (yuqori o'ng burchakda) va tanlangan sohalardan olingan integrallangan spektrlar (pastki qismda).

Olingan eksperimental ma'lumotlar Si-Mn tizimida termodinamik va diffuziya omillari ta'sirida bosqichma-bosqich fazaviy o'zgarishlar sodir bo'lishini ko'rsatdi. Bu fazaviy o'zgarishlar ham rentgen-strukturaviy tahlil, ham Raman kombinasion sochilish spektroskopiyasi yordamida tasdiqlandi. Ushbu usullar kimyoviy bog'lar va kristall panjarasi simmetriyasi darajasidagi strukturaviy o'zgarishlarni aks ettirdi.

Rentgen nurlarining difraksiyasi bo'yicha o'tkazilgan tadqiqotlar Si-Mn tizimidagi faza tarkibining termodinamik ishlov berish haroratiga bog'liq ravishda kuzatish imkonini berdi. Issiqlik bilan ishlov berishning dastlabki bosqichida $T \leq 600^\circ\text{C}$ difraktogrammalarda asosan keng va yaxshi ajralmagan difraksion maksimumlar kuzatiladi. Bu holat kristallanish darajasining pastligini, panjara nuqsonlarining sezilarli miqdorini va yuqori qatlamning qisman amorflashganligini ko'rsatadi. 2θ ning $\sim 28-29^\circ$ oralig'ida keng maksimumlarning paydo bo'lishi, Mn atomlarining panjara oralig'idagi bo'shliqlariga joylashishi natijasida kristall kremniy panjara parametrining kengayishi bilan bog'liq bo'lishi mumkin [10].

Monokristall kremniy va Mn_4Si_7 hamda MnSi silitsid fazalariga mos keladigan difraksiya cho'qqilari aniq ko'zga tashlanadi $(111)_\alpha$, $(333)_\alpha$ aks etishlari, shuningdek β -fazadan cho'qqilar qayd etilgan bo'lib, bu ko'p komponentli kristall tuzilmaning shakllanganligini ko'rsatadi. Harorat $600-700^\circ\text{C}$ ga ko'tarilganda, MnSi intermetall birikmasi uchun xos bo'lgan aniq difraksion cho'qqilar shakllanadi. Eng kuchli akslanishlar $2\theta \approx 31,6^\circ$, $36,1^\circ$, $47,3^\circ$ va $55,5^\circ$ burchaklarda kuzatildi. Shu bilan bir vaqtda, kremniy cho'qqilari, ayniqsa $(111)_\alpha$ va $(220)_\alpha$ saqlanib qoldi.

Raman spektroskopiyasi kremniy-marganets tizimidagi faza tarkibi o'zgarishini bosqichma-bosqich kuzatish imkonini berdi. Yuqori haroratda termik ishlov berishning dastlabki

bosqichlarida Mn_4Si_7 silitsid fazasining hosil bo'lishi va keyinchalik yuqori haroratlarda MnSi ga o'tishi rentgen-difraksion ma'lumotlar va ilmiy adabiyotlardagi manbalar [11-15] bilan muvofiq keladi.

1200°C haroratda termik ishlov berilgan p-Si<Mn> namunasida faza va kimyoviy komponentlarning taqsimlanishini vizualizatsiya qilish kimyoviy Raman xaritalash usullari yordamida amalga oshirildi (1-rasm). Ushbu metodologiya yuqori aniqlikda fazoviy va spektroskopik ma'lumotlarni bir vaqtning o'zida olish imkonini beradi.

Olib borilgan tadqiqotlar Si-Mn tizimida termik ishlov berish davomida fazalar shakllanishining aniq ketma-ketligini aniqlash imkonini berdi. Bu natijalar rentgen-difraksion tahlil va Raman kombinatsion sochilish spektroskopiyasi yordamida tasdiqlandi.

Shunday qilib, olingan ma'lumotlar Si-Mn tizimida faza hosil bo'lishining ishonchli eksperimental-nazariy sxemasini ta'minlaydi hamda silitsidlarning o'sishi va o'zgarishining asosiy mexanizmlarini yoritib beradi. Bu, ayniqsa mikro- va nanoelektronika sohalarida, boshqariladigan faza tuzilishiga ega bo'lgan funksional kremniy tarkibli materiallarni loyihalashda amaliy ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. F.A. Ferri, et al. "Evidence of magnetic vortices formation in Mn-based sub-micrometre structures embedded in Si-Mn films," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 105005 (2009). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/13/132002>
2. K.P. Abdurakhmanov, Kh.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, and N.Kh. Ochilova, "On defect formation in silicon with impurities of manganese and zinc," *Applied Solar Energy* (English translation of *Geliotekhnika*), 34(2), 73–75 (1998).
3. N. Dupin, B. Sundman, U.R. Kattner, et al. "Implementation of an effective bond energy formalism in the multicomponent CALPHAD approach," *Calphad*, 43, 18–31 (2013). <https://doi.org/10.6028/jres.123.020>
4. K.P. Abdurakhmanov, Sh.B. Utamuradova, Kh.S. Daliev, S.G. Tadjy-Aglaeva, and R.M. Ergashev, "Defect-formation processes in silicon doped with manganese and germanium," *Semiconductors*, 32(6), 606–607 (1998).
5. Y. Ishikawa, et al. "Magnetic properties of MnSi with B20 structure," *Phys. Rev. B*, 31, 5884 (1985). <https://doi.org/10.1103/physrevb.31.5884>
6. Ismaïla Kounta, et al. "Competitive actions of MnSi in the epitaxial growth of Mn_5Si_3 thin films on Si(111)," *PHYSICAL REVIEW MATERIALS* 7, 024416 (2023).
7. S.I. Novikov, et al. "Formation of manganese silicides in silicon films by high-temperature annealing," *Semiconductors*, 54, 1105–1110 (2020).
8. Bruker Optik GmbH. *SENTERRA II User Manual* (2018).
9. ICDD PDF-4+ Database. International Centre for Diffraction Data (Release 2023).
10. Sh.B. Utamuradova, Kh.J. Matchonov, J.J. Khamdamov, and Kh.Y. Utemuratova, "X-ray diffraction study of the phase state of silicon single crystals doped with manganese". *New Materials, Compounds and Applications*, 7(2), 93-99, (2023).
11. Z. Li, et al. "B20–MnSi films grown on Si(100) substrates with magnetic skyrmion signature," *Materials Today Physics*, 21, 100541 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2021.100541>
12. F.A. Ferri, et al. "Evidence of magnetic vortices formation in Mn-based sub-micrometre structures embedded in Si-Mn films," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 105005 (2009). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/10/105005>

13. B.D. Igamov, et al. "Electrophysical and Thermoelectric Properties and Crystal Structure of the Formed Mn_4Si_7 Thin Vacuum Coating," *Advanced Physical Research*, 7(2), 212–221 (2025). <https://doi.org/10.14704/nq.2025.07.02.407>
14. Y.-W. Kim, et al. "Formation of Mn-silicide thin films on Si substrate: structural and transport properties," *Thin Solid Films*, 516, 7053–7058 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.12.070>
15. T. Goto, et al. "High-temperature thermoelectric properties of $\text{MnSi}_{1.7}$ films prepared by reactive deposition epitaxy," *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 3076–3080 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.11.101>

LiNbO_3 YUPQA PLYONKALARINING KRISTALLIK DARAJASIGA TERMIK ISHLOV BERISH JARAYONLARINING TA'SIRI

Z.T. Azamatov¹, A.B. Baxromov¹, A.A. Sapaeva¹, M.Sh. Suyunova²

¹*O'zMU huzuridagi yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot
instituti, Toshkent.*

²*Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti. Navoiy.*

e-mail: abrorbahromov0101@gmail.com

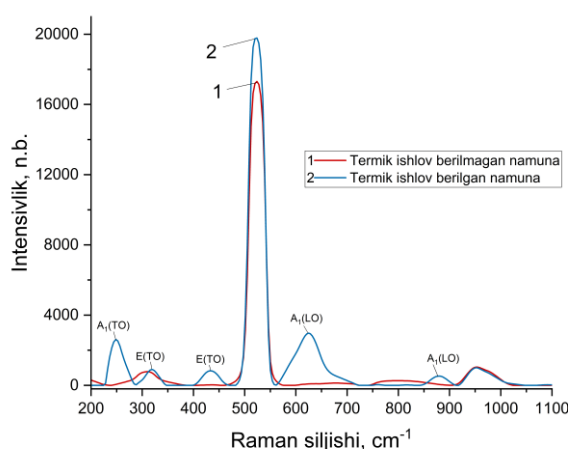
Tadqiqot doirasida monokristall kremniy (SiO_2) asosi yuzasida litiy niobati (LiNbO_3) yupqa plyonkalarini sintez qilish jarayoni yuqori chastotali (RF) magnetronli ion-plazmali purkash usulida amalga oshirildi, bu esa dielektrik materiallarni purkashda nishon sirtida zaryadlar to'planishining oldini olib, plazma razryadining yuqori barqarorligini ta'minladi. Eksperimentda nishon (target) sifatida tarkibi 99,99% yuqori tozalik darajasiga ega, diametri 50 mm va qalinligi 5 mm o'lchamli LiNbO_3 keramik materialidan foydalanildi, bunda dielektrikning past issiqlik o'tkazuvchanligini kompensatsiya qilish va issiqlik dissipatsiyasini optimallashtirish maqsadida nishonning teskari tomoniga mis (Cu) kontakti o'rnatilib, tizimning uzluksiz suv sovitish konturi orqali issiqlik muvozanati saqlab turildi.

Vakuum kamerasidagi qoldiq gazlar molekulyar nasos yordamida tozalanadi, plazma muhitini yaratish uchun 120 sccm oqim tezligida inert argon (Ar) gazi yuborilib, ishchi bosim 3 Pa miqdorida turg'unlashtirildi, bu esa Ar^+ ionlarining nishon sirtini samarali bombardimon qilishi va purkalanayotgan zarrachalarning o'rtacha erkin yugurish yo'li davomida yetarli kinetik energiyani saqlab qolishi uchun zaruriy fizik sharoitni yaratdi. Plyonka kondensatsiyasi nishonga 150 W miqdoridagi o'zgaruvchan tok quvvati berish orqali amalga oshirildi, bu esa litiy va niobiy atomlarining barqaror stexiometrik oqimini shakllantirishga xizmat qildi, bunda nishon va silisiy taglik orasidagi masofaning 40 mm etib belgilanishi purkalanayotgan atomlarning sirt bo'ylab diffuzion harakatini faollashtirib, o'sayotgan plyonka yuzasining yuqori energiyali ionlar bilan ortiqcha bombardimon qilinishining oldini olish imkonini berdi.

Olingan LiNbO_3/Si geterostrukturasining kristallik darajasini oshirish, amorf fazani trigonal strukturaga o'tkazish va ichki mexanik kuchlanishlarni relaksatsiya qilish maqsadida namunalar havo muhitida ikki bosqichli differensial termik ishlovdan o'tkazildi. Dastlabki bosqichda harorat $5^\circ\text{C}/\text{min}$ tezlik bilan 550°C gacha ko'tarilib, kristallik murtaklarining shakllanishi uchun 30 minut davomida izotermik ushlab turildi, shundan so'ng faza shakllanish jarayonini yakunlash va donachalar chegarasini barqarorlashtirish uchun harorat 700°C gacha oshirilib, 45 minut davomida termik modifikatsiya qilindi. Jarayon yakunida kremniy va litiy niobati orasidagi termik kengayish

koeffitsiyentlari farqi tufayli yuzaga kelishi mumkin boʻlgan destruktiv kuchlanishlarni minimallashtirish va mikro-yoriqlar hosil boʻlishining oldini olish maqsadida namunalar xona haroratigacha nazorat qilinadigan gradiyent bilan sekin sovitildi.

Tadqiqot doirasida shakllantirilgan LiNbO_3/Si geterostrukturalarining faza tarkibi, kristallik darajasi va strukturaviy simmetriyasini aniqlash maqsadida Raman spektroskopiyasi tahlili oʻtkazildi. Litiy niobati (LiNbO_3) xona haroratida trigonal kristallik sistemasining $R3c$ fazoviy guruhiga mansub boʻlib, ushbu simmetriya guruhi materialning barcha fundamental fizik, xususan, ferroelektrik va nolineer-optik xossalarini belgilab beradi [1,2]. $R3c$ simmetriyasining fundamental xususiyati unda inversiya markazining (markaziy simmetriyaning) mavjud emasligidir, bu esa kristall panjarasida musbat va manfiy zaryadlar markazining siljishiga va natijada spontan qutblanishning vujudga kelishiga zamin yaratadi. Raman spektrlarining qiyosiy tahlili shuni koʻrsatadiki, termik ishlov berish jarayoni plyonkaning amorf holatdan aynan ushbu maqsadli $R3c$ fazasiga oʻtishida hal qiluvchi rol oʻynaydi[3,4].



Termik ishlov berilmagan namunaning Raman spektrida (qizil chiziq) fonon modalarining intensivligi oʻta past boʻlib, spektr yoyilgan (broad) koʻrinishga ega ekanligi plyonkaning dastlabki holatda asosan tartibsiz amorf tuzilishga ega ekanligidan dalolat beradi. Ikki bosqichli termik ishlovdan soʻng esa, spektrda oʻtkir va yuqori intensivlikdagi choʻqqilarning paydo boʻlishi plyonkaning toʻliq kristallanganini va $R3c$ fazasiga xos boʻlgan trigonal strukturani shakllantirganini isbotlaydi. Nazariy jihatdan ushbu simmetriya guruhi uchun ruxsat etilgan $7A_1+13E$ optik tebranish modalaridan asosiylari eksperimental spektrda yaqqol namoyon boʻladi.

Spektrning $150-220\text{ cm}^{-1}$ sohasidagi past chastotali tebranishlari (E va A_1 modalar) Li^+ ionlarining kristall panjarasi ichidagi uzoq masofali harakati va Nb^{5+} ionlarining kislorod oktaedriga nisbatan siljishi bilan bogʻliq boʻlib, ularning koʻk spektrda shakllanishi strukturaning c-oʻqi boʻylab tartiblanishini anglatadi.

Yuqoridagi rasmda LiNbO_3/Si geterostrukturalarining Raman spektrlari: (1) termik ishlov berilmagan namuna; (2) termik ishlov berilgan namuna.

$240-280\text{ cm}^{-1}$ sohasidagi kuchli tebranishlar ($A_1(\text{TO})$ va $E(\text{TO})$ modalar) Nb-O bogʻlarining egilish tebranishlariga hamda Li-O bogʻlarining valent tebranishlariga tegishli boʻlib, ushbu choʻqqilarning keskinligi litiy va kislorod atomlarining stexiometrik muvozanatda ekanligini tasdiqlaydi. Spektrning $320-370\text{ cm}^{-1}$ va $430-450\text{ cm}^{-1}$ sohasidagi modalar NbO_6 oktaedrining deformatsiyasi va O-Nb-O burchaklarining tebranishlari natijasida yuzaga keladi. Xususan, 434 cm^{-1} atrofida choʻqqi litiy niobatining $R3c$ fazasiga xos boʻlgan asosiy indikatorlardan biri boʻlib, namunada boshqa niobiy oksidi fazalari (masalan, Nb_2O_5 yoki LiNb_3O_8) mavjud emasligini isbotlaydi.

Spektrning 520.7 cm^{-1} sohasidagi dominant cho‘qqisi kremniy (Si) tagligining birinchi tartibli optik fonon (LO) modasiga mos keladi. Termik ishlodan so‘ng ushbu cho‘qqi intensivligining ortishi LiNbO_3 plyonkasining kristallanishi natijasida uning optik shaffofligi yaxshilanganini va lazer nurining taglikka qadar sochilmasdan yetib borishini ko‘rsatadi. $600\text{--}680\text{ cm}^{-1}$ sohasidagi keng va intensiv moda ($A_1(\text{LO})$ va $E(\text{LO})$) esa NbO_6 oktaedri ichidagi Nb-O bog‘larining cho‘zilishi (stretching) bilan bog‘liq bo‘lib, uning shakllanishi plyonkada ferroelektrik xossaga javob beruvchi oktaedrik karkasning to‘liq vujudga kelganini anglatadi. Shuningdek, $800\text{--}900\text{ cm}^{-1}$ sohasidagi ikkinchi tartibli fonon modalarining aniqlanishi namunaning yuqori strukturaviy sifatga ega ekanligini yana bir bor tasdiqlaydi. Xulosa qilib aytganda, Raman spektrlarining qiyosiy tahlili LiNbO_3/Si geterostrukturalarining barqaror R3c fazasi bo‘yicha shakllanishi faqatgina nazorat qilinadigan termik ishlodan so‘ng yakunlanishini va barcha atomar bog‘larning muvozanatli kristallografik nuqtalarga joylashishini ilmiy jihatdan asoslaydi.

Adabiyotlar:

1. Rabiei P., Ma J., Khan S., Chiles J., Fathpour S. Heterogeneous lithium niobate photonics on silicon substrates // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, No. 21. – P. 25573–25581.
2. Churaev M., Wang R. N., Riedhauser A., Snigirev V., Blésin T., Möhl C., Anderson M. H., Siddharth A., Popoff Y., Caimi D., Hönl S., Riemensberger J., Liu J., Seidler P., Kippenberg T. J. A heterogeneously integrated lithium niobate-on-silicon nitride photonic platform // *Nature Communications*. – 2023. – Vol. 14. – Article No. 3499.
3. Desiatov B., Lončar M. Silicon photodetector for integrated lithium niobate photonics // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27, No. 15. – P. 20579–20587.
4. Li Q., Wang C., Wong C. W. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages // *Optica*. – 2019. – Vol. 6, No. 6. – P. 710–716.

ВЛИЯНИЕ ТИПА ПОДЛОЖКИ НА МОРФОЛОГИЮ ТОНКИХ ПЛЁНОК CNTSSe/ZnO/ZnO:Al

Ш.Б. Утамурадова¹, К.М. Файзуллаев¹, А.В. Станчик²

¹Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана, Узбекистан, Ташкент, 100057, ул. Янги Олмазор 20

²ГО «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению», Республика Беларусь, Минск 220072, ул. П. Бровки 19

В последнее десятилетие поиск новых экологически чистых и недорогих материалов для фотовольтаики привел к значительному интересу к четверным полупроводниковым соединениям [1]. Среди них особое место занимают материалы типа кестерита, где в последнее время активно исследуется замена дефицитных или токсичных элементов на более доступные аналоги. Соединение $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (CNTSSe) является перспективным поглощающим слоем благодаря оптимальной ширине запрещенной зоны ($\approx 1.5\text{ эВ}$) и высокому коэффициенту оптического поглощения [2].

Эффективность тонкопленочных солнечных элементов на основе CNTSSe во многом зависит от качества гетероперехода с проводящим оксидным слоем (ZnO:Al или AZO), включая оконный слой (ZnO). Структура $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4/\text{ZnO}/\text{ZnO:Al}$ представляет собой

многослойную систему, где каждый интерфейс играет критическую роль в разделении и транспорте носителей заряда [3].

Однако, свойства этих тонких пленок — кристаллическая структура, морфология поверхности и механические напряжения — существенно зависят от природы и характеристик используемой подложки. Подложка не только служит физической опорой, но и диктует условия роста пленок, влияет на размеры зерен и плотность дефектов на границе разделов. Исследование влияния типа подложки (например, стекло, титан, молибден или полимерные материалы) на структурные и оптические свойства системы $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4/\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$ является ключевым этапом на пути к оптимизации производительности данных фотоэлектрических преобразователей [4].

В данной работе проводится сравнительный анализ влияния различных подложек на морфологические характеристики структуры $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4/\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$, что позволяет определить наиболее благоприятные условия для синтеза высококачественных фоточувствительных слоев. Синтез тонких пленок осуществлялся в два этапа: на первом этапе методом магнетронного распыления наносились металлические прекурсоры, на втором — проводился их последующий термический отжиг в парах серы и селена. Пленки ZnO и $\text{ZnO}:\text{Al}$ осаждались при комнатной температуре с помощью магнетронного напыления. Морфологические особенности поверхности полученных образцов исследовались методом атомно-силовой микроскопии с использованием микроскопа NT 206 (Microtestmachines Co., Беларусь).

На рисунке 1 представлены трехмерные (3D) АСМ-изображения поверхности структуры $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4/\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$, сформированной на двух различных подложках: жесткой системе стекло/Мо и гибкой титановой фольге (Ti).

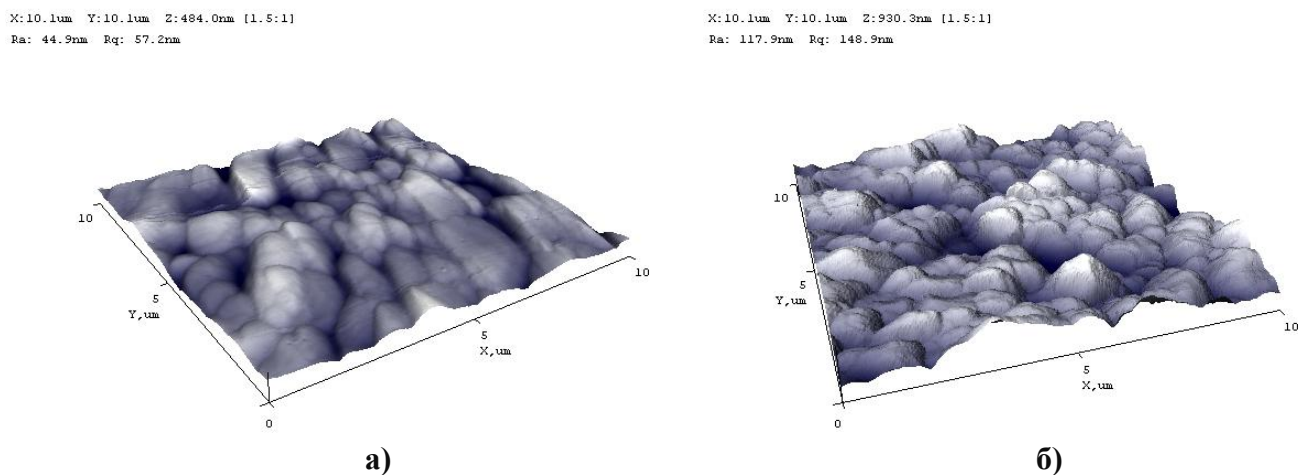


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности структуры $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4/\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{Al}$, сформированной на различных подложках: (а) стекло/Мо и (б) титановая фольга (Ti).

Структура на подложке стекло/Мо характеризует относительно однородным распределением зерен и сглаженным рельефом. Среднеарифметическая шероховатость составляет $R_a=44.9$ нм, а среднеквадратичная — $R_q=57.2$ нм. Такая морфология свидетельствует о высокой плотности упаковки кристаллитов, что благоприятно для формирования качественного p - n перехода с буферным слоем ZnO . Плёнки $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$

на подложке Ti демонстрируют резкое увеличение текстурированности поверхности. Значения шероховатости возрастают более чем в два раза: $R_a=117.9$ нм и $R_q=148.9$ нм.

Наблюдаются выраженные пики и агломераты, что может быть обусловлено различиями в коэффициентах термического расширения между титаном и $Cu_2NiSn(S,Se)_4$, а также изначальной микроструктурой металлической фольги.

Высокая шероховатость, наблюдаемая на титановой подложке, с одной стороны, увеличивает эффективную площадь контакта между поглощающим слоем и буфером, что может способствовать росту тока короткого замыкания ($I_{кз}$). Однако, значительные перепады высот (до 930.3 нм по оси Z на Ti против 484.0 нм на Mo) создают риск возникновения локальных шунтирующих путей и неоднородностей в тонком буферном слое ZnO.

Таким образом, использование подложки стекло/Mo обеспечивает получение более планарных интерфейсов, в то время как структуры на Ti-фольге требуют дополнительной оптимизации толщины последующих слоев для предотвращения проколов и снижения токов утечки.

Данная работа выполнена при поддержке Фонда финансирования науки и инноваций Республики Узбекистан (грант № FL-8824063350) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф25УЗБ-097).

Литература:

1. Dubey R.S. and Singh Y.B. Singh. Synthesis and characterization of Cu_2NiSnS_4 quaternary alloy nanoparticles // J. Mater. Sci. Mater. Electron. –2017. –Vol. 28, N. 14. P. 10551.
2. Katagiri H., Jimbo K., Tahara M. The Prospect of Cu_2NiSnS_4 -Based Thin Film Solar Cells // MRS Online Proc. Libr. –2009. –Vol. 1165. P.145.
3. Minami T. Transparent conducting oxide semiconductors for transparent electrodes // Semicond. Sci. Technol. –2005. –Vol. 20, N. 4. P. 35.
4. Stanchik A.V., Asmalouskaya T.N., Rakitin V.V., Gremenok V.F., Gapanovich M.V., Trukhanova E.L., Zubar T.I., Trukhanov A.V., Trukhanov S.V. Morphology and Crystal Structure of $Cu_2NiSn(S,Se)_4$ Thin Films Obtained by an Electrodeposition-Annealing Process // Coatings. – 2022. – Vol. 12, N. 8. – P. 1198.

ИЗМЕНЕНИЕ ТИПА КОНТАКТА ШОТТКИ В ЛЮТЕЦИЕМ ЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ

Х.С. Далиев, З.Э. Бахронкулов, М.И. Бозорбаева.

*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и
микроэлектроники при НУУз, Узбекистан, Ташкент*

e-mail: zbahronkulov@inbox.ru

В настоящее время свойства контактов металл–полупроводник имеют важное значение в микроэлектронике и высокоскоростных электронных устройствах. Диоды Шоттки широко применяются благодаря низкому току обратной утечки и быстрому времени отклика. Однако в классических структурах Шоттки механизм протекания тока в основном обусловлен термоэлектронной эмиссией, при этом при высоких значениях тока возникают ограничения, связанные с последовательным сопротивлением и качеством интерфейса.

В данной работе структура диода Шоттки Au/(n-Si)/Ni была исследована на кремнии, легированном лютецием (Lu), при этом выявлены положительные изменения, возникающие в результате легирования, и дано их физическое объяснение.

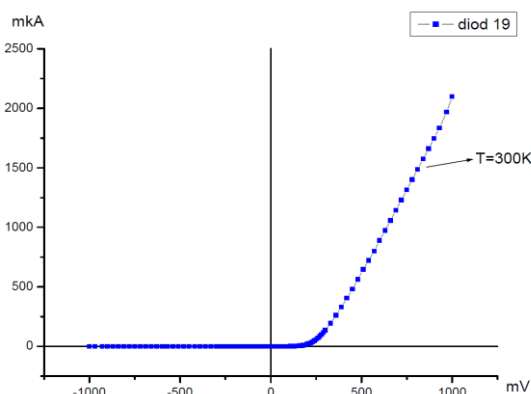


Рис. 1. Вольт–амперная характеристика диода Шоттки Au/(n-Si)/Ni

На рисунке представлена вольт–амперная характеристика диода Шоттки со структурой Au/(n-Si)/Ni при температуре 300 К. Из графика видно, что структура обладает выраженными выпрямляющими свойствами, то есть ток существенно зависит от направления приложенного напряжения. Это свидетельствует о формировании барьера Шоттки на границе металл–полупроводник.

В области обратного смещения ($V < 0$) значение тока остается практически близким к нулю. Даже при напряжениях порядка -1000 мВ заметного тока утечки не наблюдается. В случае некачественно сформированного контакта обратный ток был бы значительно выше.

В области прямого смещения ($V > 0$) рост тока проявляется поэтапно. В интервале от 0 до примерно 0,3–0,4 В ток увеличивается медленно. На данном этапе электроны начинают преодолевать потенциальный барьер на границе металл–полупроводник.

На основании графика можно сделать общий вывод, что диод Au/(n-Si)/Ni обладает хорошим коэффициентом выпрямления, характеризуется низким обратным током утечки и демонстрирует отчетливый экспоненциальный рост тока в области прямого смещения.

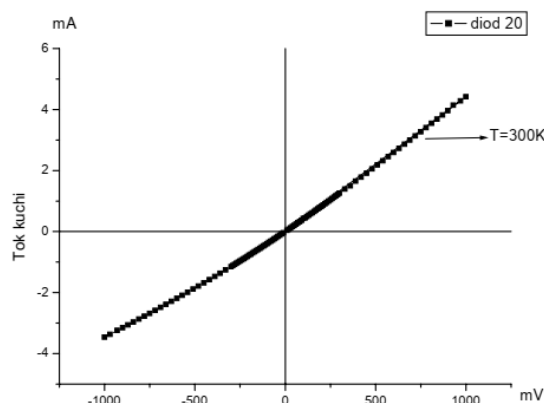


Рис. 2. Вольт–амперная характеристика структуры Au/(n-Si)/Ni на основе кремния, легированного лютецием (Lu)

На данном рисунке представлена вольт–амперная характеристика структуры Au/(n-Si)/Ni на основе кремния, легированного лютецием (Lu), измеренная при температуре 300 К. Из графика видно, что на интерфейсе между металлом и кремнием, легированным Lu, барьер Шоттки не сформировался.

Это явление прежде всего объясняется тем, что атомы лютеция (Lu) в кремнии проявляют акцепторные свойства. В результате исходный n-тип полупроводника частично компенсируется и приближается к р-типу, вследствие чего не формируется потенциальный барьер, необходимый для ограничения потока электронов между металлом и полупроводником. По этой причине контакт функционирует как обычный металлический, то есть приобретает омический характер.

Как видно из рисунка, электроны свободно перемещаются между металлическим покрытием и поверхностным слоем. Это связано со вторым фактором: легирование Lu повышает проводимость приповерхностного слоя, поэтому барьер Шоттки не образуется. При высокой концентрации примеси или при её накоплении вблизи поверхности контакт становится омическим.

В области отрицательных напряжений, примерно при -1000 мВ, ток достигает значений порядка $-3...-4$ мА. Это свидетельствует о том, что обратный ток имеет значительную величину, а потенциальный барьер на границе металл–полупроводник существенно снижен или отсутствует.

В области положительных напряжений ток возрастает примерно до $+4...+5$ мА, и график сохраняет практически линейный характер. Характерная для диода Шоттки экспоненциальная область роста тока в данном случае чётко не наблюдается. Если бы в структуре присутствовал традиционный барьер Шоттки, в диапазоне $0,2-0,4$ В наблюдалось бы резкое экспоненциальное увеличение тока. В рассматриваемом случае зависимость ток–напряжение демонстрирует свойства, близкие к омическому контакту.

Таким образом, структура Au/(n-Si)/Ni на основе кремния, легированного Lu, не проявляет классических характеристик диода Шоттки. Вольт–амперная характеристика имеет почти линейный вид, что указывает на переход контакта к омическому типу проводимости.

Литература:

1. Tung, R. T., “The Physics and Chemistry of the Schottky Barrier Height,” *Applied Physics Reviews*, 1(1), 2014, pp. 011304.

2. Daliev Kh. S., Hamdamov J.J, Bahronqulov Z. E. Lyutesiy bilan legirlangan kremniyning elektrofizik xususiyatlarini o'rganish. Fizika fanining rivojida iste'dodli yozlarning o'rni (RIAK-XVI-2023) 2023-yil28-29-aprel, 128-131b.
3. Schroder, D. K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, Wiley, 2015.
4. Daliev Kh.S., Bahronkulov Z.E, Khamdamov J.J, East Eur. J. Phys. 4, 167 (2023), (№2 Scopus)
5. Mönch, W., *Semiconductor Surfaces and Interfaces*, 4th Edition, Springer, 2013.
6. Daliev Kh.S., Utamuradova Sh.B., Khamdamov J.J., Bahronkulov Z.E. Electrophysical properties of silicon doped with lutetium. *Advanced Physical Research*. 2024. 6(1), pp. 42-49, (№3; Scopus).
7. Wolf, S., Tauber, R. N., *Silicon Processing for the VLSI Era*, Volume 1, 2nd Edition, Lattice Press, 2000.
8. Daliev Kh.S., Utamuradova Sh.B., J.J. Khamdamov, Bahronkulov Z.E, East Eur. J. Phys. 2, 304 (2024) (№4 Scopus)
9. Sze, S. M., "Schottky Barrier Diodes: Physics and Applications," *Solid-State Electronics*, 19(1), 1976.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРИМЕСНЫХ СКОПЛЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ n-Si<Ni>

Н.А. Тургунов^{1,2}, Р.М. Турманова¹, Н.Б. Хайтимметов¹

¹*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и
микроэлектроники при НУУЗ, Ташкент*

²*Академия МВД Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан*

Изучение природы, морфологии (химического состава, размеров) примесных скоплений, образующихся на поверхности или в объеме полупроводникового материала, имеет большое значение при разработке технологии получения полупроводниковых материалов с уникальными свойствами[1-3].

В качестве исходного образца для экспериментов использовали монокристаллический кремний марки КЭФ, выращенный по методу Чохральского, с удельным сопротивлением, $\rho=0,3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Диффузию элементов никеля в кремний проводили при температуре $T=1473 \text{ К}$ в печи СУОЛ-4М. Продолжительность диффузии составляло 5 часов. Температуру диффузии контролировали с помощью платино-платиновой термопары. После диффузионного отжига образцы охлаждали методом быстрого ($v_{\text{охл}}=200 \text{ К/с}$) и медленного ($v_{\text{охл}}=1 \text{ К/с}$) охлаждения. С помощью сканирующего электронного микроскопа марки JSM-IT200 изучались структурное строение, химический состав примесных скоплений атомов в образцах n-Si<Ni>.

Результаты исследований процессов формирования примесных скоплений никеля в кремнии при определенных термодинамических условиях диффузионного легирования показали, что морфологические параметры примесных скоплений никеля, в основном, зависят от значения температуры и времени диффузии, а также от скорости охлаждения образцов после диффузионного отжига.

Как показали результаты экспериментальных исследований, в зависимости от скорости охлаждения после диффузионного отжига, в объеме образцов Si<Ni> наблюдаются примесные скопления различных форм и размеров (рис.1.).

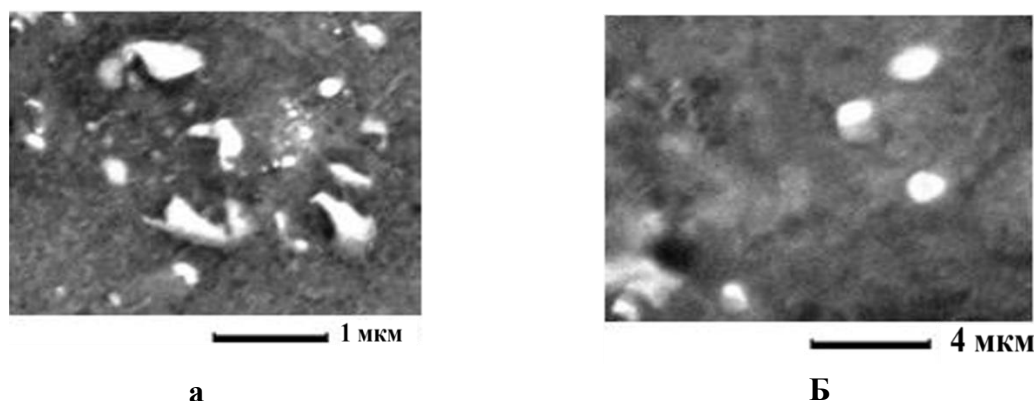


Рис.1. Примесные скопления никеля в кремнии, в образцах: а– с быстрым охлаждением ($v_{\text{охл}}=200$ К/с); б– с медленным охлаждением ($v_{\text{охл}}=1$ К/с).

При больших значениях скорости охлаждения ($v_{\text{охл}}=200$ К/с), в основном, образуются скопления с относительно мелкими размерами ($d < 10^{-6}$ м), которые имеют иглообразную, дискообразную, линзообразную и сферическую форму (рис.1 (а)). В объеме образцов с медленным охлаждением ($v_{\text{охл}}=1$ К/с) наблюдаются примесные скопления с размерами до нескольких микрометров, основная часть которых имеет сферическую форму (рис.1 (б)).

На рис. 2. представлены результаты анализа химического состава линзообразного примесного скопления размером ~ 700 нм, образовавшегося в объеме быстро охлажденного образца $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$ после диффузии. Как видно, процентное содержание атомов Ni в объеме скопления составляет 23,23%, атомы Si - 75,42%, атомы Fe - 0,26%, атомы Cr - 0,31%, атомы кислорода - 0,43%, атомы углерода - 0,35%. Как оказалось, по всему объему данного скопления эти примеси распределены почти равномерно.

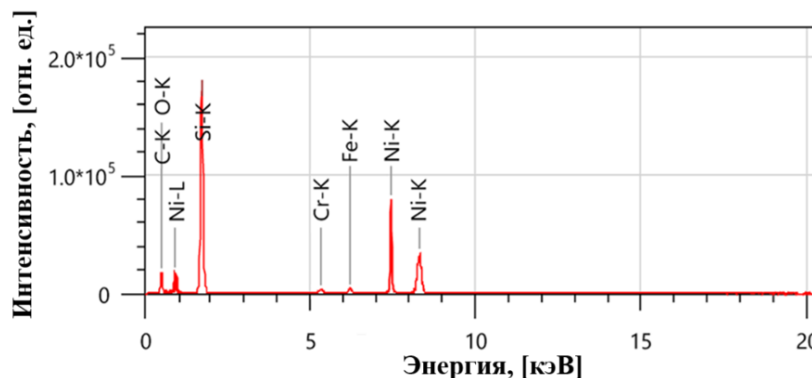


Рис.2. Полный спектр элементного состава линзообразного примесного скопления размером ~ 700 нм в быстро охлажденном образце $n\text{-Si}\langle\text{Ni}\rangle$.

Результаты анализов химического состава, проведенных на медленно охлажденных образцах $\text{Si}\langle\text{Ni}\rangle$, позволили определить количественные параметры сферического примесного скопления, размер которого достигает ~ 2 мкм. Как оказалось, в его объеме, ряду с атомами Si и Ni, присутствуют также атомы технологических примесей, таких как железо, хром, кислород и углерод (рис. 3).

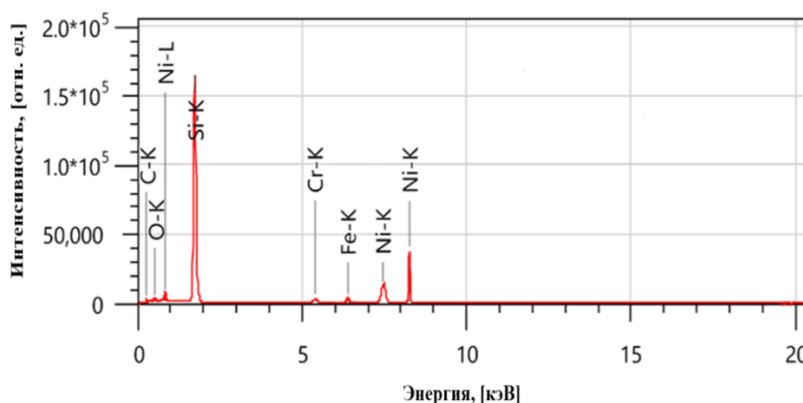


Рис.3. Полный спектр элементного состава сферических примесных скоплений размером ~2 мкм в медленно охлажденном образце n-Si<Ni>.

Анализ химического состава этого скопления показал, что процентное содержание атомов Ni в его центральной области составляет 52,58%, атомы Si - 45,38%, атомы железа - 0,42%, атомы хрома - 0,31%, атомы кислорода - 0,73%, атомы углерода - 0,58%.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что режим охлаждения после диффузионного легирования оказывает значительное влияние на морфологию и распределение примесных атомов по объему скоплений. При высокой скорости охлаждения – около 200 К/с, в объеме кристаллической кремния преимущественно формируются относительно мелкие примесные скопления в нанометровом диапазоне. Также определено, что при медленном охлаждении со скоростью порядка **1 К/с** происходит значительное укрупнение примесных скоплений, в результате чего формируются примесные скопления размерами до нескольких микрометров.

Список использованных литератур:

1. P.Wang, J.Yuan, Z.Meng, J.Xiao. Applied Physics A, 2021,127 (11), 859.
2. N.A.Turgunov, E.Kh.Berkinov, R.M.Turmanova The effect of thermal annealing on the electrophysical properties of Samples n-Si<Ni,Cu> // East European Journal of Physics. 2023. No. 3. pp. 287-290.
3. Тургунов Н.А., Турманова Р.М., Хайтиметов Н.Б. Структурное строение примесных скоплений в кремнии, легированном Ni, Fe и Cu// Физика полупроводников и микроэлектроника. 2023. т.5, вып.3-4. с. 28-33.

Zn_xCd_{1-x}S/ITO BIRIKMASINING TASNIFI

S.A. Muzafarova¹, N.A. Axmedova¹, O.Sh. Norqulov²

¹*O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti,*

²*O‘zbekiston Milliy Universiteti, Fizika fakulteti, Toshkent shahri, Olmazor tumani, Universitet ko‘chasi, 4-uy*

e-mail: nilufaraxmedova564@gmail.com

Yarimo‘tkazgichli yupqa qatlamlar noyob elektr, optik, mexanik va termal xususiyatlarga ega bo‘lib, ular yordamida yangi ilg‘or texnologiyalar yaratilmoqda. Zn_xCd_{1-x}S shunday yupqa qatlamlardan biri bo‘lib, uni turli xil tagliklarda, turli sharoitlarda o‘stirilib, kerakli fotoelementlar olish mumkin. Zn_xCd_{1-x}S tuzulmasi ZnS va CdS ning turli xil nisbatda birikishidan hosil

bo'ladigan II–VI guruhiga mansub yarimo'tkazgich materialdir. Bu yerda x — ruxning mol ulushi bo'lib, $0 \leq x \leq 1$ oralig'ida o'zgaradi. Tarkibiy nisbati x ni o'zgartirib materialning fizik, elektron va optik xususiyatlarini keng diapazonda boshqarish mumkin. Shu sababli, $Zn_xCd_{1-x}S$ zamonaviy optoelektronika va fotonika sohalarida katta ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Bunda ZnS keng taqiqlangan sohaga ega yarimo'tkazgich, unda E_g taxminan 3,6 eV ni tashkil etadi, CdS esa nisbatan tor taqiqlangan sohaga ega bo'lib, uning E_g qiymati $\sim 2,4$ eV ga teng [1,2]. Ushbu ikki material asosida hosil bo'lgan $Zn_xCd_{1-x}S$ qattiq eritmasida energiya oralig'i x qiymatiga bog'liq holda uzluksiz ravishda o'zgaradi:

$$CdS: E_g = 2.42 \text{ eV}; ZnS: E_g = 3.6-3.7 \text{ eV}$$

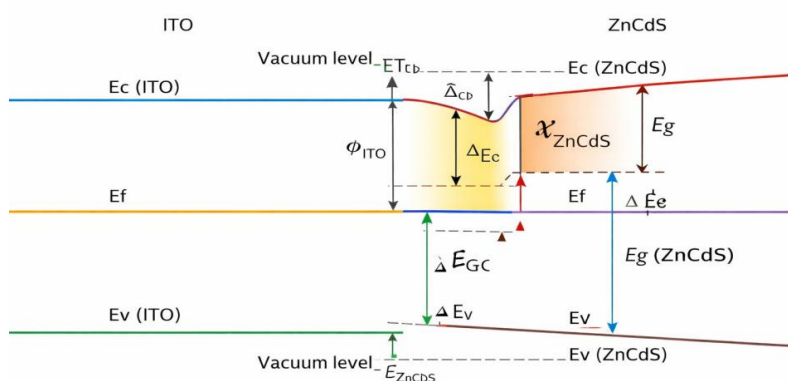
$$Zn_xCd_{1-x}S \text{ uchun: } E_g(x) = xE_{ZnS} + (1-x)E_{CdS} - b \cdot x(1-x)$$

bu yerda b — egilish parametri (odatda 0.3–0.6 eV).

Natijada ushbu materialning optik yutilish chegarasi ultrabinafsha sohasidan ko'rinadigan yorug'lik diapazonigacha sozlanishi mumkin. Bu xususiyat $Zn_xCd_{1-x}S$ ni spektral sezgir qurilmalar uchun istiqbolli materialga aylantiradi.

Yuqoridagilardan kelib chiqqan holda, biz molibden tagligida $Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlamini o'stirdik, uning fotoelektrik xususiyatlarini yaxshilash maqsadida ustiga ITO shaffof pardasini qopladik.

ITO qoplamasi In_2O_3 va SnO_2 komponentlaridan tashkil topgan maxsus yupqa qatlam bo'lib, elektr tokini va yorug'likni (ko'rinadigan yorug'likning 85-90 % ini) yaxshi o'tkazadi. Elektr o'tkazuvchanligi metallga yaqin, unda o'tkazuvchanlik sohasining joylashuvi elektronlarni oson harakatlanishi uchun qulaydir. Indiy qalay oksidining taqiqlangan soha oralig'i keng bo'lib, $\sim 3,5-4$ eV ga teng va taxminan 10 sm^{-3} zaryad tashuvchining maksimal konsentratsiyasiga ega. Elektronlarning chiqish ishi $\sim 4,5-5$ eV. ITO substratlarda yaxshi yotadi, ham qattiq, ham kimyoviy juhatdan inert hisoblanadi. Bu xususiyatlari tufayli u ko'p hollarda shaffof qatlam sifatida turli tagliklar, yupqa qatlamlar ustiga qoplanadi [3].



1-rasm. ITO va $Zn_xCd_{1-x}S$ ning energiya zonalari diagrammasi:

E_c - o'tkazuvchanlik zonasi, E_v - Valent zona, E_f -Fermi sathi, E_g - taqiqlangan soha kengligi, ϕ -chiqish ishi, ΔE_c - o'tkazuvchanlik zonasi siljishi, ΔE_v - valent zona siljishi

$Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlami yarimo'tkazgich qatlamlarni gaz tashish usulida o'stiruvchi qurilmada Molibden taglik ustida harorati 650°C taglik va 940°C manbaa sharoitida o'stirildi. Olingan tuzulmaga 10^{-3} Tor. bosim va 20 W quvvat ostida $t=40$ min. davomida ITO ($In_2O_3=95\%$, $SnO_2=5\%$) qoplamasi yotqizildi, qalinligi $d=200\text{nm}$.

ITO va $Zn_xCd_{1-x}S$ n-tipli o'tkazuvchanlikga ega bo'lib, ikkalasi tutashganda ularning energiya zonolari moslashadi, elektronlar yuqori konsentratsiyali ITO dan $Zn_xCd_{1-x}S$ tomon harakatlanadi. Fermi sathlari tenglashib, zonalar egiladi (1-rasm) va natijada Omik aloqa hosil bo'ladi. Tuzulma elektr manbaaga ulanganda, to'g'ri va teskari yo'nalishda tok yuzaga keladi.

Kelgusidagi ishlarimizda yuqoridagilardan kelib chiqqan holda, $Mo-Zn_xCd_{1-x}S/ITO$ birikmasining sirt morfologiyasi va elektrofizik xususiyatlari tadqiq qilinadi.

ADABIYOTLAR:

1. S. S. Srinivasan, J. Wade, and E. K. Stefanakos, "Visible light photocatalysis via CdS/ TiO₂ nanocomposite materials," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2006, Article ID 87326, 7 pages, 2006
2. A. Vazquez, D. B. Hernandez-Uresti, and S. Obregon, "Electrophoretic deposition of CdS coatings and their photocatalytic activities in the degradation of tetracycline antibiotic," *Applied Surface Science*, vol. 386, pp. 412–417, 2016
3. N. Al-Dahoudi, M.A. Aegerter, Comparative study of transparent conductive In₂O₃:Sn (ITO) coatings made using a sol and a nanoparticle suspension, *Thin Solid Films*, Volume 502, Issues 1–2, 28 April 2006, Pages 193-197.

ВЛИЯНИЕ СВЯЗАННЫХ ОБРАЗОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ПЕРЕХОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ СОСТОЯНИЙ АТОМОВ КИСЛОРОДА НА

Ш.Б. Утамурадова, Ж.Ж. Хамдамов, Г.С. Турсынбаева

*НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз им. М. Улугбека,
Узбекистан, 100057, Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20*

E-mail: gulayimtursinbaeva.1707@gmail.com

Кремний является одним из наиболее широко используемых материалов современной микроэлектроники и полупроводниковой техники. Электрофизические свойства кремния в значительной степени определяются наличием примесей и дефектов кристаллической решётки. Особый интерес представляют примеси переходных элементов, которые способны создавать глубокие энергетические уровни в запрещённой зоне кремния и существенно влиять на процессы генерации и рекомбинации носителей заряда.

К числу наиболее изученных переходных элементов относятся марганец (Mn), кобальт (Co) и хром (Cr). Эти элементы обладают сложной электронной конфигурацией и могут формировать в кремнии различные дефектные центры. В отличие от обычных донорных и акцепторных примесей, переходные элементы создают глубокие уровни в запрещённой зоне полупроводника, которые играют важную роль в формировании дефектной структуры материала [1-3].

В настоящем обзоре рассматривается роль состояния технологических примесей в формировании дефектной структуры кремния, легированного переходными элементами. Особое внимание уделяется взаимодействию Т-ионов (в частности, примесей Mn, Co и Cr) со связанными состояниями атомов кислорода в кристаллической решётке кремния. Анализ выполнен на основе результатов, полученных методами спектроскопии глубоких уровней (DLTS) и инфракрасной спектроскопии (ИК) [1].

В кремнии, выращенном методом Чохральского, присутствует значительное количество кислорода, который является одной из основных технологических примесей. При высокотемпературных обработках кислород может образовывать различные связанные состояния в кристаллической решётке кремния. В частности, возможно образование частиц второй фазы, таких как SiO_2 и SiO_4 . Эти структуры оказывают существенное влияние на процессы дефектообразования и взаимодействие переходных элементов с кремнием [1].

В экспериментальной части статьи использовались образцы кремния, в которые проводилась диффузия переходных элементов — Mn, Co и Cr — в интервале температур 900–1200 °C в течение 2 часов. Для анализа изменений применялись инфракрасная спектроскопия (ИК), DLTS-спектроскопия, Рамановская спектроскопия, измерение удельного сопротивления, а также рентгеноструктурный анализ. Такой комплекс методов позволил оценить как изменение состояния кислорода, так и влияние переходных элементов на спектр глубоких уровней и фазовый состав дефектных образований [1].

Основной результат статьи состоит в том, что введение переходных элементов в кремний приводит к уменьшению концентрации оптически активного кислорода примерно на 10–30%, что указывает на прямое взаимодействие Т-ионов с атомами кислорода. Однако ещё более сильный эффект даёт предварительная высокотемпературная обработка: после отжига при 1100 °C концентрация оптически активного кислорода уменьшается уже на 45–50% вследствие осаждения кислорода и образования частиц SiO_2 [1]. Это означает, что переходные элементы не просто создают собственные глубокие центры, но и активно включаются в процессы перераспределения технологических примесей внутри кристалла.

Переходные элементы влияют на кремний не только за счёт образования глубоких уровней в запрещённой зоне, но и через изменение общей дефектной структуры кристалла. Установлено, что при наличии кислорода в объёме кремния в виде частиц SiO_2 возрастает эффективность формирования глубоких центров, связанных с атомами Mn, Co и Cr. Если же SiO_2 присутствует в виде поверхностной плёнки, её наличие, напротив, затрудняет диффузию переходных элементов в объём образца. Таким образом, влияние одного и того же переходного элемента на свойства кремния определяется не только его природой, но и фазовым состоянием кислорода, а также условиями предварительной термической обработки.

На основе рассмотренной статьи можно сделать вывод, что роль переходных элементов в кремнии носит сложный и многогранный характер. Прежде всего, они формируют глубокие уровни в запрещённой зоне полупроводника. Кроме того, переходные элементы активно взаимодействуют с кислородом и другими технологическими примесями. Их поведение в кристаллической решётке определяется межузельным положением, зарядовым состоянием и условиями термической обработки. Также они способны инициировать образование кластеров и вторичных фаз. В совокупности это позволяет рассматривать переходные элементы как важный фактор управления дефектной структурой кремния и одновременно как источник сложных процессов, которые необходимо учитывать при создании полупроводниковых материалов с заданными свойствами.

Литература:

1. Utamuradova Sh.B., Naurzalieva E.M. Study of the role of the technological impurities states in the formation of a defective structure of Si doped with transition elements. – 2019. 2019, Volume 1, Issue 6
2. Milnes A.G. deep Impurities in semiconductors. Wiley, 1973, 526 p.
3. Ravi K.V. Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon. Wiley, 1981, 379 p.
4. Omelyanovskiy E.M., Fistul V.I. Primesi perehodnyh metallov v poluprovodnikah [Transition metal impurities in semiconductors]. Moscow, 1983, 192 p. (In Russ.)
5. Utamuradova Sh.B. Vzaimodeistvie primesei T-ionov s assotsiirovannymi sostoyaniyami rostovykh primesei v kremnii [Interaction of T-ion impurities with associated states of growth impurities in silicon]. Proceedings of the Inter. Conf. AMS-7, St. Petersburg, Russia, 2010, p. 142. (In Russ.)
6. Tatokhin E.A., Kadantsev A.V., Bormontov A.E., Zadorozhnyi V.G. Statisticheskii metod relaksatsionnoi spektroskopii glubokikh urovnei v poluprovodnikakh [A statistical method for relaxation spectroscopy of deep levels in semiconductors]. Semiconductors, 2010, v. 44, n. 8, pp. 1031-1037. (In Russ.)

ФОРМИРОВАНИЕ ПРИМЕСНЫХ СКОПЛЕНИЙ Ni и Fe В Si

Н.А. Тургунов^{1,2}, Н.Б. Хайтимметов¹

*¹НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете
Узбекистана, Ташкент, Узбекистан*

²Академия МВД Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

Как известно целенаправленное управление электрофизическими свойствами полупроводниковых материалов путём легирования их различными примесями широко используется в микроэлектронной промышленности. Введение донорных и акцепторных примесных в объем полупроводникового материала атомов позволяет целенаправленно изменять концентрацию и тип носителей заряда, удельное сопротивление, положение уровня Ферми и другие важнейшие параметры материала. Кроме этого, объемные скопления примесных атомов, возникающие при введении атомов примеси в полупроводниковый материал, также существенным образом определяют электрофизические свойства материала [1,2]. Природа формирования примесных дефектов при диффузионном легировании полупроводников определяется природой кристаллической решётки, механизмом диффузии и взаимодействием примеси с собственными дефектами кристалла.

Полученные экспериментальные результаты анализа начальных стадий формирования микро- и наноскоплений примесных атомов никеля в кремнии в процессе диффузионного легирования при высоких температурах ($T > 1273$ К) и процессов их роста показали, что наличие сильного притока атомов примеси Ni и Fe в реакционную зону вокруг вакансионных пор, дислокаций и микротрещин, образующихся в кристаллической структуре Si [3], приводит к образованию силицидов никеля и железа как самостоятельной фазы. По мере продолжения диффузионного процесса приток атомов примесей Ni и Fe в эту зону продолжается, и, благодаря нестабильности этих фаз, наблюдается образование относительно стабильного слоя во внутренней области. Следует отметить, что основным

фактором, влияющим на такое образование примесных скоплений, является скорость охлаждения образцов после диффузии. Чем выше его значение ($v_{\text{охл}} \geq 200$ К/с), тем меньше размер образующихся примесных скоплений, которые, в основном, имеют однослойную структуру, т.е. состоят из силицидов никеля и железа. Размеры таких скоплений примесных атомов может достигать до нескольких сотен нанометров. Поэтому их принято называть примесными наноскоплениями.

Результаты экспериментов показали, что независимо от типа образцов Si<Ni,Fe>, количественная доля атомов никеля и железа в центральной части микроскоплений, образующихся в их объеме не превышает ~35% и зависит от размера и формы микроскопления. В объеме многослойных скоплений количества примесных атомов зависит от их слоев, и имеет различные значения.

На рис. 1 показана схематическая модель последовательности образования линзообразных наноскоплений в быстро охлажденных ($v_{\text{охл}} \geq 200$ К/с) образцах.

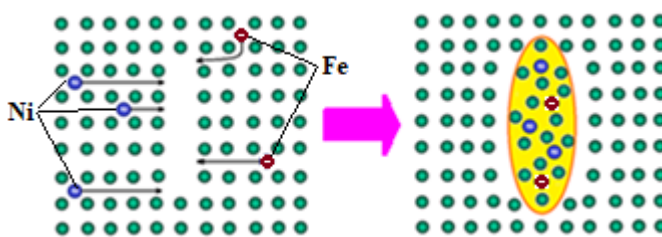


Рис. 1. Схематическая модель образования линзообразных примесных наноскоплений в образцах Si<Ni,Fe>.

Изменение геометрической формы и размера при образовании примесных микро- и наноскоплений, формирующихся в объеме монокристалла кремния, приводит к возникновению разности давлений на границе монокристалла Si и примесного скопления, которая наблюдается на границе примесного скопления и базового кристалла Si.

Таким образом на основе полученных результатов выявлено, что основным фактором, влияющим на размеры и формы примесных скоплений никеля и железа в кремнии, является скорость охлаждения образцов после диффузии. Чем выше его значение ($v_{\text{охл}} \geq 200$ К/с), тем меньше размер образующихся примесных скоплений.

Литература:

1. Turgunov N.A, Berkinov E. Kh., Turmanova R.M. Influence of heat treatment on the electrical properties and morphology of impurity accumulations of silicon doped with nickel // Science and world. 2022. Том 2, №4(104), с. 25-29.
2. Turgunov N., Zainabidinov S., Berkinov E., Akbarov, Sh. Influence of the clusters of impurient nickel atoms on the crystalline silicon structure // Euroasian Journal of Semiconductors science and engineering. 2020, Vol.2, №5. pp. 19-21.
3. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле // М. Энергоатомиздат. 1990. с. 260.

Sh.B. Utamuradova¹, Sh.Kh. Daliev¹, Sh.A. Ismoilov¹, Sh. Abdullayeva²

¹*O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston.*

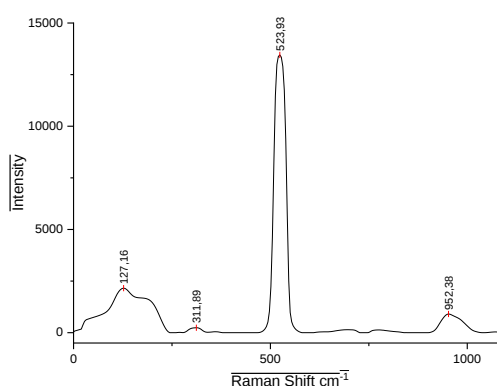
²*O'zbekiston Milliy universiteti fizika fakultetuti, Toshkent, O'zbekiston*

So'nggi yillarda yarimo'tkazgich va optoelektronikaning asosiy materiali bo'lgan kremniy (Si) xususiyatlarini modifikatsiya qilish va uning qo'llanish sohasini kengaytirish uchun turli elementlar bilan legirlab, ularning optik va elektrofizik xususiyatlarini o'rganish bo'yicha ko'plab tadqiqot ishlari olib borilmoqda. Ushbu elementlar orasida Sirkoniy kirishmasi muhim ahamiyatga ega [1-4].

Bunday kirishmalar kremniyning elektro'tkazuvchanligi, mexanik mustahkamligi va boshqa muhim xususiyatlarini o'zgartirish imkonini beradi. Yuqori temperaturda Sirkoniy (Zr) atomlari bilan legirlangan monokristall kremniyning nuqsonli tarkibiga ta'sirini Raman spektroskopiya yordamida o'rganish natijalari keltirilgan. Tadqiqot uchun Choxralskiy usulida o'stirilgan va solishtirma qarshiligi 35 Om·sm bo'lgan n-tipli monokristall kremniydan foydalanildi.

Sirkoniy atomlari bilan legirlash jarayoni 1200°C temperaturda 12 soat davomida vakuumlangan kvarts ampulalarda diffuziya usuli bilan amalga oshirildi hamda diffuziyadan so'ng namunalar tez sovitildi.

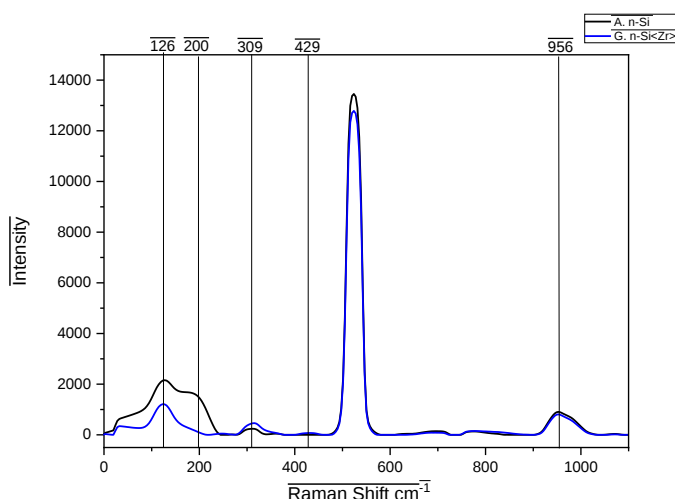
Sirkoniy bilan legirlangan kremniy namunalarining Raman spektrlari o'lchab, kirishma va termik ishlovning kristall strukturasi ta'siri aniqlandi. Dastlabki kirishmasiz (etalon) namunaning Raman spektrlarining tahlili 1-rasmda keltirilgan va unda quydagi cho'qqilar aniqlandi. 127,16 cm⁻¹, 180,07 cm⁻¹, 311,89 cm⁻¹, 523,93 cm⁻¹, 952,38 cm⁻¹. Bu cho'qqilar monokristall kremniydagi akustik TA, LA va optik TO, LO piklar hamda molekulyar bog'lanishlarni beradi. Asosan 127,16 cm⁻¹, 180,07 cm⁻¹ cho'qqi TA akustik sohani beradi, bu sohada nuqsonlar amorf xususiyatni ko'rsatadi. 311,89 cm⁻¹ da 2LA akustik soha deyiladi bu joyda ham Si-P₂ bilan kuchsiz bo'g'lanish hosil bo'ladi va bu amorf sohaga tegishli [2-3].



1-Rasm. KEF-35 Om·cm. Dastlabki kirishmasiz (etalon) namuna.

523,93 cm⁻¹ dagi cho'qqi Si-Si kimyoviy bog'lanishni beradi, bu optik soha deyiladi. 952 cm⁻¹ cho'qqi hosil bo'lishi optik soha deyiladi 2TO sohaga mos keladi.

n-Si ga Sirkoniy atomlarini 1200°C da 12 soat davomida diffuziya qilindi va Sirkoniy bilan legirlangan namunalari ham Raman spektrometrida o'lchandi.



**2-Rasm. KEF-35 Om·cm. Dastlabki kirishmasiz (etalon) namuna, 2. n-Si<Zr>
T=1473 K, t=12 soat, tez sovutilgan.**

Sirkoniy (Zr) bilan legirlangan namunalardagi o'zgarishlarni 2-rasmda kuzatish mumkin. Bunda akustik, amorf, optik sohalarda ko'rish mumkin. Grafikda 0-200 cm^{-1} oraliqda amorf soha kamayib bormoqda bu Zr atomlari kristall panjarada nuqsonlarni tartiblanishiga hissa qo'shgan hamda 180 cm^{-1} dagi pik yo'qolganligini ko'rish mumkin. Sirkoniy atomlari kremniy atomlari o'lchamidan katta bo'lganligi namunani hosil qiladigan kristal panjarada egilish markazlarini hosil qilmoqda [3].

Zr atom diffuziyaning natijasida namunaga ichkarishiga kirib borib kristal panjalarini ma'lum darajada deformatsilamoqda buni natijasini 309 cm^{-1} da Si-P₂ molekulyar bog'lanishdagi pik markazi 311 cm^{-1} siljishi orqali tushuntirish mumkin. 2-grafikda hosil bo'lgan ko'pgina piklarda bunday holat kuzatilgan. Undan tashqari 429 cm^{-1} da yangi pik payda bo'lmoqda bu albatta Zr atomlariga tegishli deyish mumkin [1].

Optik sohaga tegishli bo'lgan 523 cm^{-1} cho'qqimizda ham intensivlik pasayganligini ko'rish mumkin. Zr atomlari hisobiga kremniy kristal panjarasida tugunlar markazida joylashib, nuqsonlarni qisman ortishiga hissa qo'shmoqda degan xulosa qilish mumkin [3].

ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Utamuradova, S., Daliev, S., & Ismoilov, S. (2025). Influence of Cooling Rate on Structural and Electrophysical Changes in Zirconium-Doped Silicon (Si + Zr). *International Journal of Independent Research Studies*, 14(5), 27–32.
2. Kumar, R., & Tanwar, M. (2021). Effect of some physical perturbations and their interplay on Raman spectral line shapes in silicon: A brief review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(12), 2100-2118.
3. Sh.B. Utamuradova, Sh.Kh. Daliev, J.J. Khamdamov, Y.Z. Mardiyev/ Raman spectroscopic analysis of tungsten silicide (WSi₂) phase formation and lattice stress in p-type silicon./ Research focus | Volume 4 | ISSUE 11 | 2025 ISSN: 2181-3833 ResearchBip (15.22) | Google Scholar | Index Copernicus (ICV 80.58).

**Sh.B. Utamuradova, J.J. Hamdamov, Y.Z. Mardiyev, M.O. Rahmonova,
O.H. Ollayarova**

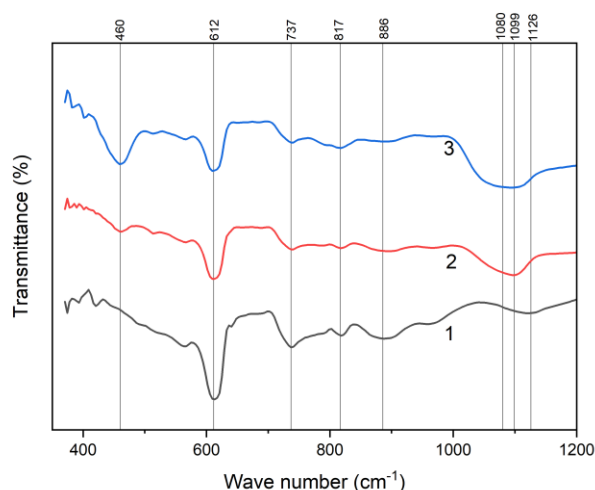
*O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va
mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O‘zbekiston*

E-mail: yolqinmardiyev96@gmail.com

Kremniyni termik oksidlash yarimo‘tkazgich asboblari ishlab chiqarish texnologiyasida asosiy jarayonlardan biridir. Si/SiO₂ chegara sirtining sifati va oksid qatlaminig tuzilishi MDYa (metall-dielektrik-yarimo‘tkazgich) strukturalarining elektrofizik xarakteristikalarini belgilaydi [1]. Infraqizil Fyrye-spektroskopiyasi Si-O-Si bog‘larining tebranish modalarini tadqiq etish va oksid plyonkalaridagi lokal nuqsonlarni aniqlash uchun keng qo‘llaniladi [2, 3]. Quruq kislorodda va suv bug‘ida o‘stirilgan oksidlarning xususiyatlarini solishtirish, vodorod va gidroksil guruhlar mavjudligi oksidning va uning kremniy bilan chegarasining tuzilishiga jiddiy ta’sir ko‘rsatadi [3, 4].

Tajribani bajarish uchun n-tipli monokristallik kremniydan foydalanildi. Namunalarni tayorlashda kremniy slidkalar tayorlandi, namunalarga birinchi bo‘lib mexanik ishlov berilib hamma tomonida 30 mkr olib tashlandi, bunda M-28 makkali kukundan M-8 gacha o‘lchamda bo‘lgan kremniy karbit kukunidan jilvirlash orqali amalga oshirildi. Mexanik ishlov berilgan namunalrimiz bir xil 1700 mkr o‘lchamda bo‘lishi taminlandi hamda ular kimyoviy tozalash bosqichidan o‘tkazildi.

n-Si sirtida oksid qatlam o‘stirishda ikki usuldan foydalanildi va ular orasidagi farqlar tahlil qilindi. Birinchi usulda n-Si namunamiz quruq kislorad muhitida, ikkinchi usulda suv bug‘i muhitida oksid qatlam o‘stirish amalga oshirildi. Ikkala tajriba ham bir xil sharoitda 1100 °C da 1 soat davomida amalga oshirildi.



1-Rasm. 1-dastlabki namuna; 2-quruq kislorod muhitida oksid qatlam o‘stirilgan namuna; 3-suv bug‘i orqali oksid qatlam o‘stirilgan namuna.

Barcha namunalarning IQ spektrlarida Si-O-Si bog‘larining turli tebranish modalariga mos keluvchi xarakteristik yutilish polosalari kuzatiladi. Dastlabki namunada Si-O-Si bog‘lar 1125 cm⁻¹ asimmetrik tebranishlariga mos keluvchi intensiv yutilish polosasini kuzatish. Quruq kislorod muhitida oksid qatlam hosil qilingan namunada Si-O-Si bog‘ning pik markazi 1098 cm⁻¹ ga siljidi hamda suv bug‘ida oksid qatlam hosil qilingan namunada esa 1080 cm⁻¹ siljiganligini 1-rasmda

mumkin. Bunda siljishlarga mos ravishda optik faol kislorod konsentratsiyasida ham o'zgarishlar kuzatildi, dastlabki namunada kislorod konsentratsiyasi $8,5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, quruq kislorod muhitida osidlagan namunamida kislorod konsentratsiyasi $2,5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, suv bug'ida oksid qatlam hosil qilingan namunada esa kislorod konsentratsiyasi $9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ tashkil qildi. Olingan natijalarda optik faol kislorod konsentratsiyasini ortishi va pik markazlarining siljishi namuna sirtida oksid qatlamni zichlashib borishi va plyonka qalinligini ortishini 5-20 nm gacha ko'rsatadi [5].

IQ spektri natijalarida quruq muhit va suv bug'i orqali oksid o'stirgan mamunalrimizda qo'shimcha yangi piklarni 460 cm^{-1} hosil bo'lganligini ko'rsatmoqda. Bu $450\text{--}470 \text{ cm}^{-1}$ sohada Si-O-Si bog'ining mayatniksimon tebranishi kuzatiladi. 612 cm^{-1} dagi cho'qqilar uglerod Si-C bog'larini ko'rsatmoqda. Bundan tshqari barcha namunalarda 737 cm^{-1} pik markazi kuzatilgan bu O-C bog'lari sifatida, $817\text{--}886 \text{ cm}^{-1}$ piklar esa Si-O sifatida adabiyotlarda ko'rish mumkin [6]

O'tkazilgan IQ tadqiqotlari n-tipli kremniyni termik oksidlash sharoitlari hosil bo'luvchi oksid plyonkalari tuzilishiga jiddiy ta'sir ko'rsatishini ko'rsatdi. Suv bug'ida oksidlash quruq kislorodda oksidlashga nisbatan ($2,4 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) yuqoriroq optik faol markazlar konsentratsiyasiga ($9 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$) ega oksid hosil bo'lishiga olib keladi. Bu Si-O-Si-H tipidagi gidroksillangan komplekslar hosil bo'lishi va tuzilishning yuqori defektliligi bilan bog'liq. Olingan natijalar mikroelektronika asboblari dielektrik qatlamlarni shakllantirishning texnologik rejimlarini optimallashtirish uchun ishlatilishi mumkin.

Adabiyotlar:

1. Ковальчук Н.С., Пилипенко В.А., Соловьёв Я.А. Влияние импульсной фотонной обработки в среде азота на оптические и электрофизические характеристики слоёв двуокиси кремния и её границы с кремнием // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 3. С. 5-11.
2. Kalem S., Tekin S.B., Kaya Z.E. et al. Si measurements: SiO₂ on Si // Joint International EUROSIOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon-ULIS. IEEE, 2017. P. 235-238.
3. Salonen J., Lehto V.P., Laine E. The room-temperature oxidation of porous silicon // Applied Surface Science. 1997. Vol. 120, No. 3-4. P. 191-198.
4. Goda K., Tanaka R., Honda Y. et al. Identification of the luminescence center of porous silicon under low temperature thermal oxidation // MRS Online Proceedings Library. Cambridge University Press, 2001.
5. Ogawa H., Hattori T. Chemical Structures of Native Oxides Formed during Wet Chemical Treatments of Silicon Surfaces // IEICE Transactions on Electronics. 1992. Vol. E75-C, No. 7. P. 774-780.
6. Mauckner G., Walter T., Baier T. et al. PL and FTIR Absorption Study on Porous Silicon in Situ During Etching, in Oxygen Ambient, and After Chemical Oxidation // MRS Online Proceedings Library. Cambridge University Press, 1993.

S.A. Muzafarova¹, N.A. Axmedova¹, O.Sh. Norqulov²

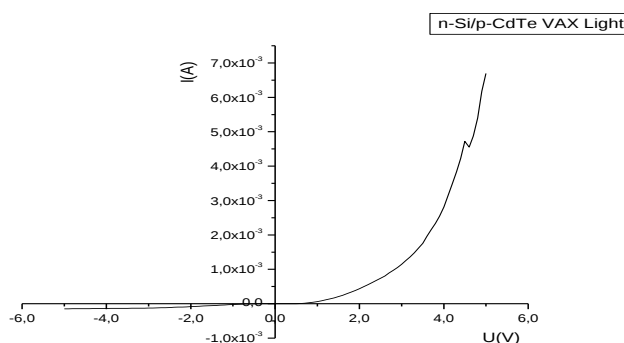
¹*Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi*

Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti

²*Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti Fizika fakulteti 100174*

Toshkent shahar Olmazor tumani, Universitet ko'chasi 4-uy.

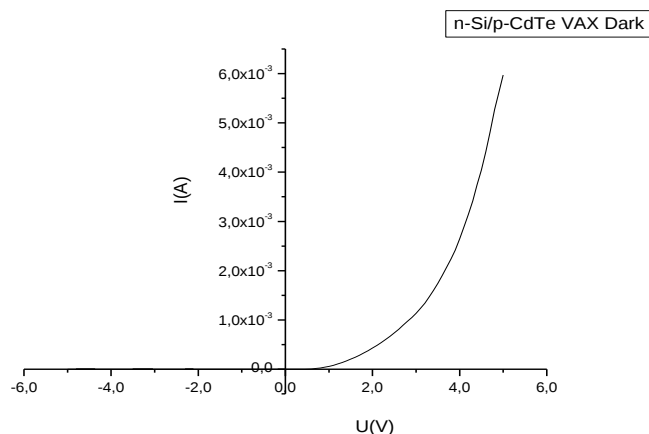
CdTe uchun taqiqlangan soha kengligi xona temperaturasida $E=1.45$ eV. Erish temperaturasi Cd uchun $T=321^{\circ}\text{C}$, Te uchun $T=450^{\circ}\text{C}$ va CdTe uchun $T=1092^{\circ}\text{C}$ ni tashkil qiladi. Kremniyning taqiqlangan soha kengligi $E_g=1.12$ eV va erish temperaturasi esa $T=1414^{\circ}\text{C}$ ni tashkil qiladi. So'nggi yillarda Si va yupqa CdTe o'rtasidagi geterostrukturani yaratish bo'yicha tadqiqot ishlari amalga oshirilmoqda, chunki bu materiallarga asoslangan geterostrukturalar quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish uchun va namlikni qayd etuvchi detektorlarda yuqori effektivlikga ega bo'lgan qurilmalar ishlab chiqarish mumkin [1]. Shu bilan birga, yuqori sifatli Si- CdTe birikmalarni ishlab chiqarish qiyin, chunki Si va CdTe ning panjara parametrlari 10-15% ga farq qiladi, bu Si/CdTe yuzasida sirt nuqsonlarining yuqori zichligi shakllanishiga olib keladi [2]. n-Si/p-CdTe geterostrukturasi bufer vazifasini bajaradigan oraliq o'tish qatlamini shakllantirish orqali sirt nuqsonlarining past zichligi bilan yuqori sifatli Si – CdTe birikmalarni ishlab chiqarish mumkinligini ko'rsatdi. Ushbu ishning maqsadi Si tagliklarida kompozitsion darajali CdTe yupqa qatlamlarni o'stirish, qatlamlarning tarkibini ularning qalinligi funksiyasi sifatida aniqlash [2]. Ma'lumki, turli xil tagliklarda yupqa CdTe yupqa qatlamlari turli xil texnikalar bilan o'stirilishi mumkin. Yarimo'tkazgichli yupqa qatlamlarni kimyoviy usuli bilan o'stiruvchi qurilma asosida Si va yupqa CdTe geterostruktura o'stirildi. Vodorod oqimida gazni tashish usuli bilan o'stirish jarayonida vodorod oqimi tezligiga, substrat harorati T_p va bug'lanish moslamasining harorati T_l ga qarab CdTe plyonkalarining tuzilishi, morfologiyasi va tarkibini o'rganadi. "Yarimo'tkazgichli yupqa qatlamli kimyoviy molekulyar dasta usuli bilan o'stiruvchi qurilmasi" yordamida teksturali Si ning ustiga yupqa qatlamli CdTe o'stirtildi. Bunda n-Si tipli va p-CdTe tipli qilib tanlandi. CdTe namunasi - $m=150$ mg; Manba harorati $T_l=\sim 750-800^{\circ}\text{C}$; T_l =Substrat harorati $T_p= 350-400^{\circ}\text{C}$; Vodorod oqimi tezligi 1 L/soat; [2]. Yupqa n qatlamning atom tarkibi $m_{\text{Te}}/m_{\text{Cd}} = 49,65/50,35$; O'sish tezligi, $\sim 350-400^{\circ}\text{C}$ da, $P_{\text{CdTe}} = 300 \mu\text{m/h}$; CdTe qalinligi $= 20 \div 50 \mu\text{m}$; O'sish vaqti 30 min [2].



**1-rasm. n-Si va p-CdTe getrostrukturaning yorug'likda olingan volt –amper
xarakteristikasi.**

Al n-Si/p-CdTe ni strukturada orqa kontakt sifatida Al n-Si ustiga va oldi kontakt sifatida esa Ni p-CdTe qilingan. n-Si/p-CdTe geterotuzilmasining yorug'lik ostidagi volt-amper

xarakteristikasi tadqiq qilindi. O'lchash natijalari strukturaning diod xatti-harakatini namoyon qilishini ko'rsatdi. To'g'ri yo'nalishda tokning eksponensial ortishi geterop-n o'tish hosil bo'lganini tasdiqlaydi. Teskari yo'nalishda tokning kichik qiymatlari o'tishning yuqori sifatini bildiradi. Yorug'lik ostida olingan I–V xarakteristika fotovoltaik effekt mavjudligini ko'rsatadi. Grafikdan ochiq zanjir kuchlanishi $U = 0.1 - 0.2$ V deb baholandi. Qisqa tutashuv toki kichik bo'lib, bu interfeys rekombinatsiyasi va kontakt yo'qotishlari bilan tushuntiriladi.



2-rasm. n-Si/p-CdTe getrostrukturaning qorong'ulikda olingan VAX xarakteristikasi.

To'g'ri yo'nalishda tokning (mA) tartibida o'sishi strukturaning, past ketma-ket qarshilikka ega ekanini ko'rsatadi. Olingan natijalar n-Si/p-CdTe geterotuzilmasi asosida fotovoltaik qurilmalar yaratish mumkinligini ko'rsatadi. Fotovoltaik parametrlarni yaxshilash uchun kremniy yuzasini teksturalash va interfeys sifatini oshirish muhim ahamiyatga ega. Shottki yoki p-n o'tish mavjud bo'ladi [3]. Strukturada elektron o'tish uchun bar'yer mavjud. Diodga xos eksponensial o'sish kuzatiladi. Struktura bir tomonlama o'tkazuvchi xususiyatga ega. Kuchlanish oshgan sari tashuvchi injeksiyasi kuchayadi.

n-Si/p-CdTe geterotuzilmasining qorong'idagi volt-amper xarakteristikasi o'rganildi. O'lchash natijalari strukturaning aniq diod xarakteristikasini namoyon qilishini ko'rsatdi. To'g'ri yo'nalishda tokning eksponensial ortishi geterop o'tish hosil bo'lganini ko'rsatadi. $U=2-4$ V oralig'ida tokning eksponensial o'sishi diffuzion mexanizm ustunligini bildiradi. Teskari yo'nalishda tokning juda kichik qiymatlari o'tishning yuqori sifatini ko'rsatadi. Bu natija interfeys nuqsonlarining kamligi va sirt oqish toklarining pastligi bilan tushuntiriladi. $U=5$ V da tokning (mA) tartibiga yetishi strukturaning past ketma-ket qarshilikka ega ekanini bildiradi. Olingan natijalar n-Si/p-CdTe geterotuzilmasida sifatli p–n o'tish hosil bo'lganini ko'rsatadi [3]. Bu esa mazkur struktura asosida fotovoltaik qurilmalar yaratish imkoniyatini ko'rsatadi.

Adabiyotlar:

1. Il'chuk, G.A., Kusnez, V.V., Rud', V.Yu., Rud', Yu.V., Shapoval, P.I., and Petrus', R.Yu., Photosensitivity of n-CdS/p-CdTe heterojunctions obtained by chemical surface deposition of CdS, Semiconductors, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 318–320.
2. Sh. B. Utamuradova, S.A. Muzafarova, Z.S. Kenzhaeva. Study of surface states of in- nITO - pCdTe structures based on large-block polycrystalline films pCdTe IOSR Journal of Applied Physics (IOSR-JAP) Volume 14, Issue 1, and Ser. I (Jan–Feb. 2022), pp. 51-56.
3. Музафарова С.А. Исследование фоточувствительных ПДП структур на основе теллурида кадмия. Кандидатская диссертация, 1983. -192 с.

**VOLFRAM BILAN LEGIRLANGAN p-TIPLI MONOKRISTALL
KREMNIYNING STRUKTURAVIY, ELEMENT VA ELEKTR XOSSALARI TAHLILI**

Sh.X Daliev, J.J. Khamdamov, Y.Z. Mardiyev

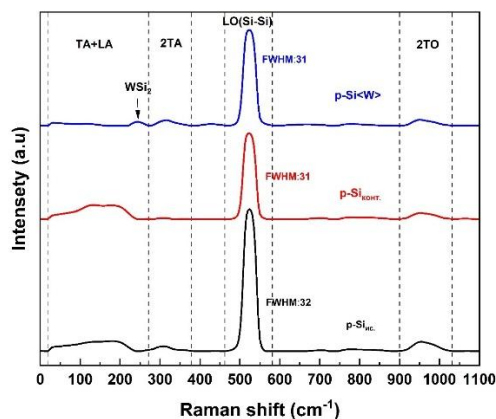
*O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika
ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston.*

E-mail: yolqinmardiyev96@gmail.com

Bugungi kunda kremniy (Si) eng keng qo'llaniladigan asosiy yarimo'tkazgich materiali sifatida yetakchi o'rinni egallaydi. Kremniy kristallari yuqori integratsiyalashgan sxemalar, yuqori tezlikdagi fotodiodlar, radiatsiyaga chidamli detektorlar, xotira elementlari, shuningdek, quyosh batareyalari va boshqa ko'plab elektron qurilmalarni ishlab chiqarishda qo'llaniladi. Bunday qurilmalarning ishonchliligi va barqarorligini belgilovchi asosiy omillardan biri bu materialdagi ichki va tashqi nuqsonlar tabiatidir [1-3]. Ushbu ishda p-tipli monokristalli kremniy (p-Si) namunalari yuqori haroratli diffuziya usulida volfram (W) kiritishning materialning elektr, tarkibiy va strukturaviy xossalari ta'siri kompleks tadqiq qilindi. Namunalar asosan 1150-1573 K haroratlar oralig'ida 5-15 soat davomida diffuziya qilinib, tez va sekin sovutish rejimlarida tayyorlandi. Solishtirma qarshilikning qatlam-qatlam o'lchovlari, Raman spektroskopiyasi, EDX (energiya dispersiv rentgen fluorescent) va FTIR (infraqizil spektroskopiya) usullari yordamida tahlillar olib borildi.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, volfram atomlari p-Si monokristal namunada o'tkazuvchanlik turini n-tipga o'zgartirdi. Tajriba davomida p-Si namunaga volfram atomlarini 1200 °C haroratda 10 soat davomida diffuziya qilinganda dastlabki namunaning solishtirma qarshiligi $\rho = 0.35 \Omega \cdot \text{cm}$ dan ortib ketdi yani p-Si<W> namunalari solishtirma qarshilikning sirtida $\rho = 0.47 \Omega \cdot \text{cm}$ ga ega bo'ldi. p-Si<W> namunani sirt qatlamidan bosqichma bosqich 15 μ olib borilganda solishtirma qarshilik $\rho = 0.36 \Omega \cdot \text{cm}$ ga o'zgardi. Bu holat adabiyotlarda keltirilgan volframning kremniydagi donorlik xususiyati haqidagi ma'lumotlar bilan mos tushadi [4].

Raman spektroskopiyasi tahlilida $\sim 244 \text{ cm}^{-1}$ va $\sim 429 \text{ cm}^{-1}$ chastotalarda yangi, intensiv piklarning paydo bo'lishi kremniy yuzasida volfram silitsidi (WSi_2) fazasi shakllanganligini tasdiqladi buni 1-rasmda ko'rish mumkin. Adabiyot ma'lumotlariga ko'ra, volfram silitsidining xarakterli Raman piklari aynan shu chastotalar oralig'ida kuzatiladi [5]. Shuningdek, 2TA fonon piki markazining $\sim 308 \text{ cm}^{-1}$ dan $\sim 319 \text{ cm}^{-1}$ ga siljishi panjarada kuchli siquvchi mexanik kuchlanishlar hosil bo'lganligidan dalolat beradi [6]. Bu holat katta o'lchamli volfram atomlarining kremniy panjarasiga kirib borishi natijasida yuzaga keladi [7].

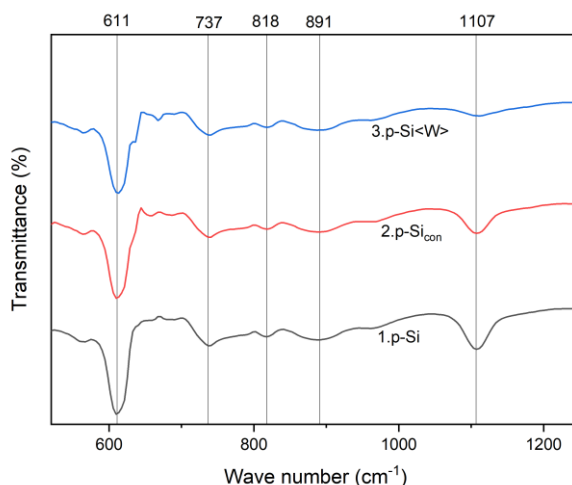


1-rasm. Namunalarning Raman spektrlari:

- 1. Qora chiziq boshlang'ich p-Si; 2. Qizil chiziq termik ishlov berilgan p-Si (nazorat); 3. Ko'k chiziq volfram bilan legirlangan p-Si<W>.**

EDX-8100 spektrometri yordamida o'tkazilgan element tahlili diffuziya harorati 1100 °C dan 1250°C gacha ortishi bilan volfram miqdori 1.375% dan 1.500% gacha oshishini ko'rsatdi. Bu diffuziya qonunlariga mos keladi va diffuziya koeffitsientining haroratga bog'liqligi bilan izohlanadi [8,9]. Sekin sovutilgan namunalarda W miqdori tez sovutilganlarga nisbatan yuqori ekanligi aniqlandi, bu muvozanat holatida volframning eruvchanligi yuqori ekanligini bildiradi [8]. Yuqori haroratlarda (1250°C) WSi_2 dan tashqari W_5Si_3 fazasining hosil bo'lish ehtimoli kuzatildi, bu adabiyotlarda keltirilgan ma'lumotlar bilan mos keladi [10,11].

IQ spektroskopiyasi natijalariga ko'ra, termik ishlov va volfram diffuziyasi natijasida optik faol kislorod va uglerod konsentratsiyasining kamayishi aniqlandi. Sekin sovutilgan p-Si<W> namunasida kislorod konsentratsiyasi $7,7 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ dan $2,37 \cdot 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ gacha, uglerod konsentratsiyasi esa $8,4 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ dan $2,21 \cdot 10^{17} \text{ sm}^{-3}$ gacha pasaygan (2-rasm, 1-jadval). Natijada kremniy monokristali hajmida volfram atomlarining mavjudligi ushbu atomlarning kislorod va uglerod bilan o'zaro ta'sirlashuvi natijasida kremniy tarkibidagi optik faol markazlar miqdorini kamaytirishi bilan izohlash mumkin [12]. Spektrlarda 611 sm^{-1} (Si-C), 737 sm^{-1} (O-C), 818 sm^{-1} (Si-O), 891 sm^{-1} (Si-OH) va 1107 sm^{-1} (Si-O-Si) tebranish modalari qayd etildi [12].



2 Rasm. 1. Dastlabki namuna, 2. Nazorat namuna $t=1250^\circ\text{C}$, $t=15 \text{ s}$, sekin sovutilgan, 3. p-Si<W> $t=1250^\circ\text{C}$, $t=15 \text{ s}$, sekin sovutilgan.

1-jadval

Namuna nomi	Optik faol kislorod konsentratsiyasi (cm^{-3})	Optik faol uglerod konsentratsiyasi (cm^{-3})
Dastlabki namuna (p-Si)	$7,7 \cdot 10^{17}$	$8,4 \cdot 10^{17}$
Nazorat namuna (p-Si, $t=1200^{\circ}\text{C}$, $t=15$ s, sekin sovutilgan)	$4,77 \cdot 10^{17}$	$7,6 \cdot 10^{17}$
p-Si<W> namuna ($t=1200^{\circ}\text{C}$, $t=15$ s, sekin sovutilgan)	$2,37 \cdot 10^{16}$	$2,21 \cdot 10^{17}$

Olingan natijalar volfram bilan legirlash kremniyning nafaqat elektr xossalarini, balki uning tarkibiy va strukturaviy xususiyatlarini ham tubdan o'zgartirishini, yangi barqaror faza-volfram silitsidi (WSi_2) hosil bo'lishini va panjarada kuchlanish maydonlari vujudga kelishini ko'rsatadi. Bu esa mikroelektronika qurilmalari, xususan, integral mikrosxemalar va kontakt tizimlari uchun istiqbolli material yaratish imkoniyatini beradi.

ADABIYOTLAR:

1. Kh.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, O.A. Bozorova, and Sh.Kh. Daliev, "Joint effect of Ni and Gf impurity atoms on the silicon solar cell photosensitivity," *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, 41(1), 80–81 (2005).
2. K.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, A. Khaitbaev, J.J. Khamdamov, Sh.B. Norkulov, and M.B. Bekmuratov, "Defective Structure of Silicon Doped with Dysprosium," *EastEur.J.Phys.* (2),283 (2024). <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-30>
3. Sh.B. Utamuradova, Sh.Kh. Daliev, J.J. Khamdamov, Y.Z. Mardiyev, "RAMAN SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF TUNGSTEN SILICIDE (WSi_2) PHASE FORMATION AND LATTICE STRESS IN P-TYPE SILICON," *RESEARCH FOCUS*, VOLUME 4, ISSUE 11, 2025, ISSN: 2181-3833
4. Y. H. Lee, R. L. Kleinhenz, and J. W. Corbett, "EPR of tungsten in silicon," *Applied Physics Letters*, vol. 31, no. 3, pp. 142–144, 1977.
5. L. Romano, A. M. Piro, M. G. Grimaldi, and C. Bongiorno, "Raman spectroscopy analysis of defects and strain in ion implanted Si," *Journal of Applied Physics*, vol. 121, no. 23, 235105, 2017.
6. I. De Wolf, "Micro-Raman spectroscopy to study local mechanical stress in silicon integrated circuits," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 139-154, 1996.
7. A. G. Milekhin, M. S. A. Guedes, L. A. M. G. G. de Souza, et al., "Structural and vibrational properties of tungsten silicide thin films grown by magnetron sputtering," *Journal of Applied Physics*, vol. 129, 015301, 2021.
8. Klaus Graff, "Metallimpurities in Silicon-Device Fabrication," Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995, DOI 10.1007/978-3-642-57121-3.
9. P. W. B. Duchateau, A. E. T. Kuiper, E. G. C. Lathouwers, & A. H. Reader, "Surface and interface effects in WSi_2 formation," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 11(1), 6–10, 1993.
10. Shimadzu Corporation, "EDX-8100 Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer," Shimadzu, China, 2024.
11. J. S. Byun, et al., "Growth kinetics of W_5Si_3 layer in WSi_2/W system," *Surface & Coatings Technology*, 187(2-3), 146–153, 2004.

12. A. G. Milekhin, M. S. A. Guedes, L. A. M. G. G. de Souza, et al., "Structural and vibrational properties of tungsten silicide thin films grown by magnetron sputtering," *Journal of Applied Physics*, vol. 129, 015301, 2021.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУР КРЕМНИЙ-ТАНТАЛ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Ш.Б. Утамурадова, А.Б. Утениязова, М.М. Мухаммадиева, М.Х. Файзуллаева

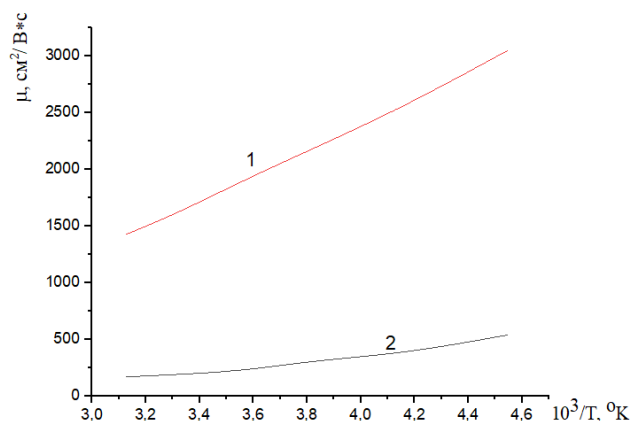
*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и
микроэлектроники при НУУз им. Мирзо Улугбека,*

e-mail: aysara.uteniyazova@gmail.com

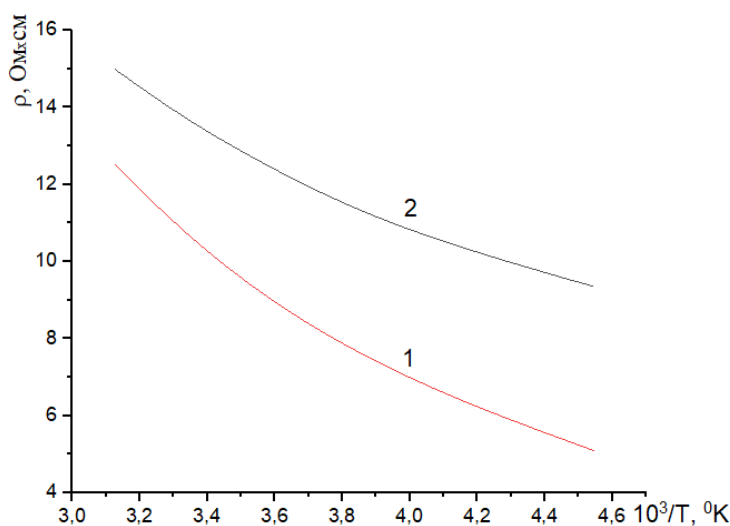
Контакт “металл-полупроводник” – это область соприкосновения, обеспечивающая электрический ток между металлом и полупроводником. Эти контакты в основном используются для изготовления высококачественных полупроводниковых приборов в интегральной микросхеме. Различие в работе выхода электронов между металлом и полупроводником при их контакте является причиной возникновения встречных диффузионных и дрейфовых потоков. Эти потоки действуют до тех пор, пока не произойдет выравнивание уровней Ферми в обоих материалах [1].

При создании полупроводниковых приборов широко применяются в микроэлектронике тугоплавкие металлы и их силициды, что обусловлено их термодинамическими особенностями, стабильностью при высоких температурах и перспективными электрофизическими свойствами. Контакты тугоплавкого металл - кремния широко используются в качестве омических контактов, барьеров Шоттки, затворных электродов в устройствах микроэлектроники из-за их низкого сопротивления и высокой термической стабильности [2].

Известно, что основными электрофизическими характеристиками полупроводниковых материалов являются ширина запрещенной зоны, подвижность, удельное сопротивление, время жизни, температура плавления, энергия ионизации примесей, начало собственной проводимости [3]. Путем напыления тугоплавкого металла на поверхность кремния, нами были изготовлены контакты тантал-кремний. Электрофизические характеристики этих контактов были исследованы методами эффекта Холла с помощью прибора Есоріа HMS-7000.



**Рис.1. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры:
1 – n-Si; 2 – Ta/n-Si**



**Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления от температуры : 1 – n-Si; 2 –
Ta/n-Si**

Полученные результаты показали, что легирование n-Si с удельным сопротивлением 10 Ом×см примесью тантала (Ta) приводит к изменению электрофизических характеристик. Из сравнения рисунков 1 и 2 следует, что введение примеси тантала в n-Si приводит к изменению типа проводимости, уменьшению подвижности носителей заряда, увеличению удельного сопротивления образца. Из анализа полученных данных следует, что уменьшение подвижности обусловлено тем, что легирующая примесь выступает в роли центров рассеяния носителей заряда.

Литература:

1. Зи. С. Физика полупроводниковых приборов; Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 368с.
2. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. - М.:Мир, 986. -176 с
3. Бонч-Бруевич.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990. 678 с.

**VOLFRAM BILAN LEGIRLANGAN p-Si MONOKRISTALL KREMNIYNI EDX
TAHLILI**

**Sh.B. Utamuradova¹, Sh.Kh. Daliev¹, J.J. Khamdamov¹, Y.Z. Mardiyev¹,
M. Qambarova²**

*O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va
mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston¹*

O'zbekiston Milliy universiteti fizika fakulteti, Toshkent, O'zbekiston²

E-mail: volqinmardiyev96@gmail.com

Yarimo'tkazgichli materiallar orqali zamonavi qurilmalar tayorlash texnologiyasida kremniy monokristallarini volfram bilan legirlash muhim ahamiyat kasb etadi. Volfram kremniy bilan kimyoviy birikmalar-silisidlar hosil qilish xususiyatiga ega bo'lib, bu birikmalar integral mikrosxemalar va kontakt tizimlarida keng foydalaniladi [1]. p-tipli kremniy (p-Si) monokristallariga volfram diffuziya qilish jarayonida sirt qatlamida sodir bo'ladigan o'zgarishlar, xususan silisid fazalarining hosil bo'lishida ishtirok etatadigan volfram atomlarini foyizini EDX-8100 energiya dispersiv rentgen fluorescent spektrometri yordamida tahlil qilindi.

Tadqiqot ob'ekti qilib (111) orientatsiyali, solishtirma qarshiligi $10 \Omega \cdot \text{cm}$ bo'lgan p-tipli kremniy monokristallari tanlangan. Namunalar birinchi bo'lib mexanik ishlov berilib sirtidan 30 mkr olib tashlandi, keyingi bosqichda kimyoviy ishlov berildi [1]. Tayorlangan namunalrni (Magnetron Sputtering Machine Price) uch nishonli magnetron orqali (W) volfram atomlaridan tashkil topgan qatlam hosil qilindi. Barcha namunalatni diffuziyon pechda 1150-1250 °C harorat oraliq'ida vakum sharoatda, 15 soat diffuziya amalga oshirilda, tez va sekin sovutildi. [1].

Diffuziya amaliyotini yakunlangandan so'ng barcha namunalarni EDX-8100 (Energiya dispersiv rentgen fluorescent) qurulmasi orqali sirt qalamini taxminiy 3-15 mkr qalinlikkacha bo'lgan qismidagi atomlar ulushi aniqlandi EDX-8100 qurilmasi yuqori samarali SDD (Silicon Drift Detector) detektori bilan jihozlangan bo'lib, u elektron sovutish tizimiga ega va suyuq azotni talab qilmaydi [3-4]. Qurilmaning energiya 140 eV dan kichik, elementlarni aniqlash diapazoni esa ugleroddan (C6) urangacha (U92) ni tashkil etadi [5]. Rentgen trubkasidan chiqqan yuqori energiyali rentgen nurlari namunaga yo'naltirilganda, namuna tarkibidagi atomlarning ichki elektron qobiqlaridan elektronlarni urib chiqaradi. Xususan, K-qobiqdan elektron urib chiqarilganda, yuqori energiyali L yoki M qobiqlardan elektronlar K-qobiqdagi bo'sh o'ringa o'tadi va bu o'tish jarayonida elementga xos bo'lgan xarakterli rentgen nurlanishi – fluorescens nurlanish hosil bo'ladi [7-8]. Har bir kimyoviy element o'ziga xos elektron tuzilishga ega bo'lgani uchun, hosil bo'lgan nurlanishning energiyasi ham shu element uchun xarakterli bo'ladi.

Dastlabki namunaning tarkibi: Si – 99.964%, Pb – 0.017%, Cu – 0.010%, Fe – 0.005%, Rb – 0.004% ni tashkil etgan. Volfram diffuziyasi 1150°C, 1200°C va 1250°C haroratlarda 15 soat davomida amalga oshirilgan. Sovutish tezligining ta'sirini o'rganish maqsadida namunalarning bir qismi tez, ikkinchi qismi esa sekin sovutilgan. Barcha namunalar EDX-8100 spektrometrida tahlil qilingan.

Volfram diffuziya qilingan namunalarda W miqdori 1.37% dan 1.50% gacha bo'lgan oralikda aniqlangan. Eng yuqori qiymat (1.500%) 1200°C da sekin sovutilgan namunada, eng past qiymat (1.375%) esa 1150°C da tez sovutilgan namunada kuzatilgan.

Namuna nomi	Foyizi %	Harorati °C	Sovutish tezligi	line
(p-Si)	97.536			SiLa
p-Si<W>	97.817 (Si)	1150	Tez	SiKa
	1.375 (W)	1150	Tez	WLa
p-Si<W>	97.536 (Si)	1150	Sekin	SiKa
	1.476 (W)	1150	Sekin	WLa
p-Si<W>	97.682 (Si)	1200	Tez	SiKa
	1.433 (W)	1200	Tez	WLa
p-Si<W>	97.553 (Si)	1200	Sekin	SiKa
	1.500 (W)	1200	Sekin	WLa
p-Si<W>	97.338 (Si)	1250	Tez	SiKa
	1.482 (W)	1250	Tez	WLa
p-Si<W>	97.424 (Si)	1250	Sekin	SiKa
	1.462 (W)	1250	Sekin	WLa

Harorat ortishi bilan W miqdorining biroz oshishi diffuziya koeffitsientining haroratga bog'liqligi bilan izohlanadi.

Volfram va kremniy orasidagi o'zaro ta'sir natijasida bir necha xil silisid fazalari hosil bo'lishi mumkin. Adabiyot ma'lumotlariga ko'ra, W-Si sistemasida asosan ikki turdagi silisidlar: WSi_2 va W_5Si_3 mavjud [9]. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, 680–800°C harorat oralig'ida volfram va kremniy orasidagi reaksiya natijasida tetragonal WSi_2 fazasi hosil bo'ladi [6]. Ushbu ishda qo'llanilgan haroratlar (1150–1250°C) esa WSi_2 hosil bo'lish haroratidan ancha yuqori bo'lib, bu sharoitda silisid hosil bo'lish jarayoni jadal kechishi kerak [2].

Yuqori haroratlarda (1300–1350°C) esa WSi_2 dan tashqari W_5Si_3 fazasi ham hosil bo'lishi mumkin [9]. W_5Si_3 odatda WSi_2 /W chegarasida yoki WSi_2 sirtida kuzatiladi. Ushbu fazaning hosil bo'lishi WSi_2 ning yuqori haroratda qisman parchalanishi va undan kremniyning ajralib chiqishi bilan bog'liq. Bizning tajribamizda 1250°C da W miqdorining biroz pasayishi (1.482% dan 1.462% ga) va S, Ca kabi elementlarning miqdori ortishi W_5Si_3 fazasining hosil bo'lish ehtimolini ko'rsatadi.

Volfram bilan legirlangan p-Si monokristallarini EDX-8100 usulida tahlil qilish quyidagi xulosalarni chiqarishga imkon beradi:

1. Volfram diffuziyasi natijasida kremniy sirt qatlamida silisid fazalari – asosan WSi_2 va qisman W_5Si_3 hosil bo'ladi. Bu fazalarning hosil bo'lishi EDX spektrlarida W va Si intensivliklarining o'zgarishi bilan namoyon bo'ladi.
2. Diffuziya haroratining ortishi (1150°C dan 1250°C gacha) bilan volfram miqdori 1.375% dan 1.500% gacha oshadi, bu Arrhenius qonuniyatiga mos keladi.
3. Sekin sovutilgan namunalarda volfram miqdori tez sovutilganlarga nisbatan yuqori, bu muvozanat holatida W ning eruvchanligi yuqori ekanligini ko'rsatadi.

Adabiyotlar:

1. Sh.B. Utamuradova, Sh.Kh. Daliev, J.J. Khamdamov, Y.Z. Mardiyev. RAMAN SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF TUNGSTEN SILICIDE (WSi_2) PHASE FORMATION AND LATTICE STRESS IN P-TYPE SILICON./ RESEARCH FOCUS | VOLUME 4 | ISSUE 11 | 2025 ISSN: 2181-3833 ResearchBip (15.22) | Google Scholar | Index Copernicus (ICV 80.58)
2. Duchateau, J. P. W. B., Kuiper, A. E. T., Lathouwers, E. G. C., & Reader, A. H. (1993). Surface and interface effects in WSi_2 formation. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 11(1), 6–10.
3. Shimadzu Corporation. (2024). EDX-8100 Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer. Shimadzu, China.

4. Shimadzu Enterprise Management (China) Co., Ltd. (2024). Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer EDX-8100. instrument.com.cn. (in Chinese)
5. Mass Shoji Co., Ltd. (2025). Shimadzu Corporation X-ray Fluorescence Analyzer EDX-8100 mass.co.jp. (in Japanese)
6. Lin, J. X., & Chen, L. J. (1990). Tungsten and silicon interface reaction research. National Tsing Hua University Master Thesis, Taiwan. (in Chinese)
7. Test Technology Professional Knowledge Service System. (2024). Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analyzer EDX-8100. analysis.org.cn. (in Chinese)
9. Shimadzu Enterprise Management (China) Co., Ltd. (2017). Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analyzer EDX-8100. instrument.com.cn. (in Chinese)
9. Byun, J. S., et al. (2004). Growth kinetics of W_5Si_3 layer in WSi_2/W system. *Surface & Coatings Technology*, 187(2-3), 146–153.

LANTAN ATOMLARINING MONOKRISTAL KREMNIYGA DIFFUZYASINING RAMAN SPEKTRMETRI TAHLILI

Sh.B. Utamuradova, J.J. Hamdamov, A.M.Qo‘shimmetov, S.B. Erkinova

*O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va
mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O‘zbekiston*

E-mail: jonibek.uzmu@gmail.com

Yarimo‘tkazgich materiallar orqali turli xil elektronika qurilmalari uchun materiallarni ishlab chiqish va takomillashtirish zamonaviy fan va texnikaning asosiy yo‘nalishlari bo‘lib qolmoqda [1]. Yarimo‘tkazgichli qurilmalar uchun asosiy material bo‘lgan kremniy o‘ziga xos xususiyatlarga ega. Biroq, uni yanada takomillashtirish uchun turli xil element tomrlarini qo‘shish kerak. Kremniy kristall panjarasiga boshqa elementlarning atomlarini kiritish uning xususiyatlarini sezilarli darajada o‘zgartirish va yuqori samarali elektron qurilmalarni yaratish uchun yangi imkoniyatlar ochish imkonini beradi [2].

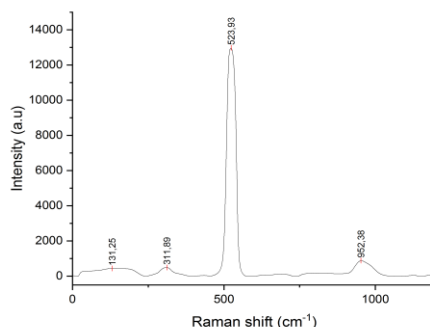
Kremniyga har xil turdagi nodir yer elementlarni legirlash orqali yangi slisid, slika fazalarini hosil bo‘lish, namunalarda molekulyar bog‘lanishlarni, nuqsonlarni, amorf qatlamlarni o‘ganishda Raman spektroskopiyasi asosiy o‘rindi egallamoqda. Kremniy (Si) uchun 520 cm^{-1} atrofidagi birinchi tartibli optik fonon cho‘qqisi asosiy hisoblanadi. Ammo haqiqiy namunalarda, termik ishlov berilganda, boshqa elementlarni diffuziy qilinganda, qo‘shimcha cho‘qqilar paydo bo‘ladi [1(3)].

Tajribani bajarish uchun n-Si (KEF-35 $\text{om}\cdot\text{cm}$) namuna tanlab olindi. Dastlab namuna mexanik ishlov berilib sirt qatlamidan notekis qatlamlar olib tashlandi, kimyoviy tozalash bosqichlardan o‘tkazildi. Tayyor holatga keltirilgan namunalar sirtida VUP-4 qurulmasida yuqori vakum ostida Lantan atonlari bilan qoplaplandi. Namunalarni kvars ampulada vakum sharoitida $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ haroratda 5 soat davomida diffuziya amalyoti olib borildi hamda namunalar tez sovutildi.

Lantan bilan legirlangan kremniy namunalarining Raman spektrlari o‘lchab, kirishmalarni kristall strukturasi ta’siri aniqlandi. Dastlabki kirishmasiz (etalon) namunaning Raman spektrlarining tahlili 1-rasmda keltirilgan va unda quydagi cho‘qqilar aniqlandi. $131,23\text{ cm}^{-1}$, $311,89\text{ cm}^{-1}$, $523,93\text{ cm}^{-1}$, $952,38\text{ cm}^{-1}$. Bu cho‘qqilar monakristall kremniydagi akustik TA, LA va optik TO, LO piklar hamda molekulyar bog‘lanishlarni beradi. $131,23\text{ cm}^{-1}$ keng pik - bu

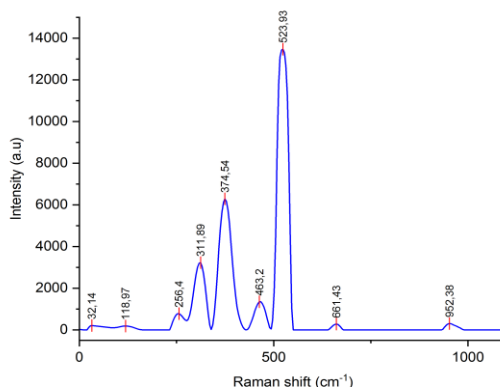
cho‘qqi odatda kremniyning akustik fononlari bilan bog‘liq ikkinchi tartibli sochilish (2TA) yoki amorf fazaning mavjudligidan dalolat beradi. Kengligi esa tartibsizlikni ko‘rsatadi. Adabiyotlarda amorf kremniy (n-Si) da 150 cm^{-1} gacha bo‘lgan keng pik kuzatiladi [4]. $311,89\text{ cm}^{-1}$ da 2LA akustik soha deyiladi bu joyda ham Si-P₂ bilan kuchsiz bo‘g‘lanish hosil bo‘ladi va bu amorf sohaga tegishli [4].

$523,93\text{ cm}^{-1}$ dagi cho‘qqi Si-Si kimyoviy bog‘lanishni beradi, bu optik soha deyiladi. 952 cm^{-1} cho‘qqi hosil bo‘lishi optik soha deyiladi 2TO sohaga mos keladi [5-6].



1-Rasm. Dastlabki namuna (KEF-35 $\text{om}\cdot\text{cm}$)

Lantan (La) bilan legirlangan namunalardagi o‘zgarishlarni 2-rasmda kuzatish mumkin. Bunda amorf, akustik, optik sohalarda o‘zgarishlarni ko‘rish mumkin. Raman spektrometrida aniqlangan piklar $118,9\text{ cm}^{-1}$, $256,4\text{ cm}^{-1}$, $311,89\text{ cm}^{-1}$, $374,54\text{ cm}^{-1}$, $463,2\text{ cm}^{-1}$, $523,93\text{ cm}^{-1}$, $661,43\text{ cm}^{-1}$, $952,4\text{ cm}^{-1}$. $118,97\text{ cm}^{-1}$ past chastotali bu cho‘qqi lantan atomlarining kremniy panjarasidagi lokal tebranishlarini hosil qilgan. Og‘ir atomlar (La atom massasi ~ 139) panjarada qo‘shimcha past chastotali modlar hosil qiladi. Ba’zi tadqiqotlarda La bilan bog‘liq past chastotali modlar $100\text{--}150\text{ cm}^{-1}$ oraliq‘ida kuzatilgan [7]. $256,4\text{ cm}^{-1}$ cho‘qqi lantan silitsidi (LaSi_2) yoki lantan oksidi (La_2O_3) ga tegishli. LaSi_2 ning Raman spektri bo‘yicha adabiyotlarda $200\text{--}300\text{ cm}^{-1}$ oraliq‘ida bir necha cho‘qqilar qayd etilgan [8]. Xususan, 260 cm^{-1} atrofidagi pik LaSi_2 ning Eg rejimiga mos keladi. $311,89\text{ cm}^{-1}$ yuqorida aytilganidek, Si ning 2TA piki. Bu pikning mavjudligi La diffuziyasi Si ning fonon spektrini o‘zgartirmagan. $374,54\text{ cm}^{-1}$ cho‘qqi ham LaSi_2 yoki La_2O_3 bilan bog‘liq. La_2O_3 uchun $370\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ oraliq‘ida bir necha Raman faol modlar mavjud [8]. Shuningdek, kremniy substratidagi oksid qatlamlari (SiO_2) da $430\text{--}450\text{ cm}^{-1}$ atrofida pik beradi, ammo 374 unga mos kelmaydi. $463,2\text{ cm}^{-1}$ cho‘qqi SiO_2 ning (kristobalit yoki kvarts) asosiy Raman cho‘qqisiga juda yaqin. Masalan, α -kvarsda 464 cm^{-1} da kuchli pik bor [9]. Bu esa diffuziya jarayonida vakuumda bo‘lsa ham, sirtida oksidlanish hisobidan sodir bo‘lgan. $661,43\text{ cm}^{-1}$ lantan oksidi (La_2O_3) ning yuqori chastotali modlaridan biri [8].



2-Rasm. n-Si<La> Lantan diffuziya qilingan namuna grafigi

n-Si va n-Si<La> namunalarining Raman spektrlari tahlili shuni ko'rsatdiki, lantan diffuziyasi kremniy spektriga sezilarli ta'sir ko'rsatgan. Yangi cho'qqilar (119, 256, 375, 463, 661 cm^{-1}) lantanning kremniy bilan o'zaro ta'siri natijasida yuzaga kelgan. Ular asosan lantan silitsidi, lantan oksidi va kremniy oksidi bilan bog'liq. Shu bilan birga, kremniyning asosiy fonon cho'qqisi (524 cm^{-1}) saqlanib qolgan, bu esa kristall tuzilishning asosiy qismi buzilmaganligini ko'rsatadi.

ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. Utamuradova, S., Daliev, S., & Ismoilov, S. (2025). Influence of Cooling Rate on Structural and Electrophysical Changes in Zirconium-Doped Silicon (Si + Zr). *International Journal of Independent Research Studies*, 14(5), 27–32.
2. Kumar, R., & Tanwar, M. (2021). Effect of some physical perturbations and their interplay on Raman spectral line shapes in silicon: A brief review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 52(12), 2100-2118.
3. Sh.B. Utamuradova, Sh.Kh. Daliev, J.J. Khamdamov, Y.Z. Mardiyev/ RAMAN SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF TUNGSTEN SILICIDE (WSI₂) PHASE FORMATION AND LATTICE STRESS IN P-TYPE SILICON./ RESEARCH FOCUS | VOLUME 4 | ISSUE 11 | 2025 ISSN: 2181-3833 ResearchBip (15.22) | Google Scholar | Index Copernicus (ICV 80.58)
4. Brodsky, M. H., et al. (1970). Infrared and Raman spectra of amorphous silicon. *Physical Review B*, 1(6), 2632. DOI: [10.1103/PhysRevB.1.2632](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.1.2632)
5. Temple, P. A., & Hathaway, C. E. (1973). Multiphonon Raman spectrum of silicon. *Physical Review B*, 7(8), 3685. DOI: [10.1103/PhysRevB.7.3685](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.7.3685)
6. Temple, P. A., et al. (1972). Two-phonon Raman spectrum of silicon. *Light Scattering in Solids*, 345-349. DOI: [10.1007/978-3-642-80693-5_54](https://doi.org/10.1007/978-3-642-80693-5_54)
7. Nava, F., et al. (1993). Raman spectra of rare-earth silicides. *Journal of Applied Physics*, 74(3), 1796-1801. DOI: [10.1063/1.354785](https://doi.org/10.1063/1.354785)
8. Boldish, S. I., & White, W. B. (1979). Raman spectra of lanthanide sesquioxides. *Spectrochimica Acta Part A*, 35(11), 1235-1242. DOI: [10.1016/0584-8539\(79\)80024-4](https://doi.org/10.1016/0584-8539(79)80024-4)

TITAN BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING RAMAN SPEKTROSKOPIK TADQIQI

Sh.B. Utamuradova¹, Sh.X.Daliyev¹, J.A. Ergashev², M.R. Ro'ziyeva¹

¹O'zMU huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika
ilmiy-tadqiqot instituti

²O'zbekiston texnik jihatdan tartibga solish agentligining
O'zbekiston Milliy metrologiya instituti" davlat muassasasi

javokhire@mail.ru

Yarimo'tkazgich materiallarning fizik xossalarini boshqarishning eng samarali usullaridan biri bu ularni turli kirishma atomlari bilan legirlash hisoblanadi. So'nggi yillarda o'tuvchi elementlar bilan legirlangan kremniy asosidagi materiallar mikro- va optoelektronika qurilmalarini yaratishda keng qo'llanilmoqda. Xususan, titan (Ti) atomlarini kremniy kristall panjarasiga kiritish natijasida panjara parametrlari o'zgarishi, lokal elastik kuchlanishlar hosil bo'lishi hamda

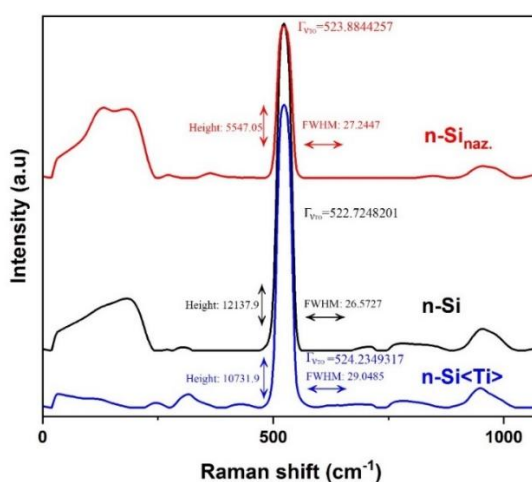
nuqsonlar zichligining ortishi kuzatiladi.

Mazkur strukturaviy o'zgarishlar materialning fonon spektriga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli kristall panjarada yuz berayotgan deformatsion jarayonlarni aniqlashda Raman spektroskopiya usuli yuqori sezuvchanlikka ega bo'lgan nomanfiy diagnostik metod sifatida keng qo'llaniladi.

Ushbu ishda titan bilan legirlangan n-tipli kremniy monokristallarining kristall tuzilishida yuz beruvchi o'zgarishlarni Raman spektroskopiyasi yordamida tadqiq etildi. Tajriba uchun boshlang'ich solishtirma qarshiligi $\rho=2.1\div2.5\ \Omega\cdot\text{cm}$ oralig'ida bo'lgan nazorat n-Si namunalari tanlab olindi. Titan elementi bilan legirlash jarayoni termik diffuziya usuli yordamida amalga oshirildi. Namunalar dastlab kimyoviy tozalashdan o'tkazildi hamda sirtidagi oksid qatlamini olib tashlash maqsadida HF eritmasi bilan ishlov berildi. So'ngra Ti (99.999% tozalikka ega) yuqori vakuum sharoitida ($10^{-6}\div10^{-7}$ Torr) BYII-4 qurilmasida Si sirtiga termik purkaldi. Namunalar 1200°C haroratda 15 soat davomida kvars vakuumli ampulada diffuziya qilindi.

Raman spektroskopik o'lchovlar xona haroratida 785 nm lazer manbaiga ega QE Pro High-Sensitivity Spectrometer yordamida $0\text{--}1200\ \text{cm}^{-1}$ to'lqin sonlari oralig'ida amalga oshirildi (1-rasm).

1-rasmda dastlabki (n-Si), nazorat (n-Si_{naz.}) hamda titan bilan legirlangan (n-Si<Ti>) namunalarning Raman spektrlari keltirilgan. Raman spektrlarining tahlili natijasida kremniyga xos (Si-Si) bo'lgan birinchi tartibli TO fonon cho'qqisi dastlabki n-Si namunasida $\nu_{\text{TO}}=522.72\ \text{cm}^{-1}$ da kuzatildi. n-Si_{naz.} ushbu cho'qqining $\nu_{\text{TO}}=523.88\ \text{cm}^{-1}$ gacha siljishi kristall panjarada issiqlik ishlovi natijasida yuzaga kelgan qoldiq elastik kuchlanishlarning mavjudligini ko'rsatadi. Titan bilan legirlangan n-Si<Ti> namunasida esa TO fonon cho'qqisining yanada yuqori to'lqin sonlari tomon siljib, $\nu_{\text{TO}}=524.23\ \text{cm}^{-1}$ ga teng bo'lishi aniqlangan. Ushbu siljish titan atomlarining kremniy kristall panjarasiga diffuziyalanishi natijasida panjara parametrlarining o'zgarishi hamda elastik siqilish kuchlanishlarining ortishi bilan izohlandi.



1-rasm. n-Si va n-Si<Ti> namunalarning Raman spektri.

Shuningdek, legirlangan namunada pik kengligining ortishi: $\text{FWHM}=29.04\ \text{cm}^{-1}$ fononlarning sochilish ehtimoli ortganligini hamda kristall panjarada strukturaviy nuqsonlar zichligining oshganligini ko'rsatadi. Integral kenglik (I.Breadth) qiymatining ham ortishi ($28.28 \rightarrow 30.92$) materialda panjara tartibsizligining kuchayganligini tasdiqlaydi (1-jadval).

Titan atomlarining diffuziyasi natijasida kristall panjarada strukturaviy nuqsonlar va lokal deformatsiyalar hosil bo'lgan, bu esa fononlarning sochilish ehtimolini oshirib, Raman cho'qqisining integral kengligining ortishiga olib kelgan.

1-jadval.

Namunalarining Raman TO fonon cho'qqisi parametrlari

Namuna	Center, ν_{TO} (cm ⁻¹)	Area	Height	FWHM (cm ⁻¹)	I.Breadth
n-Si	522.7248201	343330	12137.9	26.5727	28.2858
n-Si_{naz.}	523.8844257	160870	5547.05	27.2447	29.0011
n-Si<Ti>	524.2349317	331844	10731.9	29.0485	30.9212

Raman spektroskopik tahlil natijalari titan atomlarining n-tipli kremniy kristall panjarasiga diffuziylanishi natijasida strukturaviy deformatsiyalar yuzaga kelganligini ko'rsatdi. n-Si<Ti> namunasida TO fonon cho'qqisining yuqori to'liq sonlari tomon siljishi kristall panjarada elastik siqilish kuchlanishlari hosil bo'lganligini bildiradi. Pik kengligi (FWHM) va integral kenglik (I.Breadth) qiymatlarining ortishi esa titan kirishmasi ta'sirida materialda strukturaviy nuqsonlar zichligining oshganligini hamda fononlarning panjara bo'ylab erkin tarqalalish ehtimoli kuchayganligini tasdiqlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Nemanich R. J., Fulks R. T., Stafford B. L., & Vander Plas H. A. Initial reactions and silicide formation of titanium on silicon studied by Raman spectroscopy. *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, 3(3), 938–941, 1985.
2. Nemanich R. J., Fulks R. T., Stafford B. L., & Vander Plas H. A. Reactions of thin-film titanium on silicon studied by Raman spectroscopy.
3. *Applied Physics Letters*, 46(7), 670–672, 1985.
4. Nemanich R. J., Fiordalice R. W., & Jeon H. Raman Scattering Characterization of Titanium Silicide Formation. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25(5), 997–1002, 1989.
5. Su Y., Balmer M. L., & Bunker B. C. Raman Spectroscopic Studies of Silicotitanates. *Journal of Physical Chemistry B*, 104(34), 8160–8169, 2000.
6. Ricchiardi G., Damin A., Bordiga S., Lamberti C., Spanò G., Rivetti F., & Zecchina A. Vibrational Structure of Titanium Silicate Catalysts: Spectroscopic Study. *Journal of the American Chemical Society*, 2001.
7. Aubakirova D., Yerdybaeva N., & Pichugin V. Study of the composition of titanium oxide films deposited by reactive magnetron sputtering. *Recent Contributions to Physics*, 2020.
8. Raxmatullayev I. A., Tursunkulov O. M., Nazarov X. T., Davronov M. X., Kurbonov A. K., Tukfatullin O. F., & Raxmatullayev M. R. Mikro o'lchamli titan dioksidi kukunlarining sirt morfologiyasi va struktura xususiyatlarini tadqiq qilish (Raman spektroskopiya usuli). *Ilm-Fan va Innovatsion Rivojlanish*, 2024.

ТЕРМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК ZrO₂ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКЕ В ВАКУУМЕ И КИСЛОРОДНОЙ СРЕДЕ

Ж.Т. Абдурахимов¹, И.Р. Бекпулатов¹, Б.Д. Игамов², А.И. Камардин²,

¹Каршинский государственный университет, Узбекистан,

*²УзР ФА Конструкторское бюро и Опытно-производственный научно-технический
центр, ул. Дормон, 33, Ташкент, Узбекистан,
E-mail: javohirabduraximovtohirovich@gmail.com*

Тонкие пленки ZrO_2 привлекают внимание благодаря высокой термостойкости, химической стабильности и уникальным оптическим свойствам, что делает их перспективными для микроэлектроники и оптоэлектронных устройств[1-4]. Свойства пленок напрямую зависят от условий термообработки, особенно от среды (вакуум или кислород) и температуры, которые определяют формирование однослойной или многослойной структуры, рекристаллизацию и образование оксидного слоя.[5-7] Целью данной работы является количественное исследование эволюции оптических и структурных параметров ZrO_2 -пленок при высокотемпературной обработке в различных средах с использованием эллипсометрии, а также установление связи между толщиной пленки, плотностью, внутренним напряжением и шириной запрещенной зоны.

В тонких плёнках ZrO_2 толщиной ≤ 600 нм, нагреваемых в кислородной среде, наблюдается сложная эволюция толщины, обусловленная совокупностью физико-химических процессов и количественно оцененная методом эллипсометрии (Ψ , Δ). В процессе термической обработки однослойная структура трансформируется в многослойную гетероструктуру $ZrO_2/ZrO_{2-x}/Si(111)$, что подтверждается спектральным сдвигом Ψ и Δ , отражающим формирование дополнительного оксидного слоя. С ростом температуры диффузия кислорода ускоряется по закону Аррениуса, усиливая окислительные реакции на поверхности и интерфейсах. Толщина оксидного слоя растёт по параболической кинетике, а его больший молярный объём вызывает объёмное расширение и увеличение общей оптической толщины плёнки.

Параллельно основной ZrO_2 -слой подвергается рекристаллизации и денсфикации, что снижает пористость и слегка уменьшает физическую толщину. Таким образом, эволюция толщины определяется конкуренцией процессов: уплотнение основного слоя ($d\downarrow$) и активный рост оксидного слоя ($d\uparrow$), при этом в кислородной среде обычно преобладает рост оксидного слоя, что увеличивает общую оптическую толщину. Формирование оксидного слоя создаёт многослойную интерференционную систему, сдвиг максимумов интерференции, снижение амплитуды и отражательной способности вызывают визуальное «выбеливание» цвета плёнки.

В вакуумной среде окисление почти отсутствует, плёнка сохраняет однослойную структуру $ZrO_2/Si(111)$. С увеличением температуры возрастает термодинамическая подвижность атомов, происходит рекристаллизация и рост кристаллитов, дефекты на границах зерен уменьшаются, метастабильные фазы стабилизируются, материал уплотняется и плотность увеличивается. В результате физическая толщина слегка уменьшается, показатель преломления n возрастает, а оптическая длина пути $n \cdot d$ изменяется медленно.

При высоких температурах (~ 1200 °C) продолжается рост зерен и релаксация внутренних напряжений, при этом чрезмерное увеличение поверхностной пористости может усилить рассеяние. Однако общая оптическая толщина остаётся почти неизменной или слегка уменьшается, в отличие от кислородной среды. В вакууме эволюция толщины и оптических параметров определяется исключительно физическими процессами (денсфикация, рекристаллизация, релаксация напряжений) без химического окисления,

обеспечивая хорошее соответствие однослойной модели в эллипсометрическом анализе.

В данной работе тонкие пленки ZrO_2 подвергались термической обработке при высоких температурах в вакууме и кислородной среде. На основании эллипсометрических измерений наблюдались изменения ширины запрещенной зоны (E_g) и соответствующей длины волны (λ_g) пленок в зависимости от температуры и условий среды (Таблица 1).

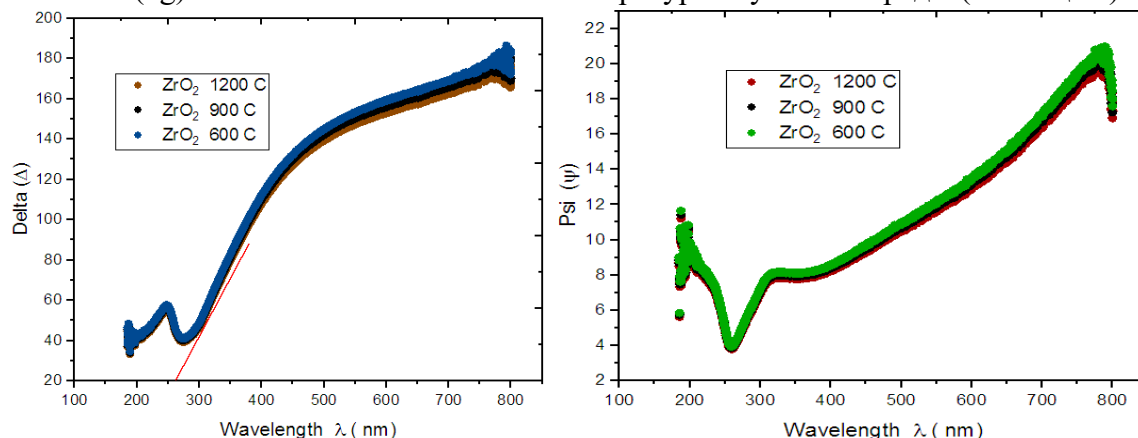


Рис. 1. Эллипсометрические данные тонких пленок ZrO_2 после термической обработки при высокой температуре в вакууме и кислородной среде.

В вакууме химический состав пленок практически не изменяется, а внешнее окисление минимально. Соответственно, значение E_g увеличивается с 4,95 эВ при 600 °C до 5,05 эВ при 1200°C. Этот рост объясняется уплотнением и рекристаллизацией материала, приводящими к более плотному расположению атомов, снижению пористости и улучшению морфологии поверхности. В результате показатели преломления слегка повышаются, оптические потери минимальны, а интерференционные цвета проявляются ярко и насыщенно. Соответствующая длина волны запрещенной зоны λ_g в вакууме наблюдается в диапазоне 250–255 нм (Рис. 1).

При термической обработке в кислородной среде поверхность тонких пленок ZrO_2 окисляется, формируя многослойный оксидный слой. Появление оксидного слоя увеличивает градиент показателя преломления и усиливает оптическое поглощение. В результате ширина запрещенной зоны E_g снижается с 4,85 эВ при 600 °C до 4,75 эВ при 1200 °C. Высокий коэффициент поглощения оксидного слоя, многослойные интерференционные эффекты и шероховатость поверхности объясняют размытие цветов и снижение отражательной способности. Соответствующая длина волны λ_g варьируется в диапазоне 255–260 нм, что соответствует уменьшению E_g .

Таблица 1. Зависимость E_g и соответствующей длины волны λ_g тонких пленок ZrO_2 от температуры и среды.

Темпера- тура (°C)	E_g в вакууме (эВ)	λ_g в вакууме (нм)	E_g в кислороде (эВ)	λ_g в кислороде (нм)	Примечание
600	4,95	250	4,85	255	В вакууме химически стабильна; в кислороде начальное окисление
900	5,00	248	4,80	258	В вакууме уплотнение; в кислороде рост

					оксидного слоя, снижение E_g
1200	5,05	246	4,75	260	В вакууме максимальное уплотнение; в кислороде многослойный оксид и усиление поглощения

Таким образом, эволюция E_g в зависимости от температуры и среды служит чувствительным оптическим индикатором структурных, химических и оптических изменений в пленках ZrO_2 . Высокие значения E_g в вакууме отражают химическую стабильность и преобладание чистой интерференции, тогда как снижение E_g в кислороде демонстрирует окисление поверхности и усиление оптических потерь.

Список литературы:

1. Xie, H.; Wu, Q.; Xu, L.; Zhang, L.; Liu, G.; Dong, C. Nitrogen-doped amorphous oxide semiconductor thin film transistors with double-stacked channel layers. *Appl. Surf. Sci.* 2016, 387, 237–243.
2. Gao, Y.; Li, X.; Chen, L.; Shi, J.; Sun, X.W.; Zhang, J. High mobility solution-processed hafnium indium zinc oxide TFT with an Al-doped ZrO_2 gate dielectric. *IEEE Electron. Device Lett.* 2014, 35, 554–556.
3. Peng, J.; Sheng, C.; Shi, J.; Li, X.; Zhang, J. High-k titanium–aluminum oxide dielectric films prepared by inorganic–organic hybrid solution. *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 2014, 71, 458–463.
4. Yang, W.; Song, K.; Jung, Y.; Jeong, S.; Moon, J. Solution-deposited Zr-doped AlO_x gate dielectrics enabling high-performance flexible transparent thin film transistors. *J. Mater. Chem. C* 2013, 1, 4275–4282.
5. Saha, J.K.; Billah, M.M.; Bukke, R.N.; Kim, Y.G.; Mude, N.N.; Siddik, A.B.; Islam, M.; Do, Y.; Choi, M.; Jang, J. Highly stable, nanocrystalline, ZnO thin-film transistor by spray pyrolysis using high-K dielectric. *IEEE Trans. Electron. Devices* 2020, 67, 1021–1026.
6. Baturay, S.; Candan, I.; Ozaydin, C. Structural, optical, and electrical characterizations of Cr-doped CuO thin films. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2022, 33, 7275–7287.
7. Spiga, S.; Rao, R.; Lamagna, L.; Wiemer, C.; Congedo, G.; Lamperti, A.; Molle, A.; Fanciulli, M.; Palma, F.; Irrera, F. Structural and electrical properties of atomic layer deposited Al-doped ZrO_2 films and of the interface with TaN electrode. *J. Appl. Phys.* 2012, 112, 014107.

IZOVALENT KIRISHMALARI BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING ELEKTROFIZIK VA ENERGETIK XUSUSIYATLARI

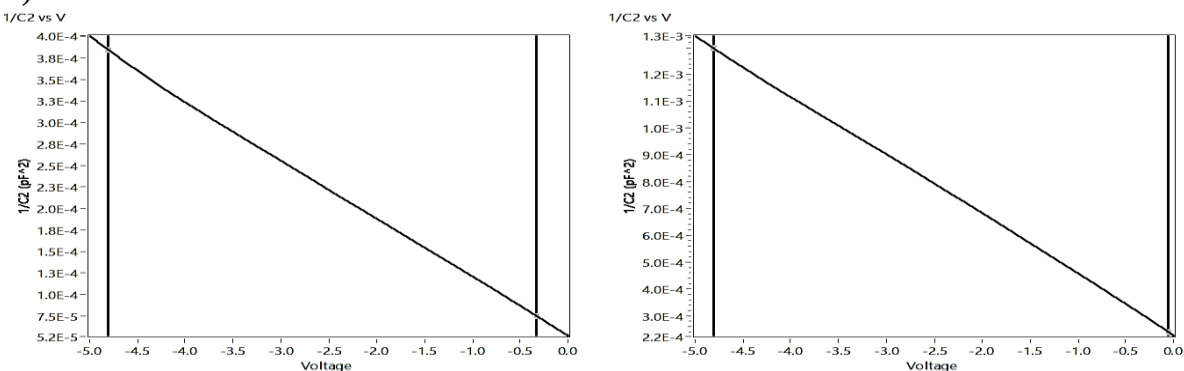
SH.B. Utamuradova, B.R. Bokiyeu, O.X.Qo'ldashev

*O'zMU huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti,
Toshkent, O'zbekiston.*

E-mail: boqiyevb@gmail.com

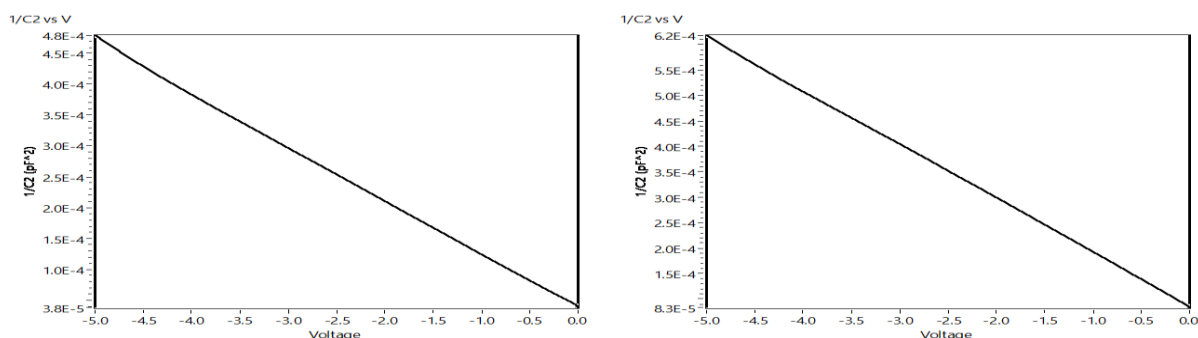
n-tipli kremniy (n-Si) asosida qalay (Sn) va germaniy (Ge) atomlari termodiffuziya usuli orqali kiritilgan yarimo'tkazgich namunalar uchun Shotki diod tuzilmalari tayyorlandi va ularning

elektrofizik xossalari volt-amper xarakteristikalar (VAX), volt-farad (C-V) o'lovchilari hamda sig'imli chuqur sathlar spektroskopiyasi (DLTS) metodlari yordamida kompleks tarzda tadqiq etildi [1]. O'lovchilar keng harorat oralig'ida olib borilib, diffuziya qilingan izovalent kirishmalar elektr maydon taqsimoti, tashuvchilar konsentratsiyasi va nuqsonlar energetik spektriga ko'rsatgan ta'siri chuqur tahlil qilindi. n-Si<Sn> tuzilmalarida xona haroratida (300 K) ichki potensial qiymati $V_{bi} \approx 0,75$ V, past haroratda (77 K) esa $V_{bi} \approx 1,05$ V ga teng ekani aniqlangan (1-rasm).



1-rasm. 1100 °C haroratda olingan n-Si<Sn> namunalarining volt-farad xarakteristikalar (1/C²–V): (a) T = 300 K, $V_{bi} = 0,75$ V; (b) T = 77 K, $V_{bi} = 1,05$ V.

Bir xil teskari siljish sharoitida kambag'allanish (depletion) qatlamining kengligi W ning n-Si<Ge> tuzilmalariga nisbatan sezilarli darajada kichik bo'lishi donor kirishmalarining yuqori darajada faollashuvi, erkin tashuvchilar konsentratsiyasining ortishi hamda Debay uzunligining qisqarishi bilan izohlanadi. Xususan, n-Si<Sn> tuzilmalarida Debay uzunligi $L_D \approx 0,095$ mkm ga teng bo'lib, bu elektrostatik potensialning sirtga yaqin sohalarda tez so'nishini va «qattiq» elektrostatik profil shakllanishini ko'rsatadi [2]. Aksincha, n-Si<Ge> tuzilmalarida ichki potenciallar 300 K va 77 K haroratlarda mos ravishda $V_{bi} \approx 0,42$ V va $V_{bi} \approx 0,80$ V ni tashkil etib, kambag'allanish sohasi sezilarli darajada kengroq ($W \approx 2,2-7,5$ mkm) bo'lishi aniqlangan (2-rasm).



2-rasm. 1000 °C da olingan n-Si<Ge> strukturalarining volt-farad xakteri (1/C²–V): (a) T = 300 K, $V_{bi} = 0,42$ V; (b) T = 77 K, $V_{bi} = 0,80$ V.

Bunda Debay uzunligi $L_D \approx 0,362$ mkm gacha oshgani kuzatilib, bu donor faollashuvining nisbatan pastligi hamda zaryad zichligining fazoda sekinroq o'zgarishini bildiradi [3]. Natijada, Ge bilan legirlangan tuzilmalarda elektr maydon taqsimoti nisbatan kamroq bo'lib, tashuvchilarning fazoviy taqsimlanishida sirtga yaqin sohalardan chuqurroq hududlargacha sezilarli o'zgarish kuzatiladi. DLTS tahlillari n-Si<Sn> namunalarida tutish kesimi $\sigma \approx 4,7 \times 10^{-16}$ sm² bo'lgan $E_c - 0,35$ eV energiya sathiga mos keluvchi chuqur markazlar mavjudligini ko'rsatdi. Ushbu energetik sath taqiqlangan zonaning o'rtasiga yaqin joylashgan bo'lib, ularning rekombinatsiya jarayonlarida faol ishtirok etishi ehtimolini oshiradi. n-Si<Ge> tuzilmalarida esa

$\approx 202\text{--}208\text{ K}$ harorat oralig'ida kuzatilgan $\sigma \approx 3,7 \times 10^{-17}\text{ sm}^2$ tutish kesimiga ega $E_c - 0,33\text{ eV}$ energetik sath aniqlanib, bu sath ham chuqur markazlar toifasiga kirishi ko'rsatildi [4]. Bunday markazlarning mavjudligi tashuvchilar umrining qisqarishiga hamda noideal rekombinatsiya jarayonlarining kuchayishiga olib keladi. Olingan natijalarga ko'ra, qalay (Sn) atomlarining diffuziyasi natijasida n-Si asosida nisbatan tezroq elektrostatik profil shakllanadi, ya'ni kambag'allanish qatlamining torligi va ichki elektr maydonning yuqori gradiyenti kuzatiladi. Biroq, bunday strukturada taqiqlangan zona o'rtasiga yaqin joylashgan $\sim 0,35\text{ eV}$ chuqur markazlarning hosil bo'lishi qayd etilib, ular Shockley–Read–Hall (SRH) mexanizmi bo'yicha rekombinatsiya jarayonlarini faollashtirishi mumkin. Germaniy (Ge) atomlarining diffuziyasi esa donorlarning faollashuv darajasi nisbatan past bo'lishi, shuningdek, $\sim 0,33\text{ eV}$ chuqur markazlarning mavjudligi tufayli SRH mexanizmi orqali rekombinatsiya yo'qotishlarining kuchayishiga olib kelishi aniqlandi [5]. Natijada, Ge bilan legirlangan tuzilmalarda zaryad tashish samaradorligi pasayishi hamda volt amper xususiyatlari kuchayishi ehtimoli ortadi. Ma'lumki, kremniy zamonaviy mikro- va optoelektronika sanoatining asosiy materiali hisoblanadi. Biroq uning «toza» holatdagi xossalari, xususan, bevosita bo'lmagan zonalararo o'tish, nisbatan past tashuvchi harakatchanligi hamda tashish jarayonlarining murakkab mexanizmlari tezkorlik, spektral qamrov va energiya samaradorligi bo'yicha ortib borayotgan talablarni har doim ham to'liq qondira olmaydi [6]. Shu sababli, kremniy xossalarini muhandislik yo'li bilan boshqarishning muqobil usullari, jumladan, izovalent legirlash yondashuvlariga bo'lgan qiziqish ortib bormoqda. Klassik legirlashda donor va akseptor kirishmalari orqali tashuvchilar konsentratsiyasi va solishtirma qarshilik boshqarilgan bo'lsa, IV-guruh elementlari (C, Ge, Sn, Pb) bilan izovalent legirlash texnologik va funksional nuqtayi nazardan tobora katta amaliy ahamiyat kasb etmoqda. Ushbu elementlar kremniyga izoelektron bo'lib, kristall panjara tugunlarini almashtirgan holda, birinchi yaqinlashuvda taqiqlangan zonada aniq donor yoki akseptor sathlarini hosil qilmaydi. Biroq ular zonali strukturani, elastik-deformatsiya holatini, lokal mexanik zo'riqishlarni hamda kremniyda mavjud nuqsonlar podsystemasini nozik tarzda qayta sozlaydi. Mazkur ta'sirlar natijasida kremniy asosida «kuchlanishlar injeneriyasi» (strain engineering) va «qotishma injeneriyasi» (alloy engineering) konsepsiyalarini amalga oshirish imkoniyati yuzaga keladi. Jumladan, Si/SiGe, Si–Sn, SiGeSn kabi ko'p komponentli tizimlar hosil qilish orqali zonalararo energetik tafovutni boshqarish, tashuvchilar harakatchanligini oshirish, optik yutilish spektrini kengaytirish hamda qurilmalarning funksional samaradorligini oshirish mumkin [7]. Shu jihatdan, izovalent legirlash kremniy texnologiyasining keyingi rivojlanish bosqichida muhim ilmiy va amaliy yo'nalish sifatida qaralmoqda.

Adabiyotlar:

1. Sze S.M., Ng K.K. John Wiley.Hoboken Physics of Semiconductor Devices. 2021. pp (112-115).
2. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2018. pp (418-438).
3. Blood P., Orton J.W. The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States. London: Academic Press, 2018. pp (364-367).
4. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy: A tutorial review // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. pp (220901-220911). DOI: 10.1063/1.5129079.
5. Markevich V.P., Peaker A.R. Deep-level defects in silicon // Materials Science in Semiconductor Processing. 2019. Vol. 91. pp. (1–20). DOI: 10.1016/j.mssp.2018.11.010.Акимов Ю.К. // ИТЭ. –Москва, 2007. - №1. - С. 5-34.

6. Hull R., Bean J.C. (eds.) Germanium–Silicon: Physics and Materials. 2nd ed. London: Academic Press, 2017. pp (311-325). ISBN 978-0-12-803585-6.
7. Boucart K., Niquet Y.-M. Electronic properties of strained and relaxed SiGe and GeSn alloys // Physical Review B. 2017. Vol. 95. pp. (205302-205311). DOI: 10.1103/PhysRevB.95.205302.

QUYOSH ELEMENTI FOTOELEKTRIK QUVVATIGA YORUG'LIK INTENSIVLIGINING TA'SIRI

M.A. Alinazarova¹, H.A. Mamajanova²

¹Namangan viloyati PMM, Aniq va tabiiy fanlar metodikasi kafedrasini mudiri, dotsent

²Namangan davlat texnika universiteti tayanch doktoranti

Bugungi kunda dunyo miqyosida, xususan, O'zbekistonda qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish strategik ahamiyat kasb etmoqda. An'anaviy yoqilg'i resurslarining cheklanganligi, ekologik muammolarning kuchayishi hamda energiya iste'molining ortib borishi quyosh energetikasini rivojlantirishni dolzarb masalaga aylantirmoqda. Quyosh elementlari asosida ishlovchi fotoelektrik tizimlar ekologik toza va barqaror energiya manbai sifatida keng qo'llanilmoqda.

Quyosh elementining chiqish quvvati bevosita yorug'lik intensivligiga bog'liq bo'lib, atmosferadagi o'zgarishlar, kunning turli vaqtlari, mavsumiy omillar hamda changlanish darajasi kabi tashqi ta'sirlar natijasida intensivlik doimiy ravishda o'zgarib turadi. Shu sababli fotoelektrik quvvatning yorug'lik intensivligiga bog'liqligini modellashtirish va matematik jihatdan hisoblash quyosh panellarining real ish sharoitidagi samaradorligini aniqlash uchun muhimdir.

Mazkur mavzuning dolzarbligi shundaki, modellashtirish orqali quyosh elementining volt-amper xarakteristikasini, maksimal quvvat nuqtasini va foydali ish koeffitsientini turli yorug'lik sharoitlarida oldindan prognoz qilish imkoniyati yaratiladi. Bu esa energiya tizimlarini loyihalashda, optimal ish rejimini tanlashda hamda avtomatik boshqaruv tizimlarini ishlab chiqishda ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

Shuningdek, zamonaviy raqamli va hisoblash texnologiyalaridan foydalanib fizik jarayonlarni modellashtirish ta'lim va ilmiy tadqiqot jarayonida ham katta ahamiyatga ega. Shuning uchun quyosh elementi fotoelektrik quvvatiga yorug'lik intensivligining ta'sirini modellashtirish orqali hisoblash mavzusi ilmiy, amaliy va energetik nuqtai nazardan dolzarb hisoblanadi.

Ushbu ishda quyosh elementining fotoelektrik quvvatiga yorug'lik intensivligining ta'siri nazariy va amaliy jihatdan modellashtirish asosida tahlil qilindi. Tadqiqot jarayonida yarimo'tkazgichli p-n o'tishli quyosh elementi modeli asosida yorug'lik intensivligining ortishi natijasida hosil bo'ladigan fototok, diod noideallik faktori va maksimal quvvat nuqtasining o'zgarishi aniqlandi.

Yarimo'tkazgichli QElarining xarakteristikalarini va asosiy fotoelektrik parametrlarini modellashtirish turli dasturiy mahsulotlar yoki interfaol raqamli platformalardan foydalaniladi. Masalan "PVLighthouse" tizimi turli materiallar (Si, Poly-Si, a-Si, Ge, GaAs va h.k.) asosida hosil qilingan p-n-o'tishli QElarining fotoelektrik xarakteristikalarini olishga imkon beradi [1]. Uning yordamida QEning alohida elementlarining fizik parametrlarini (legirlash darajasi, kirishma turi), konstruksion elementlar (baza, emitter, izotip qatlam, sirtiy optik qatlam, metal elektrod kabi)

geometric parametrlarini (qalinlik, kenglik kabi) va boshqa (material turi) parametrlarini o'zgartirib, QElarining spectral (optic) karakteristikalarini va VAHni hisoblash hamda natijalarni jadvallar yoki grafiklar ko'rinishida olish mumkin.

“Sentaurus TCAD” dasturiy tizimidan foydalanib, yuqoridagidek imkoniyatlarni yanada kengaytirish mumkin [2]. Jumladan bu tizimda 4 turdagi zaryad ko'chish, 3 turdagi rekombinatshiya mexanizmlarini, hamda rekombinatsiya jarayonida issiqlik ajralishini e'tiborga olib, QEning barcha karakteristikalarini va asosiy fotoelektrik parametrlarini hisoblash mumkin. Bu tizim [3] asbob-texnologik modellashtirish usuli bo'lib, uning yordamida virtual tajribalar o'tkazish mumkin. Tizimning 14ta kutubhonasiga kiritilgan ma'lumotlar bazasidagi har qanday ifodalar va raqamli ma'lumotlardan avtomat tarzda foydalanish ko'zda tutilgan.

Fotovoltaikada keng qo'llanilishi mumkin bo'lgan modellashtirish usuli sifatida “Python” dasturiy tizimini ko'rish mumkin [4]. Bu dastur juda yuqori darajali dasturlash imkoniyatlarini beradi. Shuning uchun undan turli jarayonlarni avtomatlashtirishda, yangi saytlar yaratishda, ma'lumotlarni visuallashtirishda keng foydalaniladi. “Python” dasturiy tizimi turli xil aniq ob'ektlarga qaratilib, kodlarni tizimlashtirishga va yengil o'qilishiga, jarayonlarni nisbatan oson tushunilishiga olib keladi. Kodlarni yozib ishga tushirishda hatoliklarni oson va tez topishga va uni bartaraf qilishga imkoniyat kengroqdir. Bunday dasturiy tizimning ko'plab kutubhona turidagi instrumentlari va xizmat paketlari mavjud. Alohida vizuallashtirish, grafik va diagrammalar qurish, ma'lumotlar bazasi yaratish, tezkor prototiplar ishlab chiqarish kabi imkoniyatlari bu dasturning qo'llash sohasini kengaytirib bormoqda.

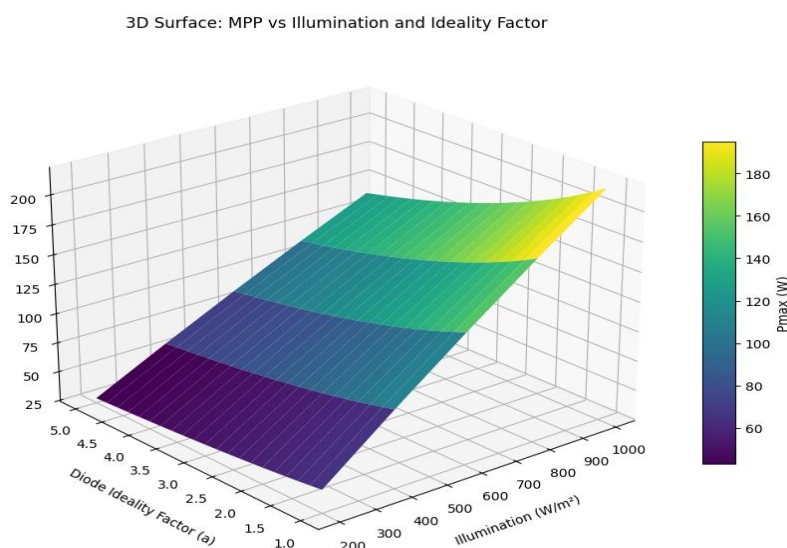
Quyosh elementining chiqish xususiyatlarining diod noideallik faktori va yorug'lik intensivligiga bog'liq o'zgarish jarayonini Python dasturlash tili yordamida modellashtirish amalga oshirildi. Buning uchun quyosh elementning “Sinton Instrument Suns-Voc” qurilmasida olingan boshlang'ich parametrlaridan foydalanildi.

Ma'lumki, real quyosh elementining VAX tenglamasi

$$I = I_L - I_s \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nkT/q} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

ko'rinishga ega, bu yerda $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K - Boltsman doimiysi, $T=300$ K, $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ Kl, n - noideallik ko'effitsiyenti, I_L - fototok, I_s - to'yinish toki, R_s - ketma-ket qarshilik, R_p - parallel qarshilik.

“Python” dasturi imkoniyatlaridan foydalangan holda Quyosh elementi ishlab chiqargan fotoelektrik quvvatiga yorug'lik intensivligining bog'lanishi aniqlandi. Xususan, nurlanish intensivligining va diod noideallik faktorining o'zgarishini QE tomonidan ishlab chiqilayotgan fotoelektrik energiya quvvatiga ta'siri modellashtirish orqali hisoblandi. Natijalar 1 - rasmdagi grafik shaklida ifodalandi.



1 - rasm. Quyosh elementi ishlab chiqqan fotoelektrik quvvatining yoritish intensivligi va noideallik koeffitsiyentiga bog'lanish grafigi.

1 - rasmdagi 3 o'lchamli grafikdan ko'rishimiz mumkinki, yorug'lik intensivligining va diod noideallik faktorining ortishi bilan QE tomonidan ishlab chiqilayotgan maksimal quvvat kamayib boradi.

Xulosa qilib shuni aytishimiz mumkinki, Maksimal quvvatning nur intensivligiga bog'liqligi diod noideallik faktoriga nisbatan keskinroqdir. Yuqori nur intensivligida diod noideallik faktori ham chiqish quvvatiga kuchliroq ta'sir etadi.

Olingan natijalar quyosh panellarini samarali ishlatish, ularning optimal ish rejimini tanlash hamda energetik ko'rsatkichlarini prognozlashda muhim ahamiyat kasb etadi.

Mazkur tadqiqot qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish samaradorligini oshirishga, xususan, fotoelektrik tizimlarning nazariy asoslarini tahlil qilishga xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yhati:

1. С.Зайнабидинов, Р.Алиев, М.Муйдинова. Особенности поглощения излучения в кремнии с поверхностной текстурой и его влияние на свойства фотоэлектрических преобразователей. // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE), 2019, № 28-33 (312-317). <https://www.doi.org/10.15518/isjaee.2019.28-33.018-025> ISSN 1608-8298 (Print)
2. J.J.G'ulomov, R.Aliev, J.I.Qahhorov, B.R.Tursunov. Suns-Voc Characteristics of Silicon Solar Cell: Experimental and Simulation Study. // Journal of nano- and electronic physics, 2023, Volume 15, Issue 2, (1-5 pp.), DOI: 10.21272/jnep.15(2).02019
3. Зализный Д.И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink//Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63. № 6. С. 515-525.
4. Muhammad Naveed Akhter, Saad Mekhilef, Hazlie Mokhlis, Noraisyah Mohamed Shah Review on forecasting of photovoltaic power generation based on machine learning and metaheuristic techniques. // 27 March 2019. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5649> (<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-rpg.2018.5649>)

РАМАН-СПЕКТРОСКОПИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ p-ТИПА ПОСЛЕ ДИФФУЗИИ СЕРЕБРА

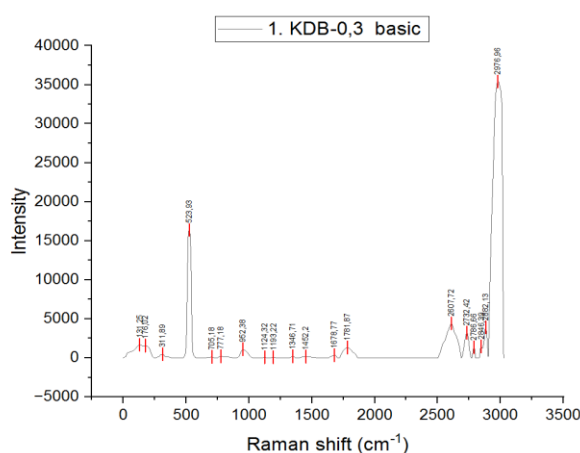
С. Абдураимов

*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при
Национальном университете Узбекистана Узбекистан, 100057, Ташкент,*

ул. Янги Алмазар, 20

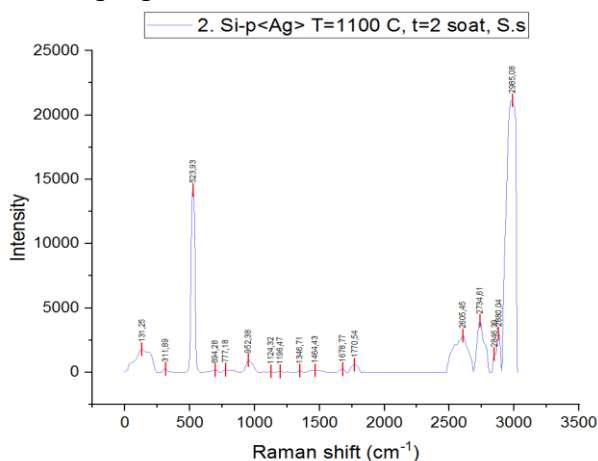
samaraabduraimov4@gmail.com

После термической обработки образцы кремний–серебро были проанализированы с использованием Раман-спектрометра с длиной волны возбуждения 785 нм. Изначально спектральному анализу был подвергнут химически очищенный образец кремния p-типа (см. рисунок 1).



**Рисунок 1. Рамановский спектр исходного образца с проводимостью
 $\sigma = 0.45 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$.**

Для изучения взаимодействия между кремнием и серебром также был получен Рамановский спектр образца кремния с внедрённым серебром (рисунок 2). На поверхности были зафиксированы фазовые превращения.



**Рисунок 2. Спектральный анализ образца кремния p-типа с
диффузированным серебром после 2 часов диффузии при температуре $T = 1373 \text{ K}$.**

Для выявления различий между исходным образцом и образцами с диффузированным серебром их спектры были наложены друг на друга, а соответствующие участки спектров увеличены (рисунки 3а, 3б, 3с и 3д).

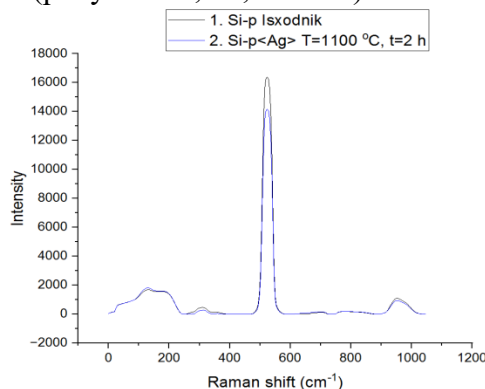


Рисунок 3а. Наложение полных Рамановских спектров исходного и образца с диффузированным серебром.

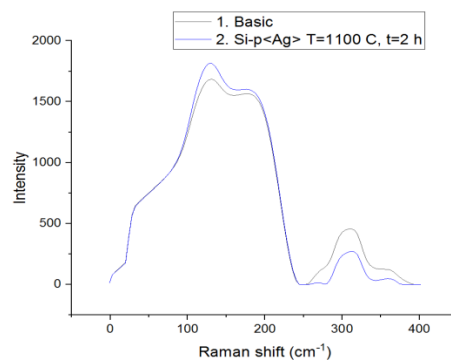


Рисунок 3б. Увеличенное изображение спектральной области до 400 см⁻¹.

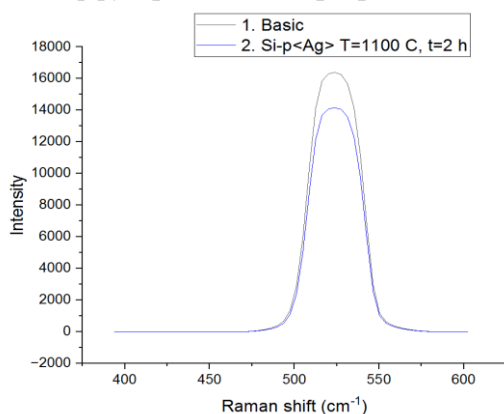


Рисунок 3с. Увеличенное изображение спектральной области от 400 см⁻¹ до 600 см⁻¹.

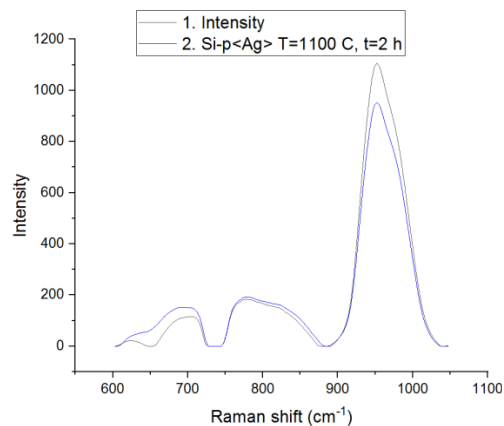


Рисунок 3д. Увеличенное изображение спектральной области от 600 см⁻¹ до 1150 см⁻¹.

Эти изменения демонстрируют, что внедрение серебра в кремний р-типа приводит к увеличению аморфной области и снижению кристалличности. Кроме того, проводимость изменилась с 0,4 до 0,56 Ом⁻¹•см⁻¹. Хотя увеличение аморфной фазы в кремнии может вызывать определённые отрицательные эффекты, оно также обладает рядом преимуществ, особенно при использовании в конкретных технологических процессах и устройствах. Ниже приведены некоторые потенциальные преимущества увеличенной аморфной области: Низкая стоимость производства. Аморфный кремний дешевле в производстве, чем кристаллический, поскольку не требует высокотемпературной обработки или сложной кристаллизации. Эта экономичность особенно важна для массовых применений, таких как базовые солнечные панели и сенсоры [1]. Гибкость. Аморфный кремний широко используется в тонкоплёночных технологиях. Его гибкая природа делает его подходящим для изгибаемых устройств, таких как гибкие солнечные элементы и дисплеи. В отличие от жёсткого и хрупкого кристаллического кремния, аморфный кремний позволяет создавать конструкции разнообразных геометрических форм. Высокая способность к поглощению света. Аморфный кремний обладает сильными светопоглощающими характеристиками, что делает его эффективным для преобразования солнечной энергии. В тонкоплёночных солнечных панелях солнечный свет эффективно поглощается и преобразуется в

электрическую энергию даже при использовании небольшого количества материала. Низкие энергозатраты на производство. Производство аморфного кремния требует меньше энергии по сравнению с кристаллическим кремнием, что важно при разработке экологически чистых технологий. Высокая чувствительность к свету. Благодаря эффективному поглощению света аморфный кремний используется в фотодетекторах и фотонных устройствах, где он повышает светочувствительность и скорость отклика. Простота и широта технологического применения. Аморфный кремний используется в повседневных электронных устройствах, таких как ЖК-дисплеи, базовые солнечные панели, светодиодные системы и другие осветительные технологии благодаря лёгкости его интеграции [2]. Простота создания сложных структур. Его можно легко наносить методами распыления или покрытия, что позволяет формировать крупноразмерные структуры. Хотя его низкий атомный порядок ограничивает применение в некоторых высокоэффективных устройствах по сравнению с кристаллическим кремнием, его экономичность, гибкость и экологичность делают его особенно подходящим для солнечных панелей, гибкой электроники и лёгких технологий.

Результаты Раман-спектроскопии: Раман-спектральный анализ показал внедрение атомов серебра в поверхность кремния. В результате взаимодействия с серебром появились новые пики, указывающие на фазовые превращения в кремний-серебряной композиции.

В данной работе было рассмотрено высокоэффективное очищение поверхности кремния и анализ изменений, происходящих после термической обработки с серебром. Полученные результаты показывают, что: Высокоочищенная поверхность кремния создаёт благоприятные условия для атомной диффузии серебра; Раман-спектроскопия оказалась эффективным методом для выявления взаимодействий между кремнием и серебром, подтвердив формирование новых химических фаз.

Эти результаты являются значимыми для углублённого понимания взаимодействий между монокристаллическим кремнием и металлами в области электроники и материаловедения [3].

Литература:

1. Грин М. А. *Кремниевые солнечные элементы: продвинутые принципы и практика*. Центр фотоэлектрических устройств и систем, Университет Нового Южного Уэльса, 1995.
2. Стрит Р. А. *Водородсодержащий аморфный кремний*. Кембриджский университет, 1991.
3. Павези Л., Локвуд Д. Дж. (ред.). *Кремниевая фотоника*. Издательство Springer, 2004.

OXYGEN PRECIPITATION DISTRIBUTION IN SILICON DURING HIGH-TEMPERATURE THERMAL ANNEALING

R.R. Burkhonov¹, G.Sh. Ochilova²

*Nanotechnology Development Center, National University of Uzbekistan
National University of Uzbekistan, Physics Program*

Samples subjected to high-temperature pre-annealing exhibit a stable increase in oxygen precipitation, which depends on the annealing time and temperature. Measurements of the density of oxygen precipitates indicate that oxygen deposition within the wafer is non-uniform, reaching

peaks near the surfaces and a minimum in some regions of the sample. High annealing temperatures lead to the formation of defects that serve as precursors for the subsequent nucleation and growth of oxygen precipitates [6,7]. Previous studies [1] have shown that the suitable temperature range for the growth of oxygen precipitates is from 870 to 1100°C, since in this range the formation and dissolution of oxygen precipitate nuclei is minimized [2].

In this work, we studied the process of enhancing the kinetics of oxygen precipitation due to vacancy injection at high temperatures in polished silicon wafers with a resistance in the range of $\rho = 10\text{-}20 \text{ } \Omega \text{ cm}$. The initial concentration of interstitial oxygen in the sample was measured using a Fourier transform infrared spectrometer and was found to be $7.7 \times 10^{17} \text{ at cm}^{-3}$. The sample was subjected to rapid thermal annealing in an argon atmosphere at temperatures from 850 to 1250°C for times from 1 to 45 s, depending on the temperature.

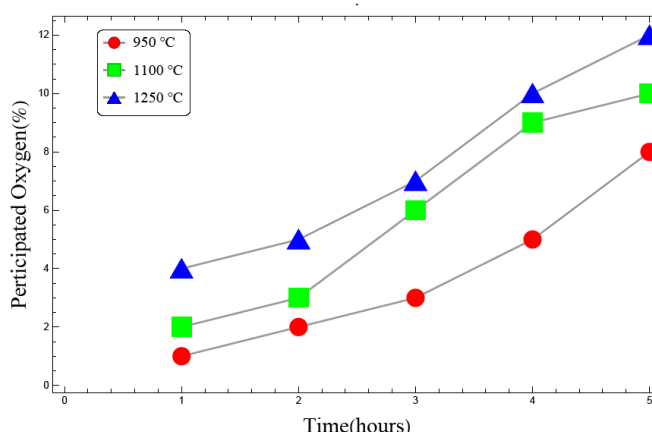


Fig. 1. Dependence of the density of precipitates on the time of heat treatment at 1250°C for 45 s in an argon atmosphere.

Cooling rates of about 55°C/s were used. Samples treated by the rapid thermal annealing method were subjected to a two-stage treatment consisting of 5 h at 850°C and 18 h at 1150°C in an argon atmosphere. The residual oxygen concentration and the oxygen precipitate density were measured by etching cleaved cross-sections of the samples with an etching solution. The dependence of the precipitated oxygen concentration on the pre-annealing time at different temperatures was recorded by counting defects under an optical microscope at 800x magnification [3,6,7]. Typical oxygen precipitate density depth profiles for three different annealing times at 1250°C are shown in Fig. 1. A significant increase in oxygen precipitation was observed with increasing heat treatment time. This increase also strongly depends on the relative value of the heat treatment temperature. Cross-section etching showed that this increase in oxygen precipitation is not uniform throughout the entire thickness of the sample: the precipitation density increases throughout the entire thickness of the wafer, and density peaks are observed near each of the surfaces.

The data in Fig. 1 show that short heat treatment times above 1050 °C are extremely effective in increasing oxygen precipitation during subsequent treatment at 850/1150 °C. Subsequent annealing at 900 °C for 4 hours and at 1100 °C for 16 hours prevents additional crystal nucleation and, under normal conditions, has an effect solely on the growth of existing nuclei (Fig. 2). Thus, we can state that high-temperature heat treatment creates a new type of defects that can be, at least partially, stabilized as oxygen precipitate nuclei during treatment at 850/1150 °C. We will refer to these defects as high-temperature nuclei to clearly distinguish them from the nuclei into which

they transform, as well as from the nuclei formed at a lower temperature and themselves precipitated [4,5,8].

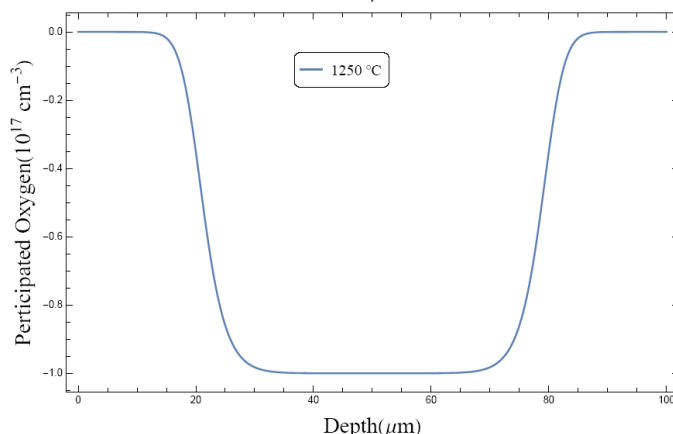


Fig. 2. Precipitate density distribution profile by depth after heat treatment at 1250°C for 45 s in an argon atmosphere.

Currently, the nature of these defects is not fully understood; there is experimental data indicating a correlation with the argon environment during high-temperature processing. It is known that many of the observed phenomena of oxygen kinetics in silicon can be described within the framework of the classical theory of homogeneous nucleation [1,2] and diffusion-limited growth [3,4]. However, recently, numerous heterogeneous effects on oxygen nucleation have been observed: high concentrations of dopants, as well as the concentration of carbon or a silicon layer on the back side of the wafers, can significantly affect the kinetics of oxygen precipitation. Increased oxygen precipitation has also been observed near surfaces with a high density of oxidation-induced stacking faults. In all these situations, the role of internal point defects appears to be significant.

Thus, this study experimentally investigated the distribution of oxygen precipitation density in silicon wafers subjected to rapid thermal annealing in an argon atmosphere at temperatures ranging from 850 to 1250°C. It was determined that the precipitation density increases throughout the entire sample thickness, with density peaks observed near each surface and a significant increase in oxygen precipitation, unevenly distributed throughout the sample thickness, with increasing heat treatment time.

Literature:

1. F.S. Ham, J. Phys. Chem. Solids 6, 335 (1958).
2. P. Fraundorf et al., J. Appl. Phys. 58, 4049 (1985).
3. Y. Yamanaka, Jpn. J. Appl. Phys. 31, 2519 (1992).
4. G. Borionetti et al., ASTM STP 990, 1989.
5. L. Fu, D. Yang, X. Ma, G. Yang, Q. Duanlin. Journal of Semiconductors, 2007.
6. X. Zhang et al., Materials Science in Semiconductor Processing, 2018.
7. Z. Li et al., Journal of Crystal Growth, 2024.
8. Y. Wang et al., Materials Science in Semiconductor Processing, 2025.

II ШЎБА. МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ВА ЭЛЕКТРОТЕХНИКА МУАММОЛАРИ

YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASIDA CHUQUR SATHLAR PARAMETRLARINI ANIQLASHDA ARRENIUS GRAFIGINING O‘RNI

X.S. Daliyev^a, F.F. To‘yboyev^a, B.O. Abduraximova^b

^aO‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O‘zbekiston.

^bMirzo Ulug‘bek nomidagi O‘zbekiston Milliy universiteti
fazliddinjon08088@gmail.com

So‘nggi yillarda aralashmalarning o‘zaro ta‘sirini o‘rganish yarimo‘tkazgichlardagi chuqur markazlar fizikasining eng muhim muammolaridan biri hisoblanadi. Kremniyning taqiqlangan zonasida chuqur energetik holatlarni hosil qiluvchi aralashmalarning o‘zaro ta‘siri yarimo‘tkazgichning elektr va fotoelektrik xossalariining sezilarli darajada o‘zgarishiga, turli klasterlar va ikkinchi faza ajratmalari shakllanishiga olib kelishi mumkin [1].

Yarimo‘tkazgichli materiallar, xususan, kremniy tarkibidagi chuqur sathlarni (CHS) o‘rganish zamonaviy mikroelektronikaning dolzarb masalalaridan biridir. Chuqur sathlarning asosiy parametrlari - ionlanish energiyasi (E_a) va tutish kesimi (σ) hisoblanib, ularni aniqlashda Arrenius grafigi usuli eng ishonchli yechim hisoblanadi [2].

Arrenius tenglamasi DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) uchun

$$e_n = \gamma T^2 \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right) \quad (1)$$

- k_B bolsman doimiysi;
- e_n emmissiya tezligi;
- γ materialga xos doimiy koeffitsiyent;
- ΔE aktivlanish energiyasi (o‘tkazuvchanlik zonasi tubiga nisbatan chuqurligi);
- T^2 bu yerda kvant-mexanik hisoblar tufayli qo‘shimcha harorat koeffitsienti mavjud.

Yuqoridagi (1) – formulani logarifimlasak formula quyidagicha bo‘ladi.

$$\ln \frac{e_n}{T^2} = \ln A - \left(\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (2)$$

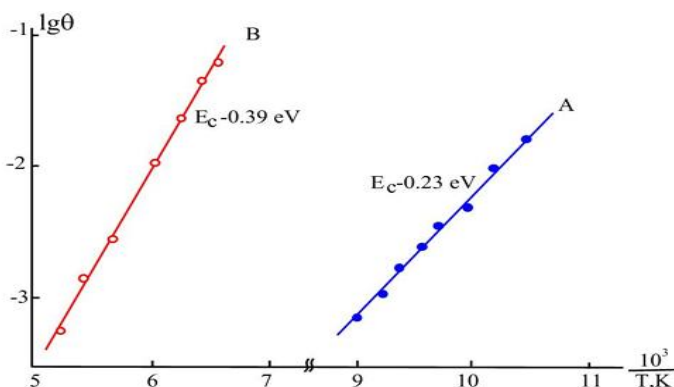
Bunda y ordinata o‘qiga $\ln \frac{e_n}{T^2}$ ni, x absissa o‘qiga $\frac{1}{T}$ deb olsak To‘g‘ri chiziq hosil bo‘ladi. Bu grafik arrenius grafigi deyiladi. Eksperiment davomida olingan natijalar asosida $\ln(e_n/T^2)$ ning $1000/T$ ga bog‘liqlik grafigi chiziladi (1-chizma). Hosil bo‘lgan to‘g‘ri chiziqning qiyaligi (tangens burchagi) to‘g‘ridan-to‘g‘ri nuqsonning ionlanish energiyasini (E_a) beradi. 1- chizma misolida “Eksperimental Arrenius grafiklari” keltirilgan. Arrenius grafigida ordinata o‘qi (Y) sifatida $-\lg(\theta)$ ning tanlanishi bejiz emas. Bu fizik jarayonning chuqur sathlarga (tuzoqlarga) bog‘liqligini ko‘rsatadi. Yarimo‘tkazgichlarda θ - bu erkin tashuvchilar konsentratsiyasining tuzoqlarda tutilgan tashuvchilar konsentratsiyasiga nisbatini ifodalovchi parametrdir.

Ya‘ni: $\theta \approx \frac{n}{n_t} \quad (3)$

Harorat ko‘tarilishi bilan tuzoqlardagi elektronlar termik energiya hisobiga ozod elektronga aylanadi.

θ koeffitsienti haroratga eksponentsial bog‘liq,

$$\theta = C \exp \frac{-\Delta E}{KT} \quad (4)$$



1-chizma. Yarimo‘tkazgichdagi chuqur sathlarning emissiya koeffitsientining haroratga bog‘liqligi.

Yuqoridagi nazariy hisoblarimizni hisobga olish uchun 1-chizmada tajriba grafiklaridan ko‘rish mumkin. 1 - chizmada yarimo‘tkazgichdagi chuqur sathlarning emissiya koeffitsientining haroratga bog‘liqligi ko‘rsatilgan. Grafikda ikki xil bo‘lmagan tuzoqlar uchun Arrenius bog‘liqligi uchun A va B markazlari mavjud ular A chiziqi (ko‘k) va B chizig‘i (qizil). Ushbu grafikdagi chiziqning og‘ish burchagi (qiyaligi) bizga chuqur sathning energiyasini (E_c) beradi. Chiziq qanchalik tik bo‘lsa, sath shunchalik chuqur bo‘ladi.

A chiziqi (ko‘k): Bu sathning aktivlanish energiyasi $E_a = E_c - 0.23$ eVga teng. Bu sath nisbatan “sayoz” bo‘lib, o‘tkazuvchanlik zonasiga yaqin.

B chizig‘i (qizil): Bu sath uchun aktivlanish energiya yuqoriroqda $-E_a = E_c - 0.39$ eVga tengligini ko‘rishimiz mumkun [3].

Tajriba natijalarining Arrenius grafigidagi tahlili shuni ko‘rsatadiki, o‘rganilayotgan namunalarda ikki xil chuqur sath mavjud. Grafikning qiyaligi bo‘yicha hisoblangan ionlanish energiyalari $E_c - 0.23$ eV va $E_c - 0.39$ eV ga teng. To‘g‘ri chiziqlarning chiziqlilik darajasi yuqoriligi ushbu markazlarning termik aktivlanish xarakteriga ega ekanligini va Arrenius qonuniyatiga to‘liq bo‘ysunishini isbotlaydi [3].

Yuqoridagi chizmadan ko‘rinadiki Arrenius garfigi taqiqlangan zonadagi chuqur sathlarning joylashuvi, nuqsonning tabiati, rekombinatsion markazni va namuna tipini (p,n) aniqlashda yordam beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati:

1. Daliyev X.S., Lebedev A.A. Legirlangan yarimo‘tkazgichli materiallarning xossalari. – M.: Nauka, 1990.
2. Zaynabidinov S.Z., Daliyev X.S. Kremniyda nuqsonlarning hosil bo‘lishi. – Toshkent: Universitet, 1993.
3. Sharifa B. Utamuradova, Khojakbar S. Daliev, Shakhrukh Kh. Daliev, Uktam K. Erugliev. Capacitive Spectroscopy Of Deep Levels In Silicon With Samarium Impurity. East European Journal Of Physics. 2023.

OPTOELECTRONIC DEVICE FOR MONITORING DUST ON PHOTOELECTRIC MODULE SURFACES

O.Kh. Kuldashov, D.O. Nabiev

*Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics Republic of
Uzbekistan, Tashkent*

Solar energy is increasingly becoming an important renewable and environmentally friendly source of energy in modern energy systems. Factors such as environmental pollution, global warming, and the depletion of traditional fuel resources are increasing the need for sustainable technologies in energy production. From this perspective, photovoltaic technologies have great potential to ensure energy security, reduce carbon footprints, and increase economic efficiency. [1].

However, the actual efficiency of solar panels depends on a number of external factors, among which dust accumulation on the surface is noted as one of the most serious problems. According to scientific sources, the layer of dust on the surface of the panels acts as an optical barrier, significantly reducing the amount of light reaching the photovoltaic elements. This, in turn, leads to a decrease in the useful work coefficient in photovoltaic plants [2].

Studies have shown that dust accumulation can reduce the output power of a panel by 5-30% within a few days, and this figure is likely to be even higher for panels that have not been cleaned for a long time. Especially in regions with dry and windy climates, the level of dust accumulation increases sharply, further reinforcing the need for regular maintenance of photovoltaic installations. Therefore, monitoring, detecting and developing effective cleaning methods for dust accumulation on the surface of solar panels is one of the most relevant scientific and technical directions in the field of photovoltaics. In this regard, the possibility of assessing the efficiency of panels in real time is expanding through the use of optoelectronic methods, spectral analysis methods and automated monitoring systems.

A single-wave two-channel optoelectronic device was developed to control dust accumulation on the surface of solar panels. Its operation is based on the comparison of optical radiation intensities passing through a transparent glass placed next to the panel and an open space..

The photoelectric module is an optoelectronic device designed to detect dust on the surface (Fig. 1), which includes a generator 1, two infrared emitting diodes (LED1, LED2) and photodiodes (FD1, FD2), comparators 2 and 3, a photoelectric signal processing unit 4, an indicator 5 and a transparent glass 6.

During the research, the proposed single-wavelength, two-channel optoelectronic device for detecting dust accumulation on the surface of solar panels was tested in laboratory and natural lighting conditions. The measurements were carried out by comparing the radiation flux passing through transparent glass and the reference radiation intensities received directly in the open air. The experimental results showed that the difference between the signals received from the photodiodes increases with the formation of a dust layer on the glass surface. In cases where the amount of dust is small, the values of the signals of both channels are close to each other, and the difference is kept to a minimum. As a result of the increase in the dust layer on the surface, the radiation intensity recorded by the photodiode under the transparent glass decreases significantly.

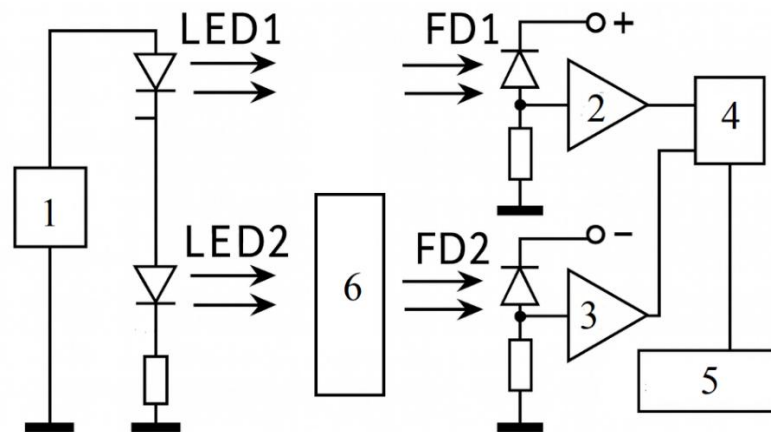


Figure 1. Block diagram of the optoelectronic device for detecting dust on the photovoltaic module surface.

According to the measurement results, it was observed that the relative difference between the photoelectric signals increases proportionally with the increase in the level of dust on the surface. This confirms that the device is capable of accurately and stably recording dust accumulation. The results obtained show that the proposed optoelectronic method is effective in monitoring dust on the surface of solar panels. The proposed two-channel optoelectronic method is a convenient and reliable solution for real-time monitoring of dust accumulation on the surface of solar panels. The main advantage of the method is the ability to reduce the influence of external lighting changes by comparing the radiation transmitted through transparent glass with the reference radiation flux in the open space.

Compared to traditional methods, the proposed device allows to achieve high accuracy based on relatively simple elements, without requiring complex spectral analysis equipment. Also, the use of infrared light-emitting diodes increases the stability to external influences and ensures repeatability of measurements. The important point is that this optoelectronic method is maximally approximated to the constructive glass surface of solar panels, and the measurement results correspond to practical operating conditions. This allows for timely planning of cleaning work, reducing operating costs and increasing the overall energy efficiency of photovoltaic systems. At the same time, in the future, it is possible to further expand the possibilities of integrating the device with automatic cleaning systems.

Based on the principle of comparison of radiation intensities measured through transparent glass and in open space, the proposed device made it possible to record the dust level in a reliable and stable manner. The obtained results confirmed that the device has high accuracy in practical operating conditions and is an effective solution for increasing the efficiency of solar panels and organizing cleaning processes in a timely manner..

Literature:

1. Hassan A., Rahoma U.A., Elminir H. K., and A. Fathy, "Effect of airborne dust concentration on the performance of PV modules" // J. Astron. Soc. Egypt. vol. 13, no. 1, pp. 24-38, 2005.
2. Perez-Anaya, E.; Elvira-Ortiz, D.A.; Osornio-Rios, R.A.; Antonino-Daviu, J.A. Methodology for the Identification of Dust Accumulation Levels in Photovoltaic Panels Based in Heuristic-Statistical Techniques. //Electronics 2022, 11, 3503. <https://doi.org/10.3390/electronics11213503>.

$n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$ EPITAKSIAL QATLAMLARI ELEKTR O'TKAZUVCHANLIGINING AKTIVLANISH ENERGIYASI

A.S. Saidov, Sh.N. Usmonov, O.Z. Turg'unov*

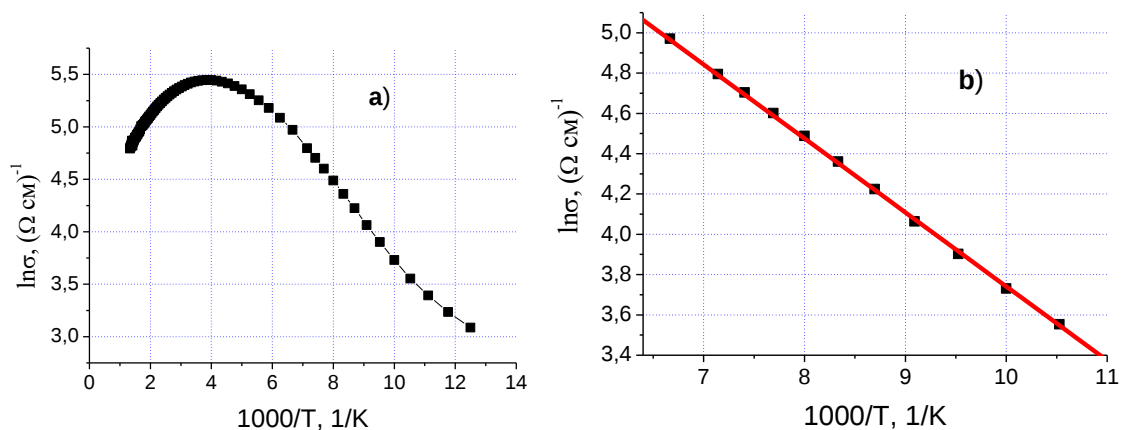
O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi S.A. Azimov nomidagi fizika-texnika instituti

*otabeksemicon@gmail.com

Ushbu ishda suyuq fazali epitaksiya usuli bilan olingan $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$ epitaksial plyonkalarida solishtirma elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi tadqiq qilindi. Tajriba Van der Pauw [1] metodi orqali HMS 7000 Hall effect measurements system qurilmasida 80 K dan 750 K gacha bo'lgan intervalda olib borildi (1-a) rasm). Namunaga omik kontakt material sifatida Ag va kontaktni mexanik ta'sirlardan himoya qilish uchun Ni ishlatildi. Yarimo'tkazgich materiallarda elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi zaryad tashuvchilarning konsentratsiyasi va ularning harakatchanligi bilan belgilanadi. Shu sababli temperaturaning o'zgarishi materialdagi zaryad tashish mexanizmlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Xususan yarimo'tkazgichlarda elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligidan o'tkazuvchanlikning aktivlanish energiyasini aniqlash mumkin [2]. Tajriba natijalari elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi keng 71temperature intervalida aktivatsion xarakterga ega ekanligini ko'rsatdi. Aktivatsion mexanizm yaqinlashuvida elektr o'tkazuvchanlik quyidagi eksponensial bog'lanish bilan ifodalanadi

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (1)$$

bu yerda σ_0 – temperaturaga chiziqli bog'liq bo'lmagan koeffitsient, E_a – aktivlanish energiyasi, k – Boltsman doimiysi, T – 71emper 71emperature.



1-rasm. $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$ namunasi solishtirma elektr o'tkazuvchanligini haroratga bog'liqligi a) – logarifimik va $1000/T$ o'qlarda, b) – grafikning chiziqli ekstrapolyasiyalangan qismi.

Elektr o'tkazuvchanlikning aktivlanish energiyasini aniqlash uchun Arrhenius koordinatalarida $\sigma = f(1/T)$ funksiya grafigi yasaladi (1-b) rasm). Grafikning chiziqli qismi elektr o'tkazuvchanlik bitta asosiy aktivatsion mexanizm bilan aniqlanadigan temperatura intervaliga mos keladi. Mazkur chiziqli qismning qiyaligidan aktivlanish energiyasi hisoblab topildi. Hisoblash natijalariga ko'ra epitaksial qatlam uchun aktivlanish energiyasi $E_a \approx 32 \text{ meV}$ ga teng ekanligi aniqlandi. Ushbu qiymat donor aralashma markazlarining ionlanish energiyasiga mos keladi. Bu holat tadqiq etilayotgan plyonkada elektron tipdagi o'tkazuvchanlik mavjudligini ko'rsatadi. Past temperaturalar sohasida donor markazlarining bir qismi ionlashmagan holatda

bo'lib, bunda zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi kichik qiymatga ega bo'ladi. Temperatura ortishi bilan donor atomlari asta-sekin ionlashadi va erkin elektronlar konsentratsiyasi ortadi, natijada elektr o'tkazuvchanlik ham ortadi. Shunday qilib, olingan natijalar $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$ epitaksial plyonkalarida elektr o'tkazuvchanlikning temperaturaga bog'liqligi donor markazlarning termik ionlanishi bilan belgilanishini ko'rsatadi. Aniqlangan aktivlanish energiyasi materialdagi asosiy donor sathining energetik chuqurligini tavsiflaydi va yarimo'tkazgichning past hamda o'rta temperatura sohalaridagi elektr xossalari tushuntirishga imkon beradi.

Adabiyotlar:

1. L.J. van der Pauw. A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape. Philips res. Repts 13,1-9,1958.
2. D.D. Nedeoglo et al. Electrical properties of n-type epitaxial GaP layers. Phys. Stat. sol. (a) 36, 659 (1976).

ISSIQXONALAR UCHUN YORUG'LIK DIODLI FITONURLANTIRGICH

S.Q. Qarshiyev

Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti O'zbekiston, Toshkent sh, Yangi Olmazor ko'chasi 20 uy. 100069
e-mail: suxrobqarshiyev1003@gmail.com

Hozirgi kunda sun'iy yoritish sharoitida o'simliklarni yetishtirish zamonaviy agrar va biotexnologik rivojlanishning muhim yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Ushbu yo'nalish ko'plab mamlakatlarda haydaladigan yer maydonlarining kamayib borishi va iqlim omillarining o'zgarishi sharoitida oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlash hamda barqaror qishloq xo'jaligi mahsulotlarini ishlab chiqarishini yo'lga qo'yishning strategik vositasi sifatida qaralmoqda [1].

Himoyalangan yer sharoitida o'simliklarni yetishtirish samaradorligini belgilab beruvchi eng muhim parametrlardan biri yoritish tizimi hisoblanadi. Yorug'lik nafaqat fotosintez uchun asosiy energiya manbai, balki o'simliklarning morfogenezi, biokimyoviy jarayonlari va mahsuldorligini boshqaruvchi muhim omil hisoblanadi. So'nggi o'n yilliklarda LED texnologiyalarining jadal rivojlanishi kuzatilmoqda. Bu esa an'anaviy yoritish manbalari (cho'g'lanma lampalar, natriy va lyuminessent lampalar)dan energiya tejamkor, nurlanish spektrini boshqarish imkoniyatiga ega bo'lgan tizimlarga o'tishga olib keldi. Yangi avlod svetodiodli fitonurlantirgichlar fotosintetik faol radiatsiya diapazonida (400–700 nm) spektrni aniq shakllantirish imkonini beradi va bu fotosintez, o'simliklarning vegetativ o'sishi hamda gullashi uchun optimal sharoitlarni ta'minlaydi [2].

O'zbekiston Respublikasi sharoitida issiqxonalar qishloq xo'jaligining ustuvor va jadal rivojlanayotgan tarmoqlaridan biri hisoblanadi. Tarmoq statistikasi ma'lumotlariga ko'ra, mamlakatdagi issiqxonalarning umumiy maydoni taxminan 6,5 ming gektarni tashkil etadi. Ularning taxminan 1,1 ming gektari (17 %) gidroponika qurilmalariga, 4,9 ming gektari (83 %) esa tuproq substratiga asoslangan issiqxonalarga to'g'ri keladi. Bu ko'rsatkichlar tarmoqning yuqori intensivlikda rivojlanayotganini ko'rsatadi va mikroiklimni boshqarish hamda sun'iy yoritish tizimlari bilan integratsiyalashgan energiya tejamkor komplekslarini ishlab chiqish zarurligini tasdiqlaydi [3].

Shu sababli, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanish bilan birga issiqxonalarda yoritish parametrlarini takomillashtirish O'zbekistonda agroinjenerlik texnologiyalarini rivojlantirishning ustuvor yo'nalishlaridan biri hisoblanadi.

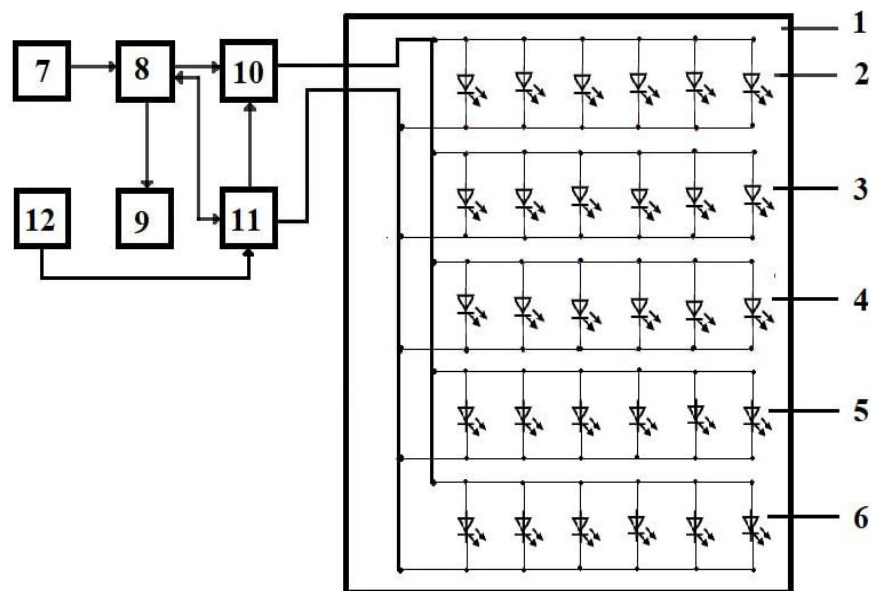
Ishlab chiqilgan fitonurlantirgich pomidorlarni fotosintetik yoritish uchun mo'ljallangan. Qurilma konstruksiyasi korpusdan (1) iborat bo'lib, uning ichida turli spektral diapazonda nurlanuvchi yorug'lik diodlar majmuasi joylashtirilgan. Bu nurlanish 410-800 nm diapazonida uzluksiz spektrni shakllantirib, fotosintetik faol radiatsiya sohasiga mos keladi.

Fitonurlatgich tarkibiga quyidagilar kiradi:

- ko'k yorug'lik diodlar (2) - nurlanish to'liq uzunligi 410–500 nm;
- qizil yorug'lik diodlar (3) - 600-650 nm diapazonda;
- chuqur qizil yorug'lik diodlar (4) – 650-700 nm diapazonda;
- uzoq qizil yorug'lik diodlar (5) – 700-800 nm diapazonda;
- lyuminoforli ko'k yorug'lik diodlar (6) - qayta nurlanish maksimumi spektrning yashil sohasida (500-600 nm). Qurilmaning elektr ta'minoti quyosh fotoelektr moduli (7) orqali zaryad kontrolleri (8) va akkumulyator batareyasi (9) yordamida amalga oshiriladi. Bu esa markazlashgan elektr ta'minoti mavjud bo'lmagan sharoitlarda tizimning avtonom va mavsumiy barqaror ishlashini ta'minlaydi. Eksploatatsiya jarayonida parametrlarni barqarorlashtirish uchun yorug'lik diod drayveri (10) qo'llaniladi. U doimiy harorat rejimida ishlab, yoritish parametrlarining uzoq muddat barqarorligini ta'minlaydi.

Mikrokontroller (11) o'simliklarning o'sish va rivojlanish bosqichiga qarab har bir spektral guruh yorug'lik diodlarining nurlanish intensivligini ± 2 % aniqlikda boshqaradi.

1-rasmda yorug'lik diodli fitonurlantirgichning blok-sxemasini keltirilgan.



1. Yorug'lik diodli fitonurlantirgichning blok-sxemasini

O'tkazilgan tadqiqotlar natijasida issiqxona sharoitida o'simliklarni samarali yoritish uchun mo'ljallangan energiya tejamkor yorug'lik diodli fitonurlantirgich ishlab chiqildi. Taklif etilgan qurilma fotosintetik faol radiatsiya diapazonida (410–800 nm) nurlanishni ta'minlovchi ko'p spektrli yorug'lik diodlar majmuasidan tashkil topgan bo'lib, o'simliklarning fotosintez jarayonini faollashtirish, vegetativ o'sishini tezlashtirish va mahsuldorligini oshirishga xizmat qiladi. Qurilmada ko'k, qizil, chuqur qizil va uzoq qizil diapazondagi svetodiodlarning birgalikda qo'llanilishi o'simliklarning biologik ehtiyojlariga mos spektral tarkibni shakllantirish imkonini

beradi. Tizimning quyosh fotoelektr moduli, zaryad kontrolleri va akkumulyator batareyasi orqali ta'minlanishi uni avtonom va energiya tejamkor holda ishlashini ta'minlaydi.

Shu tariqa, ishlab chiqilgan fitonurlantirgich issiqxona o'simlikchiligida sun'iy yoritishning energiya tejamkor, boshqariladigan va yuqori samarali tizimini yaratish imkonini beradi hamda O'zbekiston sharoitida zamonaviy agroinjenerlik texnologiyalarini rivojlantirishga xizmat qiladi.

Adabiyotlar:

1. Mironyuk S.S., Smirnov A., Sokolov A., Proshkin Y. Optimization of spectral composition and energy economy effectiveness of phyto-irradiators with use of digital technologies // Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development. IGI-Global. 2020. Pp. 191-212.
2. D. Bisht, D. Kumar, D. Kumar, K. Dua, D.K. Chellappan Phytochemistry and pharmacological activity of the genus artemisia Arch. Pharm. Res., 2021. 44. pp. 439-474.
3. D.K. Kwon, J.M. Myoung. Wearable and semitransparent pressure-sensitive light-emitting sensor based on electrochemiluminescence ACS Nano. 2020.14. pp. 8716-8723.

MODELING THE CHARACTERISTICS OF A FIELD-EFFECT TRANSISTOR WITH A QUANTUM DOT ARRAY CHANEL

A.R. Khudaybergenov

PhD Student, Karakalpak State University

abdumuxammedxudaybergenov@gmail.com

This study considered numerical modeling study of a field-effect transistor (FET) with an array of quantum dots (QDs) forming a channel. Utilizing the Coulomb blockade effect and the density of states in the QD array, we investigate how quantum dot size distribution affects the current-voltage characteristics. Simulations show how the accuracy of distribution is improved by increasing the number of particles in an array and how it affects device characteristics. This model can be used in the development of future nanoelectronic devices.

Field-effect transistors (FETs) with quantum dot channels have attracted significant attention due to their potential applications in nanoelectronics. Quantum dots (QDs) are nanoscale semiconductor particles with discrete energy levels. QDs have the ability to exhibit quantized transport effects and Coulomb blockade when placed in an array between source and drain electrodes. These effects have a significant impact on the characteristics of the device.

This study focuses on modeling the transport properties of a FET with a QD array channel. The main objective is to understand how QD size distribution affects the current-voltage (I-V) characteristics and electron occupation numbers, providing insights for future device optimization. We consider a series of quantum dots placed between electrodes without interactions among them. The size distribution of the dots is the primary factor affecting transport. The distance between electrodes is fixed, so the effective barrier width w depends on the QD size a :

$$w = \frac{d - a}{2}, \quad \alpha = f(w) \quad (\text{delta-barrier parameter})$$

The size distribution can be modeled using a Gaussian (normal) distribution:

$$P(a) = \frac{1}{\sqrt{\pi}b} \exp\left(-\frac{(a-a_0)^2}{b^2}\right), \quad a \in [3,10] \text{ nm}$$

The density of states for a quantum dot with broadening γ is:

$$D(E) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(E-E_0)^2 + \gamma^2}$$

The Fermi functions at source (f_1) and drain (f_2) are:

$$f_1(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - eV)/kT]}, \quad f_2(E) = \frac{1}{1 + \exp(E/kT)}$$

The tunneling current through the QD array is given by:

$$I(V) = \frac{e}{2\tau} \int_{-\infty}^{\infty} D(E - U) [f_1(E) - f_2(E)] dE$$

Here, $\tau = \gamma/2\hbar$ and U includes Coulomb interaction:

$$U = \frac{1}{2}eV + U_0\Delta N, \quad \Delta N = N - N_0$$

The calculation algorithm involves the following steps:

1. Compute U_0 and N_0 for a given QD radius R :

$$U_0 \approx \frac{0.3}{R} \text{ eV} \cdot \text{nm}, \quad N_0 = \int_{-\infty}^{\infty} D(E) f_2(E) dE$$

2. Apply voltage V and solve for ΔN using Newton's method:

$$G(x) := x + N_0 - \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} D\left(E - \frac{1}{2}eV - U_0x\right) (f_1(E) + f_2(E)) dE = 0$$

3. Iterative scheme:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{G(x_n)}{\frac{\partial G}{\partial x}(x_n)}$$

4. Stop when $|x_{n+1} - x_n| < 10^{-6}$ or maximum iterations reached.

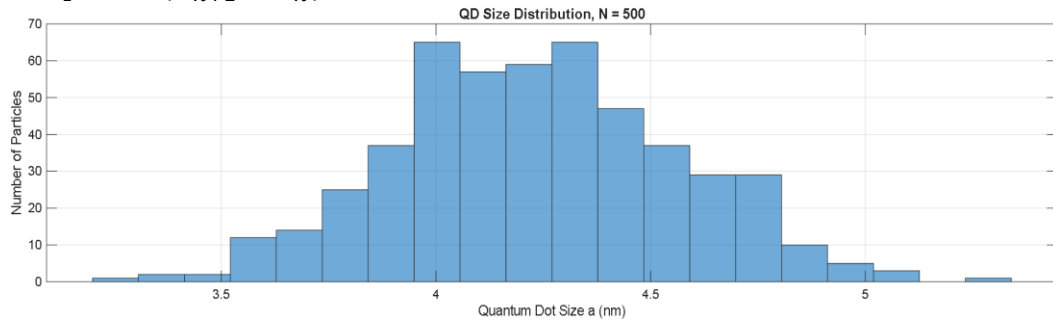


Figure 1: Quantum dot size distribution, $N = 500$ particles.

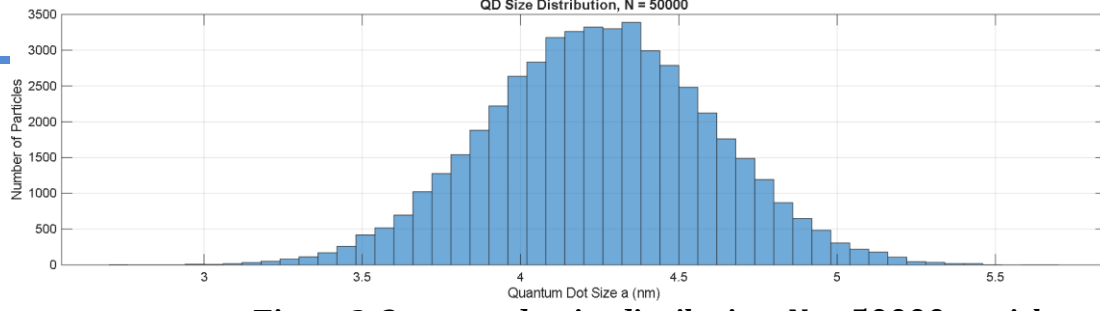


Figure 2: Quantum dot size distribution, $N = 50000$ particles.

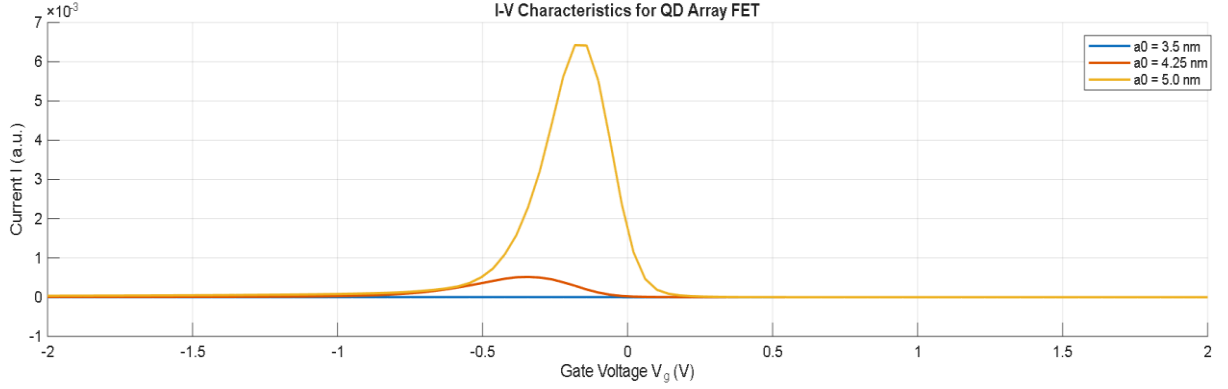


Figure 3: I–V characteristics for QD array FET with different a_0 values.

Figures 1 and 2 show the size distribution for $N_{\text{particles}} = 500$ and $N_{\text{particles}} = 50000$. Increasing the number of particles improves the symmetry and accuracy of the distribution, illustrating the law of large numbers.

Figures 1 and 2 demonstrate the statistical behavior of the quantum dot (QD) size distribution for two different ensemble sizes. For $N = 500$, noticeable fluctuations appear in the histogram, indicating insufficient statistical averaging. There is a possibility that such deviations may lead to unintended anomalies in the calculated density of states and transport characteristics. Meanwhile, the profile obtained for $N = 50000$ represents a smooth Gaussian-like shape, indicating that we are approaching the expected theoretical distribution. This result emphasizes the importance of having large ensemble sizes for reliable numerical modeling of QD arrays. The electrical transport characteristics shown in Fig. 3 clearly reveal the influence of the average QD size a_0 on device performance. As a_0 increases from 3.5 nm to 5 nm, the drain current increases significantly.

In this work, a theoretical model describing the density of states in a quantum dot array was developed by incorporating realistic size distribution and level broadening effects. The proposed method makes it possible to accurately model the electronic transport characteristics of QD-based field-effect transistors. The numerical findings show that increasing the number of particles significantly improves the statistical accuracy of the size distribution, which leads to more precise transport simulations. The calculated I–V characteristics reveal a strong dependence of device performance on the average quantum dot size. An increase in a_0 reduces quantum confinement energy and Coulomb blockade effects, thereby enhancing carrier transport through the QD array.

References:

1. L. A. A. Warnes, *Diodes*, Ph.D. dissertation, Department of Electronic and Electrical Engineering, Loughborough University of Technology, London, 1994.
2. R. Setty, “MMIC Technologies: Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor (pHEMT),” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 7, no. 5, p. 12, 2021.

3. P. A. Tove, S. A. Hyder, and G. Susila, "Diode Characteristics and Edge Effects of Metal-Semiconductor Diodes," *Solid-State Electronics*, vol. 16, no. 4, pp. 513–521, 1973.
4. A. Ghadimi Avval, E. Larique, and S. M. El-Ghazaly, "Heterojunction Field Effect Transistors," *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2018.
5. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, New York: Wiley-Interscience, 1969.
6. T. Ytterdal, Y. Cheng, and T. A. Fjeldly, *MOSFET Device Physics and Operation*, pp. 1–45, 2003.

G'OVAKLI KREMNIYNING LITIY-ION BATAREYALARNING ANOD MATERIALI SIFATIDA QO'LLANISHI ISTIQBOLLARI

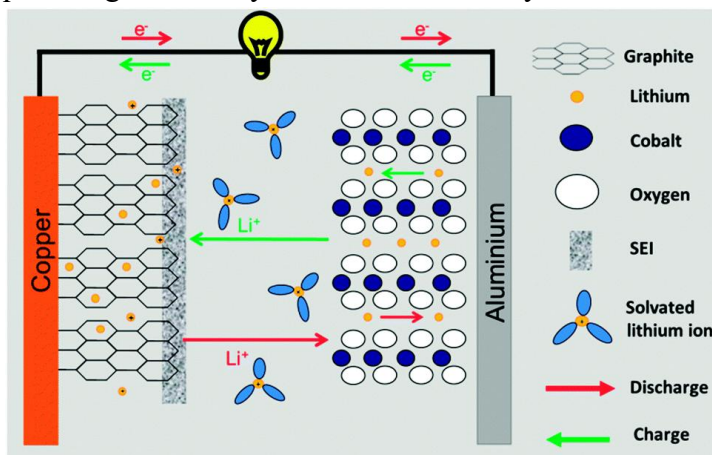
O. Inoyatov

O'zMU huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston.

Jahonda yarimo'tkazgichlar fizikasi sohasida olimlar sanoat hamkorlari bilan birgalikda litiy-ion batareyalari uchun yangi turdagi anodlarni ishlab chiqishga qaratilgan tadqiqotlarni keng doirada o'tkazmoqdalar [1].

Xususan, Baden-Vyurtemberg Quyosh energiyasi va vodorod texnologiyalari markazi (ZSW) olimlari FACILE loyihasining sanoat hamkorlari bilan birgalikda litiy-ion batareyalari uchun yangi turdagi anodlarni ishlab chiqdilar. Asosiy g'oya - an'anaviy grafitni zaryaddan bir necha barobar ko'proq saqlashga qodir bo'lgan kremniy tolalar va noto'qima tuzilmalar bilan almashtirish.

Grafit zamonaviy Li-ion akkumulyatorlari uchun standart bo'lib qolmoqda (1-rasm), ammo cheklangan xususiy sig'imga ega - taxminan 370 mA·soat/g. Olimlar nazariy jihatdan 1000 mA·soat/g va undan yuqori bo'lgan kremniy tolali anodlardan foydalanishni taklif qilmoqdalar.



1-Rasm. Litiy-ionli batareyaning tuzilishi

Kremniy anodlar uchun uzoq vaqtdan beri istiqbolli material hisoblangan, ammo zaryadlash paytida uning hajmli kengayishi strukturaning buzilishiga olib kelgan.

Hozirgi kunda jaxon miqyosida jadal rivojlanayotgan energiya tejankor materiallarni olishga qaratilgan soxada g'ovakli yarimo'tkazgichlar va yarimo'tkazgichli birikmalarni litiy-ionli batareyalarning (ularni yuqori bashorat kilinayotgan quvvat ko'rsatkichlariga (3600-4140

mA·soat/gacha) ega bulishligi mumkinligini inobatga olib) anodlari uchun material sifatida ko‘llashga qaratilgan faol tadqiqotlar olib borilmoqda. G‘ovakli yarimo‘tkazgichli materiallarni olishning istiqbolli usullaridan biri bu gidroflorik kislotaning suvli eritmalariga asoslangan elektrolitlar tarkibida monokristalli yarimo‘tkazgich plastinalargp anodli elektrokimyoviy ishlov berish texnologiyasi. Hozirgacha asosiy material sifatida monokristalli kremniy qo‘llanilmoqda. Ushbu loyihada mavjud sanoat akkumulyatorlarining quvvatini oshirish va “zaryad-razryad” siklini 1000 ga yetkazish maqsadida mualliflar monokristalli kremniydan tashqari litiy-ionli batareyalar anodi sifatida foydalanishi mumkin bo‘lgan istiqbolli turli xil fazali g‘ovakli kremniyga asoslangan materiallardan foydalanishni rejalashtirishmoqda.

G‘ovakli kremniy, turli fazalarga ega kremniy qotishmalarining qatlamlarini olish uchun elektrokimyoviy hujayra ishlab chiqilishi zarur. Olinadigan g‘ovakli materiallarni litiy-ionli batareyalarda mavjud bo‘lgan grafit anodini o‘rniga anod materiallari sifatida istiqbolli qo‘llash imkoniyatini tekshirishga oid izlanishlarni olib borish istiqbolli yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. Buning natijasida materialning solishtirma hajmining moslashuvchan kengayishi va tiklanishi tufayli batareyaning “zaryad-razryad” siklini 1000 gacha oshirishga erishish mumkin bo‘ladi.

Adabiyotlar:

1. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Электродные материалы для литий-ионных аккумуляторов нового поколения // Электрохимия. 2012. Т. 48, № 3. С. 362368.

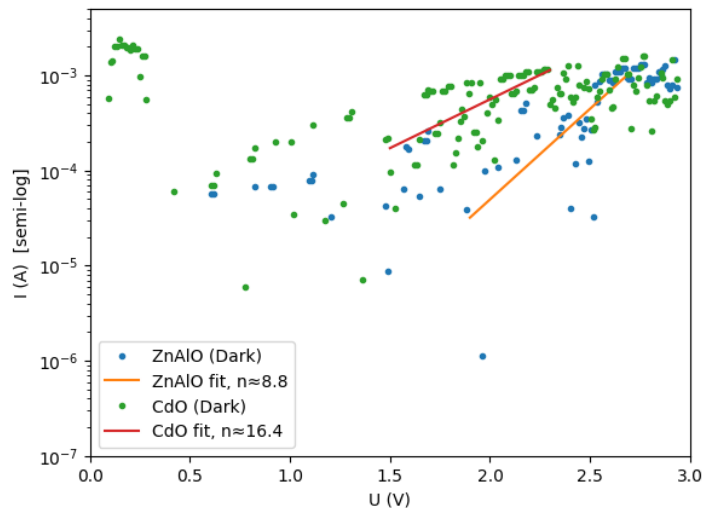
III ШЎБА. ФОТОНИКА МУАММОЛАРИ

QUYOSH ELEMENTLARI UCHUN KREMNIY ASOSIDAGI OKSID GETEROTUZILMALARINING ELEKTR XUSUSIYATLARINI TAQQOSLASH

Sh.X. Daliev, F.A. Saparov

M. Ulug'bek nomidagi O'zMU huzuridagi Yarim o'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, O'zbekiston, 100057, Toshkent, Yangi Olmazor ko'chasi, 20
e-mail: sfa@inbox.ru

Quyosh elementlari texnologiyasida oksid qatlamlari muhim funksional rol o'ynaydi. Ular yarim o'tkazgich yuzasini passivatsiya qilish, elektr transport jarayonlarini barqarorlashtirish hamda optik xususiyatlarni yaxshilash orqali qurilmaning umumiy samaradorligiga ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli kremniy asosidagi geterotuzilmalarda turli oksid qatlamlarining fizik va elektr xususiyatlarini taqqoslab o'rganish muhim ilmiy ahamiyatga ega. Metall bilan legirlangan Kremniydan farqli ravishda, ZnAlO va CdO oksid plyonkalari magnetron purkash usuli bilan taglik qizdirilmasdan cho'ktirilganda asosan yaxlit plyonka hosil bo'lish mexanizmi bo'yicha shakllanadi. Sirt diffuziyasining pastligi, bog'lanishlarning ion xarakteri hamda amorf SiO₂ ostki qatlamining mavjudligi nanoklastlar yoki yo'naltirilgan nanostrukturalar hosil bo'lishini cheklaydi. p-Si/SiO₂/ZnAlO tuzilmasida SiO₂ qatlami kremniy va yuqori oksid qatlami o'rtasida bufer vazifasini bajaradi va epitaksial moslashuvni kamaytiradi.



1-rasm. Qorong'u sharoitdagi I–V (yarim logarifmik) xarakteristika va aniqlangan samarali idealilik koeffitsienti n

Tok–kuchlanish (I–U) xarakteristikalarining tahlili p-Si/SiO₂/ZnAlO va p-Si/SiO₂/CdO geterotuzilmalari o'rtasida sezilarli farqlar mavjudligini ko'rsatadi. Grafik natijalariga ko'ra, CdO qatlamli tuzilmalarda tok qiymatlari yuqoriroq bo'lib, tokning kuchlanishga bog'liqligi $I \sim U^n$ qonuniyatiga yaqin va $n \approx 16.4$ ga teng. ZnAlO qatlamida esa bu ko'rsatkich $n \approx 8.8$ bo'lib, tokning o'sishi nisbatan sustroq ekanligi kuzatiladi. Bundan tashqari, elektr xarakteristikalarining tahlili shuni ko'rsatadiki, p-Si/SiO₂/ZnAlO tuzilmasi elektr jihatdan ma'lum darajada metall–dielektrik–yarim o'tkazgich (MDYa) strukturasiga o'xshash xatti-harakatni namoyon qiladi. Bunda SiO₂

qatlami dielektrik rolini bajarib, zaryad tashuvchilar transportini cheklaydi va tokning kuchlanishga bog'liqligi nisbatan sust o'sish bilan xarakterlanadi. Fotovoltayk qurilmalarda esa samarali ishlash uchun zaryad tashuvchilarning erkin transporti va yuqori elektr o'tkazuvchanlik talab qilinadi.

1-jadval

ZnAlO va CdO oksid qatlamlarining elektr va fotoelektrik parametrlarini taqqoslash

Parametr	ZnAlO	CdO
To'g'ri siljishda tok	Pastroq	Yuqoriroq
Teskari siljishda sizib chiqish toki	Yuqoriroq	Pastroq
Fotojavob (Light – Dark)	O'rtacha	Kuchliroq ifodalangan
VAX (Volt-amper xarakteristika) simmetriyasi	Yomonroq	Yaxshiroq
$U > 2 \text{ V}$ da $I(U)$ ning tikligi	Kichikroq	Kattaroq

Grafik tahlilidan ko'rinib turibdiki, ZnAlO qatlamli tuzilmalarda tok qiymatlarining pastligi va transport jarayonlarining cheklanganligi ushbu materialning fotovoltayk qurilmalarda faol qatlam sifatida qo'llanishini ma'lum darajada cheklaydi. Shunday qilib, o'tkazilgan taqqoslama tahlil CdO asosidagi oksid qatlamlari elektr transport xususiyatlari jihatidan samaraliroq ekanligini ko'rsatadi. Olingan natijalar kremniy asosidagi oksid geterotuzilmalarini optimallashtirish hamda quyosh elementlari texnologiyasida mos materiallarni tanlash uchun muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

KREMNIY ASOSLI QUYOSH ELEMENTLARINING ELEKTROFIZIK XOSSALARIGA KIRISHMA ATOMLAR KLASTERLARINING TA'SIRI

Q.A. Ismaylov, Z.T. Kenjayev, J.O. Jalg'asov

Berdaq nomidagi Qoraqalpoq davlat universiteti

Ushbu tezisda kremniy (Si) asosli quyosh elementlarida samaradorlikni belgilovchi asosiy elektrofizik ko'rsatkichlar — zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (n , p), harakatchanlik (μ), hayot davomiyligi (τ) hamda rekombinatsiya markazlarining energetik spektri — kirishma atomlar (xususan, Ni) klasterlari bilan bog'liq mexanizmlar asosida tahlil qilinadi. Ni atomlarining diffuziyasi, termik ishlov berish va nurlanish omillari ta'sirida Si panjarasida klasterlashuv jarayonlari kompensatsiyalanish darajasi, getterlash, rekombinatsiya kanallariga olib kelishi ko'rsatib beriladi.

Kremniy fotoelementlarida foydali ish koeffitsiyentini cheklovchi asosiy omillar ichida materialning elektrofizik sifati (τ , μ , n/p , rekombinatsiya spektri) hal qiluvchi o'rin tutadi [1-3]. Ayniqsa, yuqori samarali arxitekturalar (TOPCon/HJT/back-contact) kontakt va sirt rekombinatsiyasini keskin pasaytirgani sababli, hajmiy nuqsonlar, chuqur sathlar va klasterlarning ta'siri yanada sezilarli bo'lib bormoqda. ITRPV va sanoat tahlillarida p-type PERC'dan n-type texnologiyalarga o'tish kuchaygani qayd etiladi, bu esa n-type plastina sifati, gettering va defekt injiniringiga talabni oshiradi.

2. Elektrofizik parametrlarni belgilovchi fundamental omillar

Quyosh elementlarining elektr parametrlarini (V_{oc} , J_{sc} , FF) materialning quyidagi uch "ichki" ko'rsatkichi boshqaradi [1]:

(i) Zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi (n , p) — legirlash va kompensatsiyalanish natijasi.

Kuchli kompensatsiya holatida Fermi sathi siljiydi, elektr neytrallik sharoitlari o'zgaradi va chuqur sathlar zaryad holatlari rekombinatsiya tezligiga bevosita ta'sir qiladi.

(ii) Harakatchanlik (μ) — fonon sochilishi bilan birga, aralashma atomlari, dislokatsiyalar va donachalar chegaralari (polikristall Si'da) hisobiga kamayadi. Bu ketma-ket qarshilik komponentlarini va tok yo'qotishlarini oshiradi.

(iii) Hayot davomiyligi (τ) — Shockley–Read–Hall (SRH) rekombinatsiyasi asosan chuqur sathlar (kirishmalar, komplekslar, klaster-atrofi defektlari) bilan belgilanadi; τ pasayishi Voc va Jsc'ni cheklaydi.

Harorat omili ham Eg va rekombinatsiya parametrlarini o'zgartiradi; Gulyamov va hammualliflar kremniy o'tkazuvchanligining haroratga bog'liq xatti-harakatlari orqali energetik taqsimlanish haqida xulosalar berishni ko'rsatadi.

3. Ni kirishma atomlari klasterlarining ta'siri

Ni kremniyda tez diffuziyalanuvchi kirishma bo'lib, u yakka holatda ham, kompleks/klaster holatida ham chuqur energetik sathlarni shakllantirishi mumkin [4-8]. Muhim jihat shundaki, Ni'ning ma'lum termodinamik sharoitlarda o'z-o'zidan yig'ilishi kuzatiladi; klasterlarning o'lchami va konsentratsiyasi diffuziya harorati hamda sovitish tezligiga bog'liqligi IR-spektroskopiya asosida ko'rsatilgan.

Klasterlashuv ikki xil “qarama-qarshi” natija berishi mumkin:

1. Getterlash effekti: klaster/komplekslar zararli rekombinatsion kirishmalarni “tortib olish” va ularni elektr faol bo'lmagan holatga o'tkazish orqali τ ni oshiradi. Mualliflar [4,5] Ni bilan legirlashdan so'ng kremniyli quyosh elementlarida fotoelektrik ko'rsatkichlarning yaxshilanishini, umumiy samaradorlikning oshishini ko'rsatgan.

2. Chuqur rekombinatsion markazlar: agar klasterlar zichligi va energetik spektri SRH rekombinatsiyasini kuchaysa, τ pasayadi va Voc cheklanadi. Shu sababli “klaster parametrlarini boshqarish” (TIB rejimi, sovitish tezligi, kislorod/uglerod bilan o'zaro ta'sir) asosiy ilmiy vazifaga aylanadi.

Ilmiy tadqiqotlarda [6-8] bilan legirlangan kremniyda termik ishlovning elektr o'tkazuvchanlikka sezilarli ta'sirini ko'rsatib, termik ishlov berish jarayonida holatlarning qayta taqsimlanishi (qattiq eritmaning parchalanishi, komplekslanish) elektrofizik parametrlarni o'zgartirishini ta'kidlaydi.

Bunday jarayonlarda materialning kompensatsiyalanishi ortishi mumkin: solishtirma qarshilikning o'sishi, “yarim izolyator”ga yaqin holat, impuls rejimdagi barqarorlikka ta'sir qiluvchi mexanizmlar yuzaga chiqadi. Kompensatsiyalangan tizimlarda past haroratlarda hopping conduction (chuqur sathlar orasida zaryad tashuvchining sakrab o'tishi) ustunlashishi ehtimoli yuqori bo'lib, bu hodisa elektrofizik diagnostikada ($\sigma(T)$, I–V nolinearligi) alohida belgilar beradi.

Ni legirlangan kremniyda γ -nurlanish rekombinatsion xossalarga qanday ta'sir qilishini o'rganish radiatsion defektlar va Ni bilan bog'liq komplekslar o'zaro raqobatini tushunishga xizmat qiladi. Mualliflar [7,8] tizimida rekombinatsion/fotoelektrik xossalarning nurlanishga bog'liq o'zgarishlarni aniqlashgan.

Mazkur yo'nalish amaliy jihatdan ham muhim: PV tizimlar odatda kuchli radiatsiya muhitida ishlamas-da, “defekt injiniring” nuqtai nazaridan nurlanish sinovlari rekombinatsiya spektrini aniqlash va klasterlarning stabilizatsiya rolini baholash uchun qulay usuldir.

Ni diffuziyasi orqali kremniy quyosh elementlari samaradorlikni 20-25% oshirishga olib kelishi ko'rsatilgan [4-6]. Ni kirishma atomlari klasterlari shakllanish mexanizmlari va fizik asoslari ochib berilgan. Shuningdek, Ni klasterlari tuzilishi va migratsiyasi bo'yicha alohida ilmiy ishlar mavjud bo'lib, unda klaster parametrlarini termodinamik sharoitlar orqali boshqarish

mumkinligi muhokama qilinadi.

Xulosa

1. Kremniyda kirishma atomlar klasterlari (xususan Ni) elektrofizik xossalarga ikkiyoqlama ta'sir ko'rsatadi: ma'lum sharoitda gettering orqali τ ni oshirishi, boshqa sharoitda esa chuqur rekombinatsiya markazlarini kuchaytirishi mumkin.
2. Termik ishlov va sovitish rejimi klasterlashuvning asosiy boshqaruv parametrlari bo'lib, kompensatsiyalanish darajasi, $\rho(T)$ va rekombinatsiya spektrini aniqlaydi.
3. Yuqori samarali n-type arxitekturalar (TOPCon/HJT/back-contact)ga o'tish fonida klaster/defektlarni nazorat qilish materialshunoslik darajasidagi eng muhim vazifalardan biri bo'lib qoladi.
4. IR/FTIR, DLTS, PL xaritalash kabi metodlar klasterlarning energetik "izini" aniqlash va texnologik rejimlarni optimallashtirishda asosiy diagnostika vositalari sifatida qo'llanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Liu, A., Phang, S.P., Macdonald, D., Gettering in silicon photovoltaics: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2022. V. 234. P.111447.
2. Fraunhofer ISE. *Photovoltaics Report*, 2025
3. Green M.A. et al. *Solar Cell Efficiency Tables (Version 66)*. 2025.
4. Z.T. Kenzhaev, N.F. Zikrillaev, V.B. Odzhaev, et al. Influence of Nickel Impurity on the Operating Parameters of a Silicon Solar Cell. *Russ Microelectron.* 53, 105–116 (2024).
5. Kenzhaev, Z.T., Zikrillaev, N.F., Ayupov, K.S. et al. Enhancing the Efficiency of Silicon Solar Cells through Nickel Doping. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 59, 858–866 (2023).
6. Z.T. Kenzhaev, Kh. M. Iliev, K. A. Ismailov, et.al. Physical mechanisms of gettering properties of nickel clusters in silicon solar cells, *Physical Sciences and Technology*, 11(1-2). 2024: 13-22.
7. X.M. Iliev, K. A. Ismailov, et.al. The Influence of γ -Irradiation on the Electrophysical Parameters of Nickel-Doped Silicon Grown by the Czochralski Method
8. Zaynovidinov S.Z., Turgunov N.A. Vliyanie termicheskoy obrabotki na elektrofizicheskie svoystva kremniya, legirovannogo nikelom // *Uzbek Journal of Physics*, 2018.

УГЛОВОЕ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК В ПЛЕНКАХ As_2Se_3 ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ФОТОННЫХ УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ

А.А. Сапаева, З.Т. Азаматов, А.Б. Бахромов

Научно-исследовательский институт «Физика полупроводников и микроэлектроники» при Национальном университете Узбекистана им. Мирзо Улугбека, Ташкент Лаборатория «Квантовая электроника и лазерные технологии» e-mail:

sapaeva.aigul.2035@gmail.com

В работе исследованы физические механизмы формирования высокоплотных мультиплексированных объемных голограмм в тонкопленочных слоях триселенида мышьяка (As_2Se_3). Разработана методика оптимизации экспозиционного расписания на основе рекурсивного алгоритма, обеспечивающая эквивалентность дифракционной эффективности каналов за счет компенсации эффектов фотоиндуцированного стирания. Установлены закономерности изменения лучевой стойкости записанных структур в

зависимости от режимов предварительной термической обработки, что позволило расширить динамический диапазон мощностей их эксплуатации в ИК-системах.

Брэгговская селективность, халькогенидные стеклообразные полупроводники, As_2Se_3 , угловое мультиплексирование, динамический диапазон, лучевая стойкость.

Современные задачи квантовой электроники требуют разработки эффективных и малогабаритных сред для управления пространственно-энергетическими характеристиками лазерных пучков. Халькогенидные стеклообразные полупроводники (ХСП), в частности соединение As_2Se_3 , представляют значительный интерес благодаря аномально высокому показателю преломления ($n \approx 2.8$), прозрачности в широком ИК-диапазоне и выраженной способности к фотоструктурным превращениям [4]. Метод углового мультиплексирования в данных средах позволяет реализовать концепцию многоканального оптического элемента на единой пленочной подложке.

Запись дифракционных решеток осуществлялась последовательно путем прецизионного варьирования угла падения опорного пучка θ . Согласно теории связанных волн Когельника [1], дифракционная эффективность η для объемной фазовой решетки в проходящем свете определяется выражением:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta} \right)$$

где Δn — амплитуда модуляции показателя преломления, d — толщина фоторефрактивного слоя.

Экспериментальные исследования пленок As_2Se_3 ($d \approx 5$ мкм) при считывании на $\lambda = 633$ нм подтвердили теоретическую модель углового селективного отклика типа sinc^2 . Показано, что высокий коэффициент преломления среды обеспечивает реализацию режима Брэгга даже в микронных слоях. Ширина Брэгговского пика на полувысоте составила $FWHM \approx 1.5^\circ$, что обосновывает возможность плотной мультиплексной записи с шагом 2° при минимальном уровне перекрестных помех.

Для выравнивания интенсивностей N дифрагированных каналов и эффективного использования динамического диапазона (M -number) [3] применен алгоритм рекурсивного расчета времени экспозиции t_k :

$$t_k = \frac{\tau}{k + C}$$

где τ — характерное время релаксации фотоотклика, k — номер экспозиции. Это позволило компенсировать деградацию ранее записанных решеток в процессе последующих экспозиционных циклов.

Анализ устойчивости голограмм к воздействию интенсивного лазерного излучения показал, что порог их термической деградации лимитирован температурой стеклования материала ($T_g \approx 180^\circ\text{C}$). При плотностях мощности свыше 50 Вт/см² наблюдается эффект оптического отжига, обусловленный метастабильностью аморфной сетки ХСП [2]. Предложенный метод предварительной низкотемпературной термостабилизации ($T = 100^\circ\text{C}$) обеспечил релаксацию внутренних напряжений структуры. Это привело к росту эксплуатационного ресурса голограмм на 40% и повышению порога оптической стабильности до 100 Вт/см².

Разработанные режимы углового мультиплексирования в пленках As_2Se_3 обеспечивают создание селективных оптических фильтров и пространственных модуляторов с высокой разрешающей способностью. Установленные эффекты термо-оптической стабилизации открывают перспективы применения данных сред в качестве

надежных фотонных компонентов для систем адаптивного управления лазерным излучением и голографической обработки информации.

Список литературы:

1. Kogelnik, H. Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // Bell System Technical Journal. – 1969. – Vol. 48, No. 9. – P. 2909–2947.
2. Shimakawa, K. Photo-induced effects and metastability in amorphous semiconductors and insulators / K. Shimakawa, A. V. Kolobov, S. R. Elliott // Advances in Physics. – 1995. – Vol. 44, No. 6. – P. 475–588.
3. Curtis, K. Characterization of the M-number of holographic storage media / K. Curtis, D. Psaltis // Optics Letters. – 1996. – Vol. 21, No. 12. – P. 892–894.
4. Popescu, M. A. Non-Crystalline Chalcogenides / M. A. Popescu. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 377 p.

QUYOSH ELEMENTLARI SAMARADORLIGINI OSHIRISHNING YANGI USULLARI: STRUKTURAVIY OPTIMALLASHTIRISH YONDASHUVI

Q.A. Ismaylov, Z.T. Kenjayev, X.X. Bauetdinova

Qoraqalpoq davlat universiteti

Ushbu tezisda quyosh elementlari samaradorligini oshirishning aynan strukturaviy optimallashtirish yoʻnalishidagi eng yangi texnologik yechimlari tahlil qilinadi. Asosiy eʼtibor kristalli kremniy (c-Si) fotoelementlarida rekombinatsiya yoʻqotishlarini kamaytirish, kontakt yoʻqotishlarini pasaytirish va optik yutilishni oshirishga qaratilgan: passivatsiyalangan kontaktlar (TOPCon), kremniy geterooʻtishli (SHJ/HJT), orqa kontaktli arxitekturalar (IBC/HBC) hamda perovskit–kremniy tandem tuzilmalari. Ilmiy manbalardagi tasdiqlangan rekord koʻrsatkichlar va sanoat trendlariga tayangan holda, yaqin istiqbolda yuqori samaradorlikka olib keluvchi yoʻnalishlar asoslab beriladi.

Kremniy quyosh elementlarida Foydali ish koeffitsientini (FIK) cheklovchi omillar ichida strukturaviy nuqtai nazardan eng muhimlari [1-4]:

- sirt va hajmiy rekombinatsiya (zaryad tashuvchilar “yoʻqolishi”),
- kontakt rekombinatsiyasi va kontakt qarshiligi (R_s),
- parazitik optik yutilish (ayniqsa kontakt qatlamlari va metallizatsiyada),
- yorugʻlikni tutib qolish darajasining yetarli emasligi.

Soʻnggi 3–5 yildagi texnologik sakrashlar aynan shu yoʻqotishlarni “kontakt darajasida passivatsiya” va “arxitektura” orqali kamaytirishga qaratildi. Sanoat road-mapʼlarida ham p-type PERCdan n-type platformalarga oʻtish asosiy trend sifatida koʻrsatilmoqda.

TOPCon konsepsiyasi “klassik metall–kremniy kontakti”ni ultra-yupqa SiO_x tunnel oksid + doplangan poli-Si qatlamlari bilan almashtirib, bir vaqtning oʻzida:

- sirt rekombinatsiyasini kamaytiradi (yaxshi passivatsiya),
- kontakt selektivligini oshiradi (elektron/kovakni ajratish),
- metall kontakt ostidagi yoʻqotishlarni pasaytiradi.

TOPCon texnologiyali panellar samaradorligi 25.6% darajasiga [2] yetganini takidlash joyiz. Shuningdek, sanoat yoʻnalishida TOPCon jarayonlari (jumladan LECO kabi kontakt optimallashtirish yondashuvlari) ulushi tez oʻsishi prognoz qilinadi.

Ammo, TOPCon samaradorligi koʻpincha “poli-Si qalinligi”, “parazitik yutilish” va

“metallizatsiya bilan moslashuv” bilan cheklanadi. Shu sababli poli-Si qatlam qalinligini optimallashtirish ham alohida tadqiqot yo‘nalishiga aylangan.

HJT texnologiyasi c-Si plastinasi yuzasida amorf kremniy (a-Si:H) passivatsiya qatlamlari va shaffof o‘tkazuvchi oksidlar (TCO) yordamida juda past rekombinatsiyaga erishadi. Bu arxitektura ayniqsa yuqori Voc (ochiq zanjir kuchlanishi) bilan ajralib turadi. Ma’lumot uchun n-type HBC (orqa kontaktli geteroo‘tishli) kremniy elementida 27.3% rekord qayd etgan [2] — bu sof kremniy texnologiyalari uchun juda yuqori natijadir.

Amaliy tomondan HJTning muhim muammolaridan biri — metallizatsiya va interkonekt (ayniqsa Ag sarfi) bo‘lib, so‘nggi yillarda “kam-kumush” va “misga o‘tish” tadqiqotlari kuchaydi.

IBC (Interdigitated Back Contact) va HBC (heterojunction back contact) konsepsiyalarining asosiy g‘oyasi — old (yorug‘lik kiradigan) yuzada metall panjarani minimal qilish yoki butunlay olib tashlash. Buning natijasida:

- soylanish yo‘qotishlari kamayadi,
- optik yutilish ortadi,
- old yuzani passivatsiya qilish osonlashadi.

Olimlar [3,4] orqa kontaktli yondashuvlar modul darajasida ham yuqori natijalarga olib kelayotganini ko‘rsatadi (masalan, IBC modul samaradorligi bo‘yicha +27% yuqori ko‘rsatkichlar bergan).

Yuqori samaradorlik texnologiyalari (TOPCon, HJT, BC) sanoatlashtirilganda asosiy cheklovlardan biri — metallizatsiya narxi va barqarorligi. Shu sababli ilmiy-amaliy yo‘nalishda [5-7]:

- Ag pastalarini optimallashtirish,
- Ag miqdorini kamaytirish,
- Cu (mis) asosida metallizatsiya/elektroplating kabi yechimlar jadallashdi.

Masalan, TOPCon’da Ag’ni qisqartirish va Cu metallizatsiya strategiyalariga bag‘ishlangan ilmiy ishlar ko‘paymoqda [6]. Bundan tashqari, mis kontaktli mini-modullarning qarish sinovlari bo‘yicha ham sanoat miqyosida natijalar bor. Metallizatsiya bo‘yicha bir qator xulosalarda ham ekranli bosma usul hanuz ustunligi saqlanayotgan bo‘lsa-da, Cu ulushi ortib borayotgani ta’kidlanadi [6,7].

Bir-birini “to‘ldiruvchi” spektral yutilishga ega bo‘lgan ikki qatlamni ketma-ket ulash (tandem) nazariy chegarani oshiradi. Shu yo‘nalishda perovskit–Si tandem so‘nggi yillarda eng tez o‘sayotgan platforma bo‘lib, tasdiqlangan rekordlar (+33%) ham mavjud. Xususan, 1 sm² maydonda 2-terminal perovskit/kremniy tandem uchun 34.85% samaradorlikka erishilgan [3]. Bu natija strukturaviy optimallashtirishning (ya’ni faqat sovitish/tozalash emas) “yangi avlodi” sifatida qaraladi.

Xulosa

Strukturaviy optimallashtirish bo‘yicha so‘nggi texnologik trendlar quyidagi ketma-ketlikda umumlantiriladi:

1. n-type platformalar (kam degradatsiya va yuqori potensial)ga o‘tish,
2. Rekombinatsiyani keskin kamaytiruvchi passivatsiyalangan kontaktlar (TOPCon) va HJT/SHJ yechimlarini kengaytirish,
3. Optik yo‘qotishlarni kamaytiruvchi orqa kontaktli (BC) arxitekturalarning ulushini oshirish,
4. Texnologiyani arzonlashtiruvchi va barqarorlashtiruvchi Cu metallizatsiya yo‘nalishlari, uzoq muddatli istiqbolda esa samaradorlik sakrashini beruvchi perovskit–kremniy tandem strukturalar.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Kenzhaev Z.T. et al. *The Physical mechanisms of gettering properties of nickel clusters in silicon solar cells*, Physical Sciences and Technology. – 2024, – Vol. 11, № 1-2. P. 13–22.
2. Green M.A. et al. *Solar Cell Efficiency Tables (Version 64)*. 2024.
3. Green M.A. et al. *Solar Cell Efficiency Tables (Version 66)*. 2025.
4. NREL. *Best Research-Cell Efficiencies Chart*. (Dec 11, 2025).
5. Wang Q. et al. *Effects on Metallization of n+-Poly-Si Layer for N-Type TOPCon Solar Cells*. Materials, 2024.
6. Lossen J. et al. *TOPCon Solar Cells With Al-Free Ag and Cu Metallization*. SiliconPV 2024.
7. Lachowicz A. et al. *Aging tests of mini-modules with copper-plated...* EPJ Photovoltaics, 2024.

APPLICATION OF MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER IN MAGNETO-OPTICS

N.O. Abdulxafizova, O.O. Ochilov

*Center for the Development of Nanotechnology under M. Ulugbek National University of
Uzbekistan*

abdulxafizovanargiza@gmail.com

Introduction: The Mach-Zehnder interferometer is used to detect changes in the phase shift between two collimated beams separated from a light source. The operating principle of the interferometer is based on measuring the phase shifts between two beams caused by changes in the sample or the optical path length. This optical device is named after Ludwig Mach (son of Ernst Mach) and Ludwig Zehnder. In 1891, Zehnder described this interferometer, and based on his proposal, Mach developed the optical device in 1892.

The Mach-Zehnder interferometer is a modern variant of interferometric methods and plays a significant role in magneto-optics. It can be used as a magnetic sensor to detect magnetic fields. Magneto-optics is a scientific field that studies the influence of magnetic fields on optical properties, with one of its key principles being the Faraday effect. This effect is related to the refractive index and transmission coefficients of a material. It is crucial for magneto-optical research and technologies, such as the development of sensors and lasers [1].

This article analyzes the application of Mach-Zehnder interferometry in magneto-optics, highlighting its advantages and practical significance.

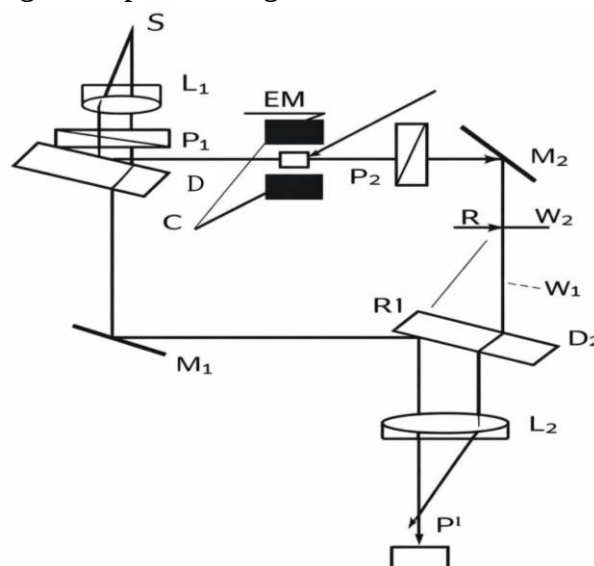


Figure 1. Schematic of the Mach-Zehnder Interferometer

In Figure 1, P^1 represents the projection screen, S is the laser source, M_1 and M_2 are plane mirrors, P_1 and P_2 are polarizers, EM is electromagnetic field while D_1 and D_2 are beam-splitting prisms.

Application of the Mach-Zehnder Interferometer in Magneto-Optics

The Mach-Zehnder interferometer is widely used in magneto-optics. This interferometric method enables highly accurate measurement of changes in magnetic fields. With the help of Mach-Zehnder interferometry, the following magneto-optical phenomena can be studied:

Faraday Effect: This interferometer allows detecting and measuring the influence of magnetic fields on light waves, which is particularly useful for analyzing optical materials and structures [2]. Depending on the strength and direction of the magnetic field, the optical response of materials (such as the polarization angle) changes. The Faraday effect is employed to study magneto-optical properties in nanostructures, such as quantum dots, nanotubes, and other nanomaterials.

Additionally, by modifying the Faraday geometry within the interferometer, it is also possible to investigate the Kerr Effect.

Advantages of Mach-Zehnder Interferometry

Due to its structural features and operational principles, the Mach-Zehnder interferometer differs from other interferometers. This interferometer utilizes two primary optical elements: a beam splitter and a beam combiner. The application of the Mach-Zehnder interferometer in magneto-optics offers several advantages:

Sensitivity: One of the most significant advantages of the Mach-Zehnder interferometer is its ability to detect extremely weak magnetic fields. This interferometer can measure magnetic fields as low as 10 nT (nanotesla). Compared to other interferometric systems, this level of sensitivity is approximately 10 times higher [3]. Thus, the ability to observe and measure small magnetic field variations makes this method highly valuable for magneto-optical research [4].

Precision: The results obtained using Mach-Zehnder interferometry have very high accuracy, with measurement repeatability less than 0.1%. This high precision minimizes unexpected errors in measurements and ensures the reliability of results in scientific experiments [5]. Therefore, this interferometric method is widely used in delicate research fields, such as the study of micro- and nanomagnetism.

High Efficiency: Mach-Zehnder interferometry demonstrates high efficiency in analyzing optical changes. This interferometer, for instance, can perform 1,000 measurements within 1.5 milliseconds. Such speed and efficiency allow real-time monitoring in laboratory settings, facilitating fast and effective measurements in practical research [6]. This capability is particularly useful for dynamically studying magnetic fields.

Conclusion

Due to its multi-directional, symmetrical, and precisely controllable design, the Mach-Zehnder interferometer stands out from other interferometers, such as Michelson, Fabry-Perot, and Jamin interferometers. The benefits of this interferometer are closely linked to its extensive applications in optical systems and quantum technologies, as it enables precise interference measurements and provides high sensitivity in controlling optical properties.

In particular, magnetic sensors based on the Mach-Zehnder interferometer allow studying the Faraday effect, the Kerr effect, and other magneto-optical phenomena in ferromagnets, semiconductors, and nanocomposites. This enables the investigation of interactions between magnetic and optical properties, the dynamics of electronic and magnetic moments, and the emergence of new effects in nanostructures.

Thus, the Mach-Zehnder interferometer plays a crucial role in magneto-optics and various branches of physics, significantly contributing to the study of ferromagnetic nanostructures, materials science, and the advancement of new technologies.

References:

1. Smith, J. L., & Roberts, A. (2015). Magneto-optical effects and their applications. *Optics Express*, 22(14), 16832-16840.
2. Wahba, Hamdy H., et al. "Magneto-optical effects of MgFe₂O₄ nanoparticles in solutions and thin films of polystyrene using digital Mach-Zehnder interferometer: An optical-based sensor for energy storage controller." *Optik* 242 (2021): 167127.
3. Liu, Y., & Zhang, Z. (2022). Enhancement of sensitivity in magneto-optical interferometry using Mach-Zehnder techniques. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 540, 168314.
4. Ji, Yang, et al. "An electronic Mach-Zehnder interferometer." *Nature* 422.6930 (2003): 415-418.
5. Terner, R., & Kim, S. (2023). Precise detection of nanotesla magnetic fields using Mach-Zehnder interferometry. *IEEE Transactions on Magnetics*, 59(1), 123-130.
6. Zhou, W., & Kim, H. (2020). High-sensitivity magneto-optical interferometry for precision measurements. *Journal of Applied Physics*, 127(6), 063105.

INVESTIGATION OF NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES Ag₂S QUANTUM DOTS THIN FILM

Y.A. Buriyev, Sh. R. Kamalov

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences

buriyev.y.a@gmail.com

Ag₂S is a semiconductor with a moderate band gap of approximately 1 eV and a relatively high optical absorption coefficient, which makes it a promising material for photovoltaic applications. It has showed that reducing the nanocrystal size to around 3 nm increases the band gap to at least 1.1 eV (1120 nm), as a result of weak quantum confinement effects [1,2]. This effect becomes particularly significant when the radius of these species is smaller than the exciton Bohr radius [3]. Nevertheless, the nonlinear optical properties of Ag₂S quantum dots in thin-film form have not yet investigated. Due to above reasons, we decided to study the nonlinear optical properties of Ag₂S quantum dots (QDs) thin film. Firstly, we measured absorption, fluorescence spectr of a 30 μm thick film. The QDs film showed a fluorescence peak centered at 970 nm, covering the near-infrared spectral range from 800 to 1200 nm when excited at 462 nm. The morphology of the sample was studied using a JEOL JEM-2100 transmission electron microscopy (TEM). Their average particle size was found to be 3.6 nm. We used a femtosecond laser (Jasper 20, Fluence Technology) with a wavelength of 1030 nm, a pulse duration of 200 fs, a repetition rate of 300 Hz and standard Z-scan method for determination nonlinear optical properties the film.

$$T_{SA+TPA}(z) = (1 - q(z) / 2\sqrt{2}) \times (1 + I_0/I_{sat} ((z/z_0)^2 + 1)) \quad (1)$$

Here $q(z) = I_0\beta L_{eff} / (1 + (z/z_0)^2)$, I_0 is a laser peak intensity at focus ($z = 0$), β is the nonlinear absorption coefficient attributed to TPA, $z_0 = k(w_0)^2/2$ is a Rayleigh length, $k = 2\pi/\lambda$ is a wave number, $L_{eff} = (1 - \exp(-\alpha_0 L))/\alpha_0$ is an effective length of samples, α_0 is a linear absorption coefficient, L is a thickness of the studied film, and I_{sat} is a saturation intensity of the sample. The

effective lengths of the films of studied samples were almost similar to L due to small linear absorbance at the wavelength of the probe pulses (1030 nm). Particularly, this value became slightly less than the thickness of films ($L_{\text{eff}} \approx 29 \mu\text{m}$) for the 30 μm thick films. Two-photon absorption (TPA) was observed in the sample at a pulse energy of 1.3 μJ , with a corresponding β coefficient of $6.5 \times 10^{-9} \text{ cm W}^{-1}$. With increasing pulse energy, the contribution of TPA decreased, while saturable absorption (SA) became dominant. When the pulse energy reached 5.1 μJ , saturable absorption (SA) was observed, with a $I_{\text{sat}} = 9 \times 10^{11} \text{ W cm}^{-2}$.

Reference:

1. S. Lin, Y. Feng, X. Wen, P. Zhang, S. Woo, S. Shrestha, G. Conibeer, S. Huang, Theoretical and Experimental Investigation of the Electronic Structure and Quantum Confinement of Wet-Chemistry Synthesized Ag₂S Nanocrystals, *The Journal of Physical Chemistry C* 119 (2015) 867–872. <https://doi.org/10.1021/jp511054g>.
2. V. Öberg, X. Zhang, M. Johansson, E. Johansson, Solution-Processed Environmentally Friendly Ag₂S Colloidal Quantum Dot Solar Cells with Broad Spectral Absorption, *Applied Sciences* 7 (2017) 1020. <https://doi.org/10.3390/app7101020>.
3. R. de Nalda, M. López-Arias, M. Sanz, M. Oujja, M. Castillejo, Harmonic generation in ablation plasmas of wide bandgap semiconductors, *Physical Chemistry Chemical Physics* 13 (2011) 10755.

EXPERIMENTAL AND MATLAB-BASED COMPARISON OF TEMPERATURE EFFECTS ON OPTICAL FIBER SIGNAL LOSS

N. Normatova, Sh. Ismoilov, O. Jabbarov

Urgench State University named after Abu Rayhan Biruni

nigoranormatova@gmail.com

This paper presents a comparison of experimental measurements and MATLAB simulation results for temperature-dependent optical fiber signal loss. Laboratory experiments were conducted in the 27–50 °C range using a single-mode fiber at 1550 nm. The results show that optical attenuation increases with temperature. Experimental losses rise by approximately 2–3 dB within the studied range and are slightly higher than simulated values due to additional practical effects such as micro-bending and connector losses. The study highlights the importance of considering temperature effects in optical fiber communication systems.

Optical fibers are a fundamental component of modern telecommunication and sensing systems due to their low attenuation, high bandwidth, and immunity to electromagnetic interference. However, their transmission parameters are sensitive to environmental conditions, particularly temperature. Temperature variations influence optical fiber performance through changes in the refractive index of the fiber material (thermo-optic effect), thermal expansion of the fiber structure, and micro-bending losses induced by thermomechanical stress. These mechanisms lead to variations in optical attenuation, phase shift, and dispersion, which are especially critical in long-haul communication links and high-precision optical sensing applications.

Previous studies indicate that even small temperature fluctuations can produce measurable changes in attenuation, particularly in silica-based fibers operating at standard telecommunication wavelengths of 1310 nm and 1550 nm. Despite the availability of experimental data and numerical

modeling approaches, direct comparative evaluations between laboratory measurements and MATLAB-based simulations remain limited. Therefore, this work compares experimental results obtained in the 27–50 °C temperature range with MATLAB simulation outcomes to assess temperature-dependent optical signal loss and identify the dominant influencing mechanisms.

Methodology: The experimental system consisted of a single-mode silica fiber (SMF-28), a 1550 nm laser diode source, and an InGaAs photodetector for output power measurement. Temperature control (–5 °C to +60 °C) was achieved using a Peltier module mounted on an aluminum block to ensure uniform thermal distribution. The fiber was coiled on the block surface, and temperature was monitored using a DS18B20 digital sensor controlled by an Arduino microcontroller.

Simulation in MATLAB/Simulink

A corresponding model was implemented in MATLAB/Simulink, including a continuous wave laser source, a temperature-dependent optical fiber block, and a gain/loss subsystem for signal analysis. The attenuation coefficient was modeled as:

$$\alpha(T) = \alpha_0 + k(T - T_0)$$

where, α_0 — base attenuation at reference temperature $T_0 = 25^\circ$,

k — temperature sensitivity coefficient (0.002 dB/km·°C).

The transmitted optical power $P_{out}(T)$ was calculated using:

$$P_{out}(T) = P_{in} \times 10^{-\alpha(T)L/10}$$

where, P_{in} — input optical power,

L — fiber length (1 km in the experiment).

Measurement Procedure

Input and output optical power were recorded at temperature steps between 25 °C and 60 °C. The temperature was increased gradually to ensure thermal stability. Simulation was performed using the same temperature values to enable direct comparison with experimental data.

Results and Analysis

Simulation results

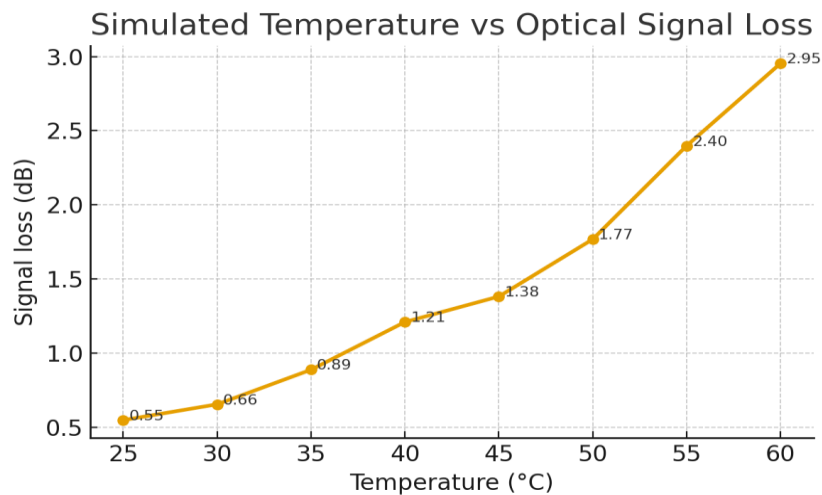


Figure 1. Simulated Temperature vs Optical Signal Loss (25–60 °C). The model uses $P_0 = 0.5 \text{ dB}$, $k = 0.05 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ and additive positive noise to mimic measurement scatter.

The simulated loss curve (Figure 1) shows exponential increase from 25 to 60 °C. Each plotted marker includes an annotation with its loss value (dB). This visual annotation helps compare pointwise values with experimental data.

Experimental vs Simulation comparison

Figure 2 compares experimental and simulated results. Experimental losses are 0.1–1.2 dB higher at corresponding temperatures, indicating additional practical loss factors such as connectors and micro-bending

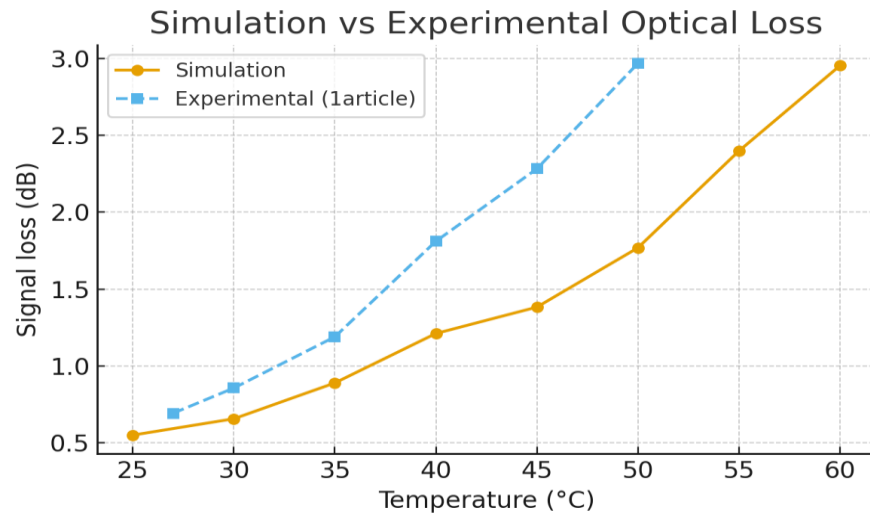


Figure 2. Comparison between simulation and experimental measurements (27–50 °C).

Tabular comparison (selected temperatures)

Temperature (°C)	Simulated loss (dB)	Experimental loss (dB)	Difference (Exp - Sim) dB
27	0.592	0.692	0.100
30	0.656	0.856	0.200
35	0.889	1.189	0.300
40	1.211	1.811	0.600
45	1.383	2.283	0.900
50	1.769	2.969	1.200

Table 1. Numerical comparison between simulation and experiment for 27–50 °C.

Conclusions and Recommendations

This combined experimental and simulated study confirms that optical attenuation increases with temperature. The exponential model reproduces the trend but underestimates absolute losses observed experimentally due to additional practical loss mechanisms.

Practical recommendations:

- Use temperature-compensated fibers or armored/coated fibers in harsh environments.
- For sensing: use FBGs or interferometric enhancements for improved sensitivity; calibrate sensors considering thermo-optic coefficients.

References:

1. G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 5th ed. New York: Wiley, 2023.
2. J. M. Senior and M. Y. Jamro, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, 4th ed. Pearson, 2022.
3. R. K. Gangwar, "Optical Fiber Based Temperature Sensors: A Review," *Optical Fiber Technology*, vol. 78, pp. 102918–102935, 2023.
4. B. Des Tombe, M. A. Khan, and R. F. Jansen, "Estimation of Temperature and Associated Uncertainty in Distributed Temperature Sensing (DTS)," *Sensors*, vol. 20, no. 15, pp. 4312–4325, 2020.
5. A. Ashfaq, S. Ahmed, and L. Wu, "Attenuation Investigation Influenced by the Temperature,"

Optics Express, vol. 29, no. 4, pp. 5890–5901, 2021.

6. G. Rego, “Temperature Dependence of the Thermo-Optic Coefficient of SiO₂ Glass,” *Sensors*, vol. 24, no. 2, pp. 145–153, 2024.

7. J. Smith and D. Brown, “Experimental Analysis of Temperature-Induced Loss in Single-Mode Optical Fibers,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 41, no. 5, pp. 1103–1111, 2023.

8. P. Jones and A. Wilson, “Impact of Thermal Variations on Fiber Attenuation and Signal Quality,” *Applied Optics*, vol. 61, no. 10, pp. 2765–2772, 2022.

9. Nigora Normatova, Odamboy Jabbarov, Shavkat Ismailov, “Temperature sensitivity of optical fibers”, Recent advances in Photonics and Quantum Optics: New Optoelectronic Technologies, Quantum Communications, And Quantum Computers, September 29-30, 2025, Urgench, Uzbekistan.

STUDY OF NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES Ag₂Se QUANTUM DOTS THIN FILM

Y.A. Buriyev, Sh.R. Kamalov

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences

buriyev.y.a@gmail.com

Ag₂Se quantum dots (QDs) are an environmentally friendly semiconductor material. Zhang *et al.* investigated the size effect of Ag₂Se QDs used as a blocking layer in dye-sensitized solar cells (DSSCs), revealing a new approach to effectively regulate charge transport and recombination in such devices [1,2]. Ag₂Se is a nonmagnetic, narrow-band-gap semiconductor with a band gap ranging from 0.15 to 0.7 eV [3,4]. Ag₂Se nanocrystals have attracted considerable attention due to their versatile applications in photo-rechargeable secondary batteries, luminescent devices, optoelectronics, photovoltaic cells, and photodetectors [5,6]. To investigate the optical properties of the sample, absorption and fluorescence spectra were measured. The QDs film exhibited a fluorescence peak centered at 1010 nm, spanning the near-infrared spectral range from 850 to 1400 nm under excitation at 462 nm. The morphology of the sample was investigated using a JEOL JEM-2100 transmission electron microscope (TEM), revealing an average particle size of 3.7 nm. A femtosecond laser (Jasper 20, Fluence Technology) with a wavelength of 1030 nm, a pulse duration of 200 fs, and a repetition rate of 300 Hz was used in conjunction with the standard Z-scan technique to determine the nonlinear optical properties of the film. At a pulse energy of 1.3 μJ, positive nonlinear absorption was dominant. As the pulse energy was gradually increased, the contributions of positive and negative nonlinear absorption became comparable at 1.82 μJ, corresponding to two-photon absorption and saturable absorption, respectively. Upon further increasing the energy to 2.6 μJ, saturable absorption (SA) became dominant. At a pulse energy of 1.82 μJ, β and I_{sat} were $4.6 \times 10^{-9} \text{ cm W}^{-1}$ and $8 \times 10^{10} \text{ W cm}^{-2}$, respectively.

Reference:

1. Y. Yang, D. Pan, Z. Zhang, T. Chen, H. Xie, J. Gao, X. Guo, Ag₂Se quantum dots for photovoltaic applications and ligand effects on device performance, *J. Alloys Compd.* 766 (2018) 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.07.022>.

2. Z. Zhang, Y. Yang, J. Gao, S. Xiao, C. Zhou, D. Pan, G. Liu, X. Guo, Highly efficient Ag₂Se quantum dots blocking layer for solid-state dye-sensitized solar cells: Size effects on device

- performances, Mater. Today Energy 7 (2018) 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2017.11.005>.
3. C.-N. Zhu, P. Jiang, Z.-L. Zhang, D.-L. Zhu, Z.-Q. Tian, D.-W. Pang, Ag₂Se Quantum Dots with Tunable Emission in the Second Near-Infrared Window, ACS Appl. Mater. Interfaces 5 (2013) 1186–1189. <https://doi.org/10.1021/am303110x>.
4. S. Chand, D. Sharma, V. Sharma, P. Sharma, Morphological and optical study of Ag₂Se quantum dots, in: 2018: p. 020026. <https://doi.org/10.1063/1.5052095>.
5. A. Sahu, L. Qi, M.S. Kang, D. Deng, D.J. Norris, Facile Synthesis of Silver Chalcogenide (Ag₂E; E = Se, S, Te) Semiconductor Nanocrystals, J. Am. Chem. Soc. 133 (2011) 6509–6512. <https://doi.org/10.1021/ja200012e>.
6. D.T. Schoen, C. Xie, Y. Cui, Electrical Switching and Phase Transformation in Silver Selenide Nanowires, J. Am. Chem. Soc. 129 (2007) 4116–4117. <https://doi.org/10.1021/ja068365s>.

LITIY NIOBAT KRISTALLARIDA PYEZOELEKTRIK EFFEKTNING AKUSTOOPTIK XOSSALARIGA TA’SIRI

N. Soliyeva

Ion Plazma va lazer texnologiyalari instituti

Ushbu ishda litiy niobat (LiNbO₃) kristallarida pyezoelektrik effektning akustooptik (AO) ko’rsatkichlarga ta’siri nazariy tahlil qilingan. Tadqiqotda pyezoelektrik “qattiqlashish” (stiffening) hodisasi va bilvosita fotoelastik effektning akustik to’lqin tezligi hamda akustooptik sifat koeffitsienti (M₂) qiymatlariga qo’shgan hissasi o’rganilgan. Natijalar shuni ko’rsatadiki, pyezoeffektni hisobga olish AO qurilmalarning samaradorligini bashorat qilishda hal qiluvchi faktor hisoblanadi.

Litiy niobat o’zining trigonal simmetriyasi (3m nuqtaviy guruhi) tufayli kuchli anizotropiyaga ega bo’lib, zamonaviy lazer texnikasi, akustooptik modulyatorlar va deflektorlarning asosiy materiali hisoblanadi. Biroq, ko’plab hisob-kitoblarda pyezoelektrik effektning elastik va optik xossalarga bilvosita ta’siri yetarlicha baholanmaydi. Ushbu ishning maqsadi — pyezoelektrik maydonlarning kristall panjarasidagi mexanik va optik o’zaro ta’sirini miqdoriy jihatdan baholashdir.

PYEZOELEKTRIK “QATTIQLASHISH” MEXANIZMI

Pyezoaktiv yo’nalishlarda tarqalayotgan akustik to’lqin kristall panjarasida vaqtinchalik deformatsiya bilan birga lokal elektr maydonini ham hosil qiladi. Bu maydon elastik qaytish kuchini oshiradi, natijada kristallning “samarali qattiqligi” ortadi. Kristalning (optik) o’qi bo’ylab tarqalayotgan bo’ylama akustik to’lqin uchun samarali elastik moduli (C_{eff}) quyidagi bog’liqlik orqali ifodalanadi:

$$C_{eff} = C^E + \frac{e^2}{\epsilon^S}$$

Bu yerda C^E — doimiy elektr maydonidagi elastiklik moduli, e — pyezoelektrik doimiy, ε^S-dielektrik o’tkazuvchanlik. (LiNbO₃) uchun ushbu effekt hisobiga akustik tezlik *v*-taxminan 11-12% ga ortadi.

Akustooptik o’zaro ta’sirning samaradorligi asosan fotoelastik koeffitsient (p_{eff}) va akustooptik sifat koeffitsienti bilan belgilanadi. Pyezoelektrik kristalllarda “toza” fotoelastik effektga

qo‘shimcha ravishda, pyzeoeffekt uyg‘otgan elektr maydoni elektrooptik effekt orqali qo‘shimcha sinish ko‘rsatkichi o‘zgarishini yuzaga keltiradi. Samarali fotoelastik koeffitsient quyidagicha aniqlanadi:

$$\rho_{eff} = \rho - \frac{r e}{\epsilon}$$

Litiy niobatda bu “bilvosita” hissa ρ_{33} koeffitsientining qiymatini deyarli ikki baravar oshishiga olib keladi.

TADQIQOT NATIJALARI VA TAHLIL

Olib borilgan nazariy hisob-kitoblar natijalari quyidagi jadvalda umumlashtirildi (Z-kesim bo‘yicha):

Parametr	Pyzeoeffektsiz qiymat	Pyzeoeffekt bilan qiymat	O‘zgarish (%)
Akustik tezlik (v), m/s	6570	7330	+11.5%
Fotoelastik doimiy (p)	0.071	0.138	+94.3%
Sifat koeffitsienti (M2), $10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$	1.37	2.15	+57.0%

Tahlillar shuni ko‘rsatadiki, garchi akustik tezlikning ortishi V^3_{max} da bo‘lgani uchun) M2ni kamaytirishga harakat qilsa-da, fotoelastik koeffitsientning (p_{eff} keskin ortishi yakuniy samaradorlikni 57% ga oshishini ta‘minlaydi.

XULOSA

Litiy niobat kristallarida pyzeoelektrik effekt shunchaki ikkinchi darajali tuzatish emas, balki akustooptik parametrlarining fundamental qiymatlarini belgilovchi asosiy faktor hisoblanadi. M2 koeffitsientining 60% ga yaqin ortishi, ushbu kristallar asosida yaratiladigan AO-filtrlar va modulyatorlarning boshqaruv quvvatini tejash va sezgiriligini oshirish imkonini beradi. Ushbu natijalar optoelektronik qurilmalarni loyihalashda foydalanilishi tavsiya etiladi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Dieulesaint, E., & Royer, D. (1980). *Elastic Waves in Solids: Applications to Signal Processing*. Wiley.
2. Korpel, A. (1997). *Acousto-Optics*. Marcel Dekker, Inc.
3. Zaharov, Y. N., et al. (2015). “Anisotropy of Acousto-Optic Figures of Merit in LiNbO3 Crystals”. *Journal of Applied Physics*.
4. Bondarenko, V. S. (1986). *Pyzeoelektricheskie kristalli dlya akustoelektroniki*. Nauka.

TURLI TO‘LQIN UZUNLIKDAGI NANOSEKUNDLI IMPULSLI LAZER NURLANISHI ASOSIDA POLIKRISTALL KREMNIY SHIKASTLANISH XUSUSIYATLARI TADQIQI

B.A. Abduraxmanov, D.D. Matyakubov

Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, Toshkent

bahrom.abduqahhor@gmail.com

PVDF piezoelektrik sensori oxirgi yillarda yuqori javob chastotasi (nanosekund darajasi) va 20 GPa dan yuqori bosim o‘lchash diapazoni bilan rivojlantirilgan bo‘lib, lazer termik zarba

to'liqlarining ideal sinov komponenti hisoblanadi [1]. Kremniy materiallari ajoyib optik materiallar bo'lib, odatda optik tizimlarning filtr va asos materiallari sifatida ishlatiladi va ular mikroelektronika sanoati, optoelektron sanoati va boshqa sohalarda keng qo'llaniladi. Kristal materiallarining to'liq diapazoni boshqa materiallarga qaraganda tor (300 K da 1,12 eV) bo'lganligi sababli, ular infraqizil to'liqlik lazerlarning katta ichki so'rilishiga ega. Shuningdek, ular tor plastik hududga ega qattiq materiallar bo'lib, kuchli yorug'lik nurlanishining infraqizil to'liqlarida zararlanishga moyil [2,3].

Chen va hamkorlari [4] polikristall kremniy yuzasida mikrokanallarni lazer bilan o'yish orqali polikristall kremniy quyosh batareyalarining fotoelektr konversiya samaradorligini oshirish uchun lazerdan foydalanganlar. Natijalar polikristall kremniy quyosh batareyalari va mikrokanallarning samaradorligi 0,23%–1,50% ga oshirilganligini ko'rsatdi. Karnakis va hamkorlari [5] 355 nm yuqori intensivlikdagi nanosekundli Nd:YAG lazeri yordamida monokristall kremniy o'yishni amalga oshirgan. Natijalar ko'rsatdiki, tushayotgan lazer intensivligi ma'lum chegaradan oshganda, kremniy yuzasida g'ayritabiiy yuqori o'yish chuqurligi kuzatiladi. Dobrzanski va hamkorlari [6] 1064 nm lazer to'liq uzunligidan foydalanib, quyosh polikristall kremniy yuzasining mikro-teksturasini qayta ishlagan, bu quyosh batareyasining yorug'likni ushlashini yaxshilagan.

2.1. Na'muna yuzasida bug' bosimi effekti

Lazer na'munani nurlatganda, energiyani so'rgan zarrachalar bir-biri bilan to'qnashib, energiyani uzatadi va material yuzasi harorati lazer energiyasi bilan qizdirilgandan keyin sezilarli darajada oshadi [7]. Uch to'liqlik lazer nurlangan hududlarining chegaralaridan tashqarida chaqish va to'liqlik qaltirashlar paydo bo'ladi, chunki nurlangan hududdagi material yuqori haroratga ega va to'liqlar atrofga tarqaladi. Lazer energiya zichligi polikristall kremniyning buzilish chegarasidan oshganda, lazer buzilishi yuz beradi. Material yuzasida hosil bo'lgan bug' tashqariga chaqish moddasi bilan modda bug'ini hosil qiladi va energiyani so'rishda davom etadi, shuning uchun u qisman ionlanib, yuqori harorat va yuqori bosimli plazma hosil qiladi.

300 K da polikristall kremniy materiallarining turli to'liq uzunliklari (1064 nm, 532 nm, 355 nm) uchun yorug'lik nurlanish chuqurligi koeffitsientlari (α^{-1}) mos ravishda 0,01, 1, 1000 ga teng [8]. Polikristall kremniyning to'liq diapazoni $E_g = 1,12$ eV. $E(\text{eV}) = h\nu = 1,24 \cdot \lambda^{-1}$ tenglamaga asosan, uch to'liq (1064 nm, 532 nm, 355 nm) uchun lazer foton energiyalari mos ravishda 1,165, 2,33 va 3,49 eV ni tashkil qiladi. Ushbu energiya ostida 1064 nm to'liq uzunligi asosan fototermik rejimda issiq eritish zarari bilan bog'liq. Nurlanish jarayonida erigan material ko'p bo'ladi va bug' bosimi ta'siri ostida chaqish hodisasi yuz beradi va aniqroq qaltirashlar hosil bo'ladi [9]. 532 nm to'liq uzunligi asosan issiq eritish zarari va fototermik zarar bilan bog'liq, lekin asosiy zarar fototermik zarardir. 355 nm to'liq uzunligida qaltirash darajasi nisbatan kichik.

2.2. Plazma termik zarba to'liq bosimi effekti

Polikristall kremniy materiallari yuzasida atom bog'lari o'rtasidagi bog'lash kuchi eng past bo'lganligi sababli, kesishuvchi tipdagi yoriq zararlanish hududi ko'rinadi. Lazer termik zarba to'liqni ta'siri ostida ustuvor va vayron qilingan old tomon o'zaro vertikaldir. Burchak 90° ni tashkil qiladi va bu C2 simmetriyasiga bo'ysunishi tufayli, bu qattiq donalararo sinish deb ataladi [10]. Biroq, yorilish zararlangan hududi nurlangan hudud markaziga ustuvor emas, balki maksimal daraja nurlangan hududning chekkasida joylashgan. Asosiy sabab lazer termik zarba to'liqni bosimi effektidir.

PVDF piezoelektrik yupqa qatlami, 0 dan 20 Gpa gacha o'lchash diapazoni va nanosekund darajasida chastota javobi bilan, yuqori bosim o'lchashning ideal sensori hisoblanadi [11]. Vaqt t

da, PVDF o'Ichagan kuchlanish signali $V(t)$ va PVDF ingichka yupqa qatlami yuzasidagi termik zarba bosimi $P(t)$ quyidagi bog'liqlikni qanoatlantiradi [12]:

$$P(t) = (K/AR) \int_0^t V(t)dt$$

Bu yerda K dinamik kalibratsiya koeffitsienti ($6,6 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{cm}^2/\mu\text{s}$), A PVDF ning samarali maydoni, R PVDF bilan parallel qarshilik (50Ω). 7-tenglama yordamida ostsillograf tomonidan aniqlangan kuchlanish signali lazer induktsiyalangan termik zarba to'qlini bosim signaliga aylantirilishi mumkin.

Lazer quvvat zichligi $6,3 \text{ GW/cm}^2$ bo'lganda uch to'qlinli lazerlarning birinchi to'qlin shakli. To'qlin uzunligi kamayishi bilan, ostsillograf termik zarba to'qlini piezoelektrik signal amplitudasini kamaytiradi. Bir xil quvvat zichligi ostida 1064 nm to'qlin uzunligining nisbatan bosimi eng katta ekanligi ko'rinadi. Lazer to'qlin uzunligining kamayishi bilan, lazer ablyatsiya termik zarba to'qlini bosimi kichikroq bo'ladi. Qisqa to'qlinli lazer quyidagi xususiyatlarga ega: kattaroq foton energiyasi, kattaroq so'rilish koeffitsienti, sayozroq nurlanish chuqurligi, lazer fotonlari-kremniy o'zaro ta'sir mexanizmi kuchayadi, bu qisqa to'qlinli lazer va polikristall kremniyning to'liq bog'lanishiga olib keladi [13].

Biroq, to'qlin uzunligining kamayishi kritik buzilish quvvati chegarasini kamaytirishga va lazer induktsiyalangan termik zarba to'qlini bosimini kamaytirishga olib keladi, bu termik zarba to'qlinlarining hosil bo'lishini cheklaydi [14]. Yuqori energiyali nanosekundli impulsli lazer na'muna materiali yuzasida ishlaydi va bosim impuls davomiyligi juda qisqa bo'lib, uning mexanik effekti impuls bilan xarakterlanadi va impuls termik zarba to'qlin mexanikasi effektining muhim parametrlaridan biri bo'lib, quyidagi ifoda bilan ifodalanadi [12]:

$$F = \int P(t)dt$$

2.3. Polikristall kremniyda lazer termik zarba to'qlining so'nish qonuni

Lazer quvvati $6,3 \text{ GW/cm}^2$ va to'qlin uzunligi 1064 nm bo'lgan piezoelektrik to'qlin shakli eng katta amplitudaga ega va boshqa to'qlin shakllariga o'xshash. 14-rasmdan lazer tomonidan induktsiyalangan termik zarba to'qlini va keyingi to'qlin aks ettirishi bilan eng katta cho'qqi hosil bo'lganligi aniqlandi. Shuningdek, termik zarba to'qlinlarining davriyligiga asosan polikristall kremniyda tarqaladigan termik zarba to'qlinlarining o'rtacha tezligi hisoblanishi mumkin. 11-rasmda ko'rsatilganidek, kuchlanish to'qlin shaklining ikki qo'shni impulsi o'rtasidagi davomiylik t ni tashkil qiladi, bu ikki qo'shni lazer termik zarba to'qlinlari na'muna materiali yuzasiga yetishish o'rtasidagi vaqt oralig'ini anglatadi. 14-rasmdan $t_{AB} = 55 \text{ ns}$, $t_{BC} = 60 \text{ ns}$ va $t_{CD} = 61 \text{ ns}$ o'qish mumkin. O'rtacha qiymat: $t_{ave} = 59 \text{ ns}$, va namuna qalinligi $d = 0,25 \text{ mm}$. Shunday qilib, $V = 2d/t$ formulasi asosida polikristall kremniy namunasida tarqaladigan termik zarba to'qlinlarining o'rtacha tezligi $v = 8,47 \times 10^3 \text{ m/s}$ chiqariladi.

Lazer tomonidan induktsiyalangan termik zarba to'qlinlari polikristall kremniy varag'ining old va orqa yuzasida uzluksiz aks ettiriladi. Shuning uchun termik zarba to'qlini polikristall kremniyning old va orqa yuzasida aks ettirilganda, termik zarba to'qlinlarining cho'qqi bosimining so'nish qonunini chizish uchun masofa ishlatilishi mumkin. 1-jadvalda termik zarba to'qlinlarining cho'qqi bosimi ko'rsatilgan.

Qalinlik (mm)	Nisbatan cho'qqi kuchlanish (10^7 Pa)	Uzatish yo'qotishsiz cho'qqi kuchlanish (10^7 Pa)
0,25	4,2	4,2
0,75	3,5	3,6
1,25	2,7	2,8
1,75	2,2	2,3

2,25	1,7	1,8
2,75	1,4	1,5

Ekspontensial so'nish moslash usuli bilan polikristall kremniydagi lazer termik zarba to'liqlining cho'qqi qiymatlarining so'nish qonuni chiqarildi: $P_{\max} = 5,37 \exp(-x/3 - 0,7)$. Bu formulada $P_{\max}$ termik zarba to'liqlining cho'qqi bosimi va x termik zarba to'liqlining tarqalish masofasidir. 12-tenglama asosida maksimal cho'qqi qiymati $4,67 \times 10^7$ Pa ni tashkil qiladi.

3. Xulosa

PVDF piezoelektrik membranining aniqlash texnikasi asosida, ushbu maqola polikristall kremniy materialini lazer nurlatish jarayonida lazer issiq termik zarba vayronkorlik hodisasini o'rganadi va polikristall kremniy materialiga lazer tomonidan induktsiyalangan termik zarba to'liqlar jarayonida to'liqlar effekti funksiyasini tahlil qiladi. Asosiy natijalar quyidagicha:

1. Impulsli lazer ta'siri jarayonida bug' bosimi va plazmaning birgalikdagi ta'siri yuqori haroratga ega eritmani chaqish hodisasiga hissa qo'shadi. Polikristall kremniyning lazer nurlanish hududida erishi va gazlanishi materialni olib tashlash sharoitini yaratadi. Bundan tashqari, bug' bosimi va plazma bosimi materialni olib tashlashga katta hissa qo'shadi. Lazer to'liqlar uzunligining kamayishi lazer va na'muna o'rtasida kuchliroq bog'lanishni ta'minlaydi, buzilish chegarasi qiymatini kamaytiradi va lazer termik zarba to'liqlarini kuchini zaiflatadi.

2. Yuqori bosimli tez kengayuvchi havo oqimi eritmani bosganda va na'muna materialining qattiq qismiga bog'langanda, yuzaga perpendikulyar bo'lgan qayta bosim hosil bo'ladi va elastik to'liqlar yuzada popereq to'liqlar hosil qilish uchun tashkil etiladi. Popereq to'liqlar tarqalishi suyuq-qattiq interfeys deformatsiyasiga olib keladi. Shu bilan birga, na'muna materiali yuzasidagi kuchlanish gradienti moir hodisasiga olib keladi.

3. Qattiq material kesishuvchi kuchlanishga qarshi kuchsizroq qobiliyatga ega, shuning uchun lazer termik zarba to'liqlari ta'siri ostida yorilish vayronkorlik hodisasi osongina kuzatiladi va vayron qilingan hudud lazer nurlanish hududining chekka hududidir.

4. Polikristall kremniy namunasida termik zarba to'liqlarining o'rtacha tarqalish tezligi $v = 8,47 \times 10^3$ m/s ni tashkil qiladi va polikristall kremniydagi lazer termik zarba to'liqlarining bosim cho'qqisining so'nish tendentsiyasi eksponensial taqsimlanish shaklida bo'ladi.

Adabiyotlar:

1. Li Z., Zhu W., Cheng J., Guo D., Wu H. Experimental study of high-power pulsed laser induced termik zarba waves in aluminum targets. Chin. J. Lasers, 1997, 24, 259.
2. Liu L., Wang S., Wu H., Guo D., Liao P. Experimental study of high-power laser induced termik zarba waves. Laser Technol., 2007, 31, 134.
3. Qi S. Interaction between Different Wavelengths Laser and Semiconductor Material HgCdTe and Si. Master's Thesis, Changchun University of Science and Technology, Changchun, China, 2010.
4. Chen H., Chang L., Jeng M., La C. Characterization of laser carved microchannel polycrystalline silicon solar cell. Solid State Electron., 2011, 61, 23-28.
5. Karnakis D.M. High power single-shot laser ablation of silicon with nanosecond 355 nm. Appl. Surf. Sci., 2006, 252, 7823-7825.
6. Dobrzanski L.A., Drygala A. Laser processing of multicrystalline silicon for texturization of solar cells. J. Mater. Proc. Technol., 2007, 191, 228-231.
7. Kumar R., Mavi H.S., Shukla A.K. Macro and micro-surface morphology reconstructions during laser-induced etching of silicon. Micron, 2008, 39, 287-293.

8. Huang M., Zhao F., Cheng Y., Xu Z. Origin of laser-induced near-subwavelength ripples interference between surface plasmons and incident laser. *ACS Nano*, 2009, 3, 4062.
9. Zhang L., Ni X., Lu J., Dai G. Numerical simulation of vaporization effect of long pulsed laser interaction with silicon. *Opt. Precis. Eng.*, 2011, 19, 437-444.
10. Kodama R., Norreys P.A., Mima K., Dangor A.E., Evans R.G., Fujita H., Kitagawa Y., Krushelnick K., Miyakoshi T., Miyanaga N. et al. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition. *Nature*, 2001, 412, 798-802.
11. Phipps C., Turner T., Harrison R.F., King T.R. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF and CO₂ single pulse laser. *Appl. Phys.*, 1988, 64, 1083.
12. Ren J. The Fundamental Physical Mechanisms and Characteristics in Laser Silicon Interaction. Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA, USA, 2005.
13. Zhang D., Li Z., Xiao G., Guan L. Kinetic Principle of Pulsed Laser Deposition. Beijing Science Press: Beijing, China, 2011.
14. Yang X. A Study on UV Laser Micro-Machining Single-Crystal Silicon. Master's Thesis, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, 2011.

TEMPERATURE DEPENDENCE OF VELOCITY OF ACOUSTIC WAVES IN SILICON CRYSTAL

I.Sh. Toshpulatov, V.N. Avdiyevich

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies

e-mail: ibrat.toshpulatov96@gmail.com

In recent years, there has been increased interest in the linear and nonlinear elastic properties of crystals used in optical signal processing devices such as modulators, deflectors, acousto-optic filters, etc. [1, 2]. This is due to the fact that the efficiency of acousto-optic devices is determined not only by photoelastic properties, but also by the elastic properties of the material used, including their anisotropy.

Sample preparation and research methods

A study of pure silicon (Si) was conducted. The sample, corresponding to the length of 0.589 cm, 0.587 cm, and 1.391 cm, respectively, has a parallelepiped shape with a [110] direction of 1° accuracy with directional. The non-parallelism of the ends perpendicular to the direction of acoustic wave propagation was no more than 30 arc seconds. To excite acoustic waves with a frequency of 30 MHz, piezoelectric transducers made of X- or Y-cut quartz with a natural resonant frequency of ~30 MHz were used. Acoustic contact between the transducer and the sample was created using organosilicon oil. Measurements were carried out in the temperature range from 300 to 410 K.

The amplitude of the total echo pulses, which is the result of the interference of acoustic signals, depends on the phase difference between the oscillations filling these pulses and the length of the sample L_0 . By changing the frequency of these oscillations within small limits, it is possible to fix the frequency values at which the amplitude of the total pulses reaches a minimum or maximum, and determine the velocity of the acoustic waves with an accuracy of ~ 0.1% from the relation [3]:

$$V = 2L_0\Delta\nu \quad (1)$$

where Δ is the difference between two adjacent frequencies at which the minimum of the total interference pulse is achieved. The accuracy of determining the acoustic wave velocity is limited by the limits of the sample length measurement and is $\sim 0.1\%$ [4]. The linear operating mode of the measuring system was ensured by an attenuator at the input of the measuring receiver.

Results and discussions

The characteristic surfaces of velocity and attenuation of acoustic waves can be constructed if all independent real (c'_{ijkl}) and imaginary (c''_{ijkl}) components of the complex elasticity tensor c_{ijkl} [5]:

$$c_{ijkl} = c'_{ijkl} + i c''_{ijkl} \quad (6)$$

Si has their own internal symmetry, resulting from the cube's elasticity tensor, and the three independent components of the real and imaginary parts must be known. Effectively, the elastic constants are the values c'_{eff} of the directions along the longitudinal and transverse acoustic waves for [110]; these are the acoustic wave velocity and attenuation coefficient, and the measurement results are based on the definition of [110].

The Si crystal elasticity tensor, taken from the present components of the values in [3], cites literature that provides a good fit. In crystals, each has an optional direction along the acoustic wave propagation velocity and attenuation coefficient expressions using the effective elastic constant, with calculations possible.

$$c'_{eff} = \rho V^2 \quad (7)$$

The real and imaginary effective elastic constants corresponding to the elasticity tensor are determined by [6]. Direction [110] of longitudinal acoustic wave propagation for acoustic waves to temperature relationship is shown in Figure 1.

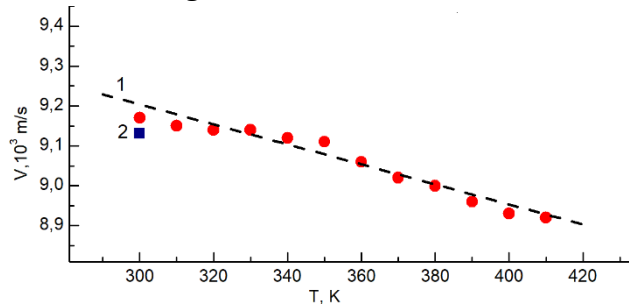


Fig. 1. Dependence of the acoustic wave velocity along [110] on temperature (1) in Si crystals. 2-data from [4].

It is evident that in the [110] direction of the Si crystal, the propagation of acoustic waves velocity slightly decreases with increasing temperature, the temperature from 300 K to 410 K increases in the [110] direction of the Si crystal, the propagation of acoustic velocity decreases by 0.3%. With an increase in temperature to 410 K, thermal expansion of the crystal and increased vibrations of atoms cause a decrease in the speed of sound waves by 0.3%. The calculation results in the form of dependence of the deviation of the polarization vectors of quasi-longitudinal waves on the direction of their propagation in the plane (110) are shown in Fig. 2. Since this plane is perpendicular to the axis of symmetry of the second order, the calculation data are presented in the range of angles from 0 to 180 degrees. Angles are measured from the [110] direction.

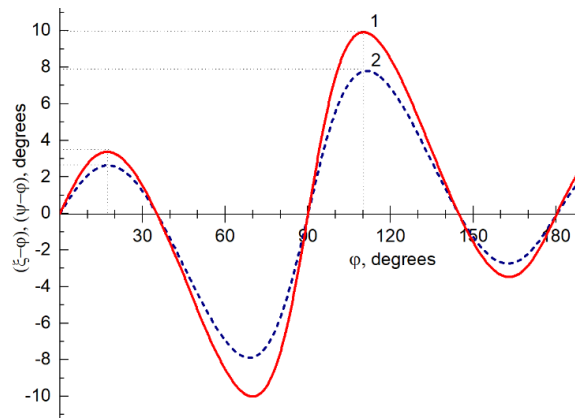


Fig. 2. Deviation of energy flux density (1) and polarization (2) of quasi longitudinal acoustic waves propagated in the (110) plane in Si crystal

Conclusion

The study simultaneously determined the temperature dependence of the attenuation coefficient and the propagation velocity of acoustic waves in a Si crystal. The obtained values of the real components of the elasticity tensor allow us to analyze the spatial distribution of these acoustic wave properties. It was shown that the attenuation coefficient of acoustic waves increases linearly not only at low temperatures but also at temperatures above room temperature. The experimental results obtained at room temperature are consistent with the results obtained from literature sources. The temperature coefficient of the velocity of acoustic waves is $\alpha = -2.46 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. It is evident that for these waves the maximum deviation of the polarization vector from the wave normal, equal to approximately ± 8 degrees, is observed when the wave normal is directed in the plane (110) at angles close to 60 or 110 degrees relative to the [110] axis.

Literature:

1. Y.V Gulyayev., VV Proklov., GN Shkerdin. Hard v telax sveta sound with Diffraction. Zrelishe Physicheskoy Nauka, 1978, 21(1). p 29-57.
2. V.Y Lyamov. In crystals acoustic voln polarization effekti i mutual effects of anisotropy. Moscow: MGU named after MV University Publisher: Lomonosov, 1983. p 224.
3. M. P. Shaskolskaya, deputy (ed) Acustika Crystals. Manual. Acoustic. Crystals. Handbook. Moscow: Nauka, 1982. p 632.
4. R.E Nyunxem. Materiali Properties / Anisotropy / Symmetry / Structure. (New York, Oxford) University Press, 2005). p 378.
5. F. R. Axmedjanov, V. V. Lemanov, A. N. Nasirov. In acoustic crystals attenuator poverxnosti JTF Pisma, 1980, 6(10):589-592.
6. F R. Axmedjanov., S. Z. Mirzayev., UA Saidvaliyev. Vismut. silikat v crystallax elastichniy anisotropy parameters. Segnetoelektriki, 2020, 556(1): 23-28.

IV ШЎБА. МУҚОБИЛ ЭНЕРГИЯ МАНБАЛАРИ

ФАКТОРЫ ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

К.А. Исмаилов, Ж.У. Жамалова, С.Т. Таджибаева, Ж.А. Ауезжанова

Каракалпакский госуниверситет им.Бердаха

Солнечная энергетика стремительно развивается, предлагая человечеству возможность получать чистую и возобновляемую энергию. Однако эффективность солнечных элементов, которые преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию, остаётся важным вопросом для дальнейшего прогресса отрасли. Поэтому солнечные энергетические системы считаются ключевым инструментом энергоснабжения нынешнего и будущих поколений. Давайте рассмотрим ключевые факторы, влияющие на эффективность солнечных элементов, что особенно важно в условиях глобального стремления к энергосбережению и сокращению выбросов парниковых газов. Одним из главных факторов, определяющих эффективность солнечных элементов, является материал, из которого они изготовлены. На сегодняшний день наиболее распространённым материалом для солнечных элементов является кремний. Существуют два основных типа кремниевых элементов: монокристаллические и поликристаллические. Монокристаллические элементы более эффективны (их КПД достигает 20-22%), так как электроны свободнее перемещаются в их структуре, но они дороже в производстве. Поликристаллические элементы имеют КПД около 15-17%, но они дешевле, что делает их более доступными.

Современные исследования в области солнечных элементов направлены на повышение их эффективности. Разрабатываются новые материалы, такие как перовскиты, которые могут предложить высокую эффективность при низкой стоимости производства. Кроме того, технологии, такие как нанотехнологии, позволяют создавать более тонкие и эффективные солнечные элементы, способные улавливать больше света. Многообещающие результаты показывают разработки в области гибридных солнечных систем, которые могут использовать одновременно солнечное излучение и тепло. Это позволяет увеличить общий КПД системы, что особенно важно для больших установок. Эффективность солнечных элементов определяется множеством факторов — от материалов, используемых для их производства, до климатических условий и угла установки. В условиях глобального роста интереса к возобновляемым источникам энергии ключевой задачей остаётся повышение эффективности и удешевление технологий солнечной энергетике. Новые разработки и технологии, такие как многоцелевые солнечные элементы, системы трекинга и охлаждения, а также усовершенствование материалов и защитных покрытий, помогут улучшить производительность солнечных панелей.

В заключении хотим отметить, что правильное проектирование и эксплуатация солнечных установок играют решающую роль в достижении максимальной эффективности и вкладе в глобальные задачи по энергосбережению.

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВОДЯНОГО КОНТУРА АВТОНОМНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ФОТОТЕПЛОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

О.Ф. Тукфатуллин*, К.А. Джумамуратов, В.Г. Дыскин, Д.А. Фаткуллаев

НИИ физики полупроводников и микроэлектроники

при НУУз им. М. Улугбека, Узбекистан, Ташкент, 100057, ул. Янги Алмазар, 20

*e-mail: oskar.tukfatullin@gmail.com

В последние годы в мире, в том числе в Республике Узбекистан, всё большее внимание уделяется развитию технологий использования возобновляемых источников энергии, прежде всего солнечной энергии. Одним из перспективных направлений является создание комбинированных фототеплопреобразовательных установок, позволяющих одновременно получать электрическую и тепловую энергию. Эффективность подобных установок во многом определяется гидравлическим и тепловым режимами работы водяного контура охлаждения, предназначенного для отвода избыточного тепла от фотоэлектрического модуля.

Контроль гидравлических параметров водяного контура является важным условием обеспечения стабильной и эффективной работы фототеплопреобразовательных установок. В этой связи возникает задача обоснованного выбора средств измерения давления, позволяющих контролировать режим циркуляции теплоносителя.

Целью настоящей работы является расчётное обоснование выбора диапазона и типа датчика давления для водяного контура автономной комбинированной фототеплопреобразовательной установки открытого типа [1].

Рассматриваемая система включает аккумулирующий бак объёмом 200 л, циркуляционный насос JT-750, датчик расхода YF-S201, трубчатый абсорбер параллельного типа и линии подачи и возврата воды в бак. Максимальная температура теплоносителя в системе может достигать 90 °С.

Циркуляционный насос JT-750 работает в диапазоне напряжений питания 6–12 В постоянного тока и способен создавать напор до 5 м водяного столба. Максимальное давление, создаваемое насосом, определяется выражением

$$P = \rho gh,$$

где ρ — плотность воды, g — ускорение свободного падения, h — напор насоса [2–4]. Подставляя значения $\rho \approx 10^3$ кг/м³, $g = 9,81$ м/с² и $h = 5$ м, получаем $P \approx 4,9 \times 10^4$ Па, что соответствует приблизительно 49 кПа. Таким образом, максимальное статическое давление в системе не превышает 50 кПа.

Гидростатическая составляющая давления, обусловленная разностью высот между началом линии подачи и концом линии возврата воды в бак, значительно меньше. Максимальный перепад высоты составляет около 0,59 м, что соответствует давлению менее 6 кПа. Следовательно, основная часть давления в системе определяется характеристиками циркуляционного насоса.

Фактический расход воды в системе измерялся с помощью датчика расхода YF-S201 и составляет 2,8–2,93 л/мин. В системе используется трубчатый абсорбер параллельного типа, состоящий из пяти стальных труб внутренним диаметром $d = 28$ мм и длиной $l = 0,98$ м каждая. Трубы соединены при помощи ПВХ-тройников в решётчатую

конструкцию (тип «harp»), обеспечивающую параллельное распределение потока теплоносителя.

Средний расход воды $q_{cp} \approx 2,9$ л/мин соответствует $4,8 \times 10^{-5}$ м³/с. Поскольку трубы соединены параллельно, расход через одну трубу составляет $q_1 = q_{cp}/5 \approx 9,6 \times 10^{-6}$ м³/с. Площадь поперечного сечения трубы определяется выражением

$$S = \frac{\pi d^2}{4}$$

и составляет приблизительно $6,15 \times 10^{-4}$ м². Средняя скорость потока воды в одной трубе равна $v = q_1/S \approx 0,016$ м/с.

Для определения режима течения рассчитывается число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu},$$

где μ — динамическая вязкость [2–4]. При температуре воды 20 °С динамическая вязкость воды составляет примерно 1×10^{-3} Па·с. Подставляя соответствующие значения, получаем $Re \approx 450–500$. Это значение значительно меньше критического значения $Re = 2300$, что свидетельствует о ламинарном режиме течения жидкости в трубах абсорбера.

Потери давления в трубах могут быть оценены по формуле Дарси–Вейсбаха

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2},$$

где λ — коэффициент гидравлического трения [2–4]. Для ламинарного режима течения $\lambda = 64/Re$. Подставляя полученные значения, получаем, что потери давления в одной трубе составляют доли паскаля. Даже с учётом местных сопротивлений тройников и соединительных элементов суммарный перепад давления на абсорбере не превышает нескольких десятков паскалей (менее 0,02 кПа).

Полученные результаты показывают, что гидравлическое сопротивление абсорбера чрезвычайно мало по сравнению с давлением, создаваемым циркуляционным насосом. Перепад давления на абсорбере составляет менее 0,1 % от рабочего давления системы. В связи с этим использование двух датчиков давления для измерения перепада давления не является целесообразным.

Рациональным решением является установка одного датчика давления после насоса, перед входом в абсорбер. Такой датчик позволяет контролировать фактический напор насоса, выявлять возможные нарушения циркуляции, завоздушивание системы или засоры трубопроводов, а также контролировать изменение режима работы насоса при изменении напряжения питания.

В качестве измерительного элемента был выбран керамический датчик давления серии XDB401 с диапазоном измерения 0–50 кПа. Данный диапазон соответствует максимально возможному давлению в системе, определяемому характеристиками циркуляционного насоса. При реальных режимах работы установки давление в системе находится в пределах 20–40 кПа, что соответствует средней части диапазона измерений датчика и обеспечивает достаточную чувствительность и точность измерений.

Керамические чувствительные элементы обладают рядом преимуществ: устойчивостью к высоким температурам, высокой долговременной стабильностью, устойчивостью к коррозии и возможностью длительного измерения статического давления.

В отличие от пьезоэлектрических датчиков, которые лучше подходят для регистрации динамических процессов, керамические датчики оптимальны для измерения квазистационарного давления в гидравлических системах.

Совместное использование датчика давления, датчика расхода воды и датчиков температуры на входе и выходе абсорбера позволяет получать комплексную информацию о режиме работы установки. На основе измеренного расхода и разности температур можно определить тепловую мощность системы по выражению

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p \Delta T,$$

где $\dot{m}$ — массовый расход воды, c_p — удельная теплоёмкость воды, ΔT — повышение температуры теплоносителя. При расходе около 2,9 л/мин массовый расход воды составляет приблизительно 0,048 кг/с. Даже при увеличении температуры воды на 5–10 °С тепловая мощность установки может составлять от 1 до 2 кВт.

Таким образом, проведённый расчётный анализ показывает, что давление в водяном контуре автономной фототеплопреобразовательной установки открытого типа определяется в основном характеристиками циркуляционного насоса, тогда как гидравлическое сопротивление абсорбера практически не влияет на режим циркуляции. Выбор керамического датчика давления диапазона 0–50 кПа является технически обоснованным и обеспечивает оптимальную чувствительность измерений без избыточного диапазона. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем мониторинга и автоматизации автономных солнечных тепловых установок.

Литература:

1. Тукфатуллин О.Ф. и др. Комбинированная фототеплопреобразовательная установка. Патент РУз № FAP 2545, 2024.
2. Çengel Y.A., Cimbala J.M. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill, 2014.
3. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley, 2013.
4. Idelchik I.E. Handbook of Hydraulic Resistance. CRC Press, 1994.

ОПТИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ИНКАПСУЛЯНТА ЭВА В СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЯХ ПОСЛЕ 14 ЛЕТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Г. Дыскин^{1,2}, И.А. Юлдашев², Ю.М. Курбанов², И.А. Хамдамова².

¹ *НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз им. М. Улугбека, Узбекистан, 100057, Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20*

² *Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2*

Срок службы фотоэлектрического модуля (ФЭМ) определяется временем его безотказной генерации электроэнергии, полезной для потребителя [1]. Продолжительность эксплуатации ФЭМ зависит от скорости деградации его компонентов, которая, в свою очередь, определяется техническими характеристиками панели и климатическими условиями местности [1–3]. Процессы деградации приводят к нарушению целостности конструкции, снижению оптических и электрических

характеристик, а также к возможному выходу ФЭМ из строя [2]. Одним из критически важных элементов ФЭМ является инкапсулянт из этиленвинилацетата (ЭВА), подверженный деструкции под воздействием окружающей среды [3]. Изменение цвета ЭВА - это следствие фотохимических процессов, протекающих при высоких температурах под воздействием солнечного излучения и влияющих на выходную мощность ФЭМ [1-3]. В работе представлены результаты количественной оценки оптической деградации инкапсулянта и установлена её прямая связь со снижением эффективности модуля.

Образцы пленки ЭВА толщиной 0,42 мм были вырезаны с внешней стороны модуля, который эксплуатировался в течение 14 лет в условиях резко континентального климата Узбекистана. Образцы были промыты дистиллированной водой и осушены струей теплого воздуха. Изменение окраски ЭВА с прозрачного/белого (рис. 1а) на желто-бурый (рис. 1б) свидетельствует о поглощении излучения в диапазоне 435–480 нм. Для проверки этого



Рис. 1. Образцы инкапсулянта ЭВА до начала эксплуатации (а) и через 14 лет (б)

предположения с помощью двухлучевого спектрофотометра Shimadzu UV-2600i были измерены коэффициенты пропускания и отражения образцов (рис. 2). Пик поглощения в районе 1200 нм обусловлен растягивающими колебаниями С–Н-связей в метильных (-С–Н₃) и метиленовых (-С–Н₂) группах. Усредненный по спектру коэффициент пропускания исходной пленки составил 84,7 %. За 14 лет эксплуатации среднее значение пропускания снизилось до 59,5 %, то есть прозрачность уменьшилась на 25,5 %. Показатель преломления ЭВА можно оценить через коэффициент отражения R, используя формулу для нормального падения света на границу раздела воздух-пленка:

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1)$$

Из графика на рис. 2 (кривая 3) видно, что коэффициент отражения R в видимой области составляет около 20%. Решая уравнение (1) относительно n, получим 2,61. Для чистого ЭВА n = 1,48. Столь высокое расчетное значение (2,61) объясняется структурой образца: вкрапления белых точек (рис. 1б) создают диффузное рассеяние,

которое спектрофотометр фиксирует как повышенное отражение. Визуально образец — это желтая пленка ЭВА с белыми включениями можно считать композитной средой, оптические постоянные которой можно определить с помощью теория эффективной среды Бруггемана.

Коэффициент поглощения вычисляется через коэффициент пропускания T и толщину образца $d = 0,042$ см:

$$a = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T} \quad (2)$$

Для образца ЭВА в желтой области спектра (около 500–600 нм) пропускание $T \gg 60\%$ коэффициент поглощения $a \gg 12,14 \text{ см}^{-1}$, показатель поглощения $k \gg 5,3 \times 10^{-5}$. Так как $k \ll n$, то формула Бруггемана можно записать в виде:

$$f_1 \frac{n_1^2 - n_{\text{eff}}^2}{n_1^2 + 2n_{\text{eff}}^2} + (1 - f_1) \frac{n_2^2 - n_{\text{eff}}^2}{n_2^2 + 2n_{\text{eff}}^2} = 0 \quad (3)$$

n_{eff} — показатель преломления композита; n_1, f_1 — показатель преломления и объемная доля первой компоненты; n_2, f_2 — показатель преломления и объемная доля второй компоненты. Выполняя алгебраические преобразования, получим из (3) выражение для вычисления объемной концентрации первой компоненты [4]

$$f_1 = \frac{(n_{\text{eff}}^2 - n_1^2)(n_2^2 + 2n_{\text{eff}}^2)}{3n_{\text{eff}}^2(n_2^2 - n_1^2)} \quad (4)$$

Предполагая, что первая компонента - это частицы загрязнения, например сажа или углерод $n_1 \gg 3$, а вторая компонента ЭВА $n_2 \gg 1,48$, по формуле (4) была рассчитаны объемные концентрации компонентов $f_1 \gg 75,0\%$, $f_2 \gg 25,0\%$. На основании полученных результатов, можно предположить, что приповерхностный слой ЭВА представляет собой композит, состоящий из продуктов деградации полимера и внедренных частиц атмосферных загрязнений (преимущественно сажи). Высокий оптический контраст между матрицей ЭВА и углеродными включениями превращает сохранившиеся участки чистого полимера в центры интенсивного рассеяния, которые визуально определяются как белые включения на желтом фоне. Полученные результаты сведены в таблицу (составлена с помощью лингвистической модели ИИ Gemini (Google)).

Сравнительные характеристики ЭВА до и после 14 лет эксплуатации

Параметр	Исходный ЭВА (новый)	Деградирующий слой (14 лет)	Причина изменений
Цвет и вид	Бесцветный, прозрачный	Буро-желтый, белые вкрапления	Хромофоры (– C=C–), сажа, рассеяние
Коэф. отражения	(3,7%)	20%	Рост оптической плотности поверхности
Показатель преломления	1,48	2,61	Карбонизация и внедрение сажи (75%)
Коэф. поглощения, см ⁻¹		12,14	Формирование систем сопряженных связей
Показатель поглощения		$5,3 \times 10^{-5}$	Селективное поглощение в синей области
Объемная доля ЭВА	100%	25 %	Распад матрицы и замещение примесями

Вывод для ФЭМ: За 14 лет эксплуатации приповерхностный слой трансформировался в высокопреломляющий экран. Основной вклад в падение КПД вносит рост коэффициента отражения в 5,4 раза, что блокирует доступ фотонов к активному слою кремния.

Литература:

1. C. Deline, D. Jordan, B. Sekulic, J. Parker, B. McDanold, and A. Anderberg. 2024. PV Life time Project – 2024 NREL Annual Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5K00-90651.
2. M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle. Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.159, pp. 112160, 2022. doi:10.1016/j.rser.2022.112160.
3. M.C.C de Oliveira, Diniz Cardoso ASA, M.M. Viana, Lins V de FC. The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review. Renew Sustain Energy Rev 2018;81:2299–317. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.039.
4. V. G. Dyskin, S. X. Suleymanov, M. U. Djanklich, N. A. Kulagina, and U. B. Hamdamov. Modeling of antireflective gradient coatings for solar cells, Applied Solar Energy, 2024, Vol. 60, No. 4, pp. 559–565. DOI: 10.3103/S0003701X24602722

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФЭМ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

О.Ф. Тукфатуллин¹, Б.Н. Бутунбаев²

¹НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз им. М. Улугбека,
Узбекистан, 100057, Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20

²Конструкторское бюро и научно-технический центр опытного производства АН
РУз

Узбекистан, 100125, Ташкент, ул. Дурмон йули, 40

baxtiyorbutunbayev@gmail.com

В процессе загрязнения поверхности фотоэлектрических модулей (ФЭМ) загрязняющие факторы природного происхождения играют ключевую роль. Существует множество научных публикаций, в которых для моделирования загрязнения применяется один или сразу несколько наборов погодных параметров, таких как концентрация взвешенных частиц на воздухе, скорость и направление ветра, влажность воздуха, температура и частота осадков и др. [1, 2]. В этой работе рассматривается, как погодные факторы окружающей среды влияют на производительность ФЭМ. Это даёт возможность заранее определить, как погодные условия местности будут влиять на производительность фотоэлектрических станции (ФЭС), где планируется строительство, или проводить мониторинг уже построенных ФЭС в реальном времени. Множество моделей, учитывающих концентрации взвешенных частиц PM₁₀/PM_{2.5} и погодные параметры, проверялись в тех регионах, где проводились исследования, поэтому их точность для климатических условий Узбекистана не гарантирована. Исходя из этого, была поставлена задача разработать собственную модель, учитывающую аридный климат страны.

Для прогноза суточного уровня загрязнения модуля можно использовать дискретную модель накопления массы частиц на Δt . Если за некоторый день выпало количество осадков выше порога (например, 3 мм), предполагается, что ФЭМ полностью смыта, и Δm сбрасывается в 0. Если дождя нет, считаем суточное приращение массы осадков пропорциональным концентрациям PM. По модели Coello – Boyle масса отложений приращивается как [3]:

$$\Delta m = (PM_{10} * v_{10} + PM_{2.5} * v_{2.5}) \Delta t \cos \varphi \quad ((1))$$

где PM_{10} и $PM_{2.5}$ – среднесуточные концентрации частиц в г/м³, v_{10} , $v_{2.5}$ – соответствующие скорости оседания, Δt – время экспозиции, в нашем случае берем длительность суток 86400 с, φ – угол наклона модуля.

Поскольку в процессе загрязнения модуля относительная влажность воздуха и ветер играют ключевую роль, итоговую формулу модели можем записать в виде:

$$\Delta m = (PM_{10} * v_{10} + PM_{2.5} * v_{2.5}) \Delta t \cos \varphi F_{RH} F_{вет} \quad ((2))$$

где F_{RH} и $F_{вет}$ функции, учитывающие влияние влажности воздуха и ветра.

Относительная влажность усиливает адгезию частиц. При RH выше ~70% капиллярные силы удерживают влагу и пыль на поверхности, что приводит к усиленному оседанию загрязняющих частиц [4]. Учитывая это, опишем функцию учитывающий влажность воздуха в виде:

$$F_{RH} (RH) = 1 + c \frac{\max(0, RH - 70)}{30} \quad ((3))$$

где c – параметр, RH – относительная влажность.

Ветер может способствовать загрязнению и в то же время очищению поверхности ФЭМ от загрязнений в зависимости от скорости и направления. Во многих экспериментах

[1, 2] было доказано, что лобовой ветер усиливает загрязнение, а боковые ветры очищают поверхность от загрязнений. Исходя из этого функцию, учитывающую влияние ветра, можем записать в виде:

$$F_{\text{вет}}(w) = \text{clamp}\left(1 + a_{\text{dep}} \frac{w}{w + w_{\text{dep}}} \cos\beta - a_{\text{det}} \frac{w}{w + w_{\text{det}}} |\sin\beta|, 0.1, 3\right) \quad ((4)$$

где w – средняя скорость ветра, параметры a_{dep} и a_{det} характеризуют влияние ветрового воздействия на процессы загрязнения поверхности ФЭМ. w_{dep} и w_{det} – коэффициенты насыщения нормировочной функции, характерные для загрязнения и очищения от пыли. β – угол направления ветра, $\beta \in [-\pi/2; \pi/2]$. Углы направления ветра считаются так, чтобы лобовой ветер соответствовал $\beta = 0^0$. Множитель $\cos\beta$ учитывает лобовые составляющие ветра, а $|\sin\beta|$ – боковые составляющие. Ветры, сдувающие с тыльной стороны ФЭМ, не учитываются, поэтому при углах $\beta \notin [-\pi/2; \pi/2]$ влияние ветра считается незначительным, и принимается $F_{\text{ветер}} = 1$. Оператор $\text{clamp}(f(x), 0.1, 3)$ ограничивает результаты функции в разумном интервале для правильной интерпретации:

$$\text{clamp}(f(x), 0.1, 3) = \begin{cases} 0.1, & f(x) < 0.1 \\ f(x), & 0.1 \leq f(x) \leq 3 \\ 3, & f(x) > 3 \end{cases} \quad ((5)$$

Теперь, подставляя (3) и (4) в (2), получаем следующее выражение:

$$\Delta m = 86400 * \cos\varphi (PM_{10} * v_{10} + PM_{2.5} * v_{2.5}) \left(1 + c \frac{\max(0, RH-70)}{30}\right) * \\ * \text{clamp}\left(1 + a_{\text{dep}} \frac{w}{w + w_{\text{dep}}} \cos\beta - a_{\text{det}} \frac{w}{w + w_{\text{det}}} |\sin\beta|, 0.1, 3\right) \quad ((6)$$

Для каждого дня обновляем приращение $m(t) = m(t-1) + \Delta m$ и находим связь между накопленной массой и падением мощности КЗ $= P(t)_{\text{прог}}/P_{\text{чис}} \approx \exp(-\alpha m(t))$, где КЗ – коэффициент загрязнения. Итого прогнозируемую мощность ФЭМ для t -го дня с помощью разработанной модели можно выразить так:

$$P(t)_{\text{прог}} = P_{\text{чис}} e^{-\alpha m(t)} \quad ((7)$$

где $P(t)_{\text{прог}}$ – прогнозируемая мощность, $P_{\text{чис}}$ – мощность чистого ФЭМ, α – параметр. Для идентификации параметров модели v_{10} , $v_{2.5}$, c , a_{dep} , a_{det} , w_{dep} , w_{det} , α авторами была разработана программа на Python 3 с использованием библиотеки SciPy, в которой оценка параметров выполнялась методом нелинейных наименьших квадратов путём минимизации суммы квадратов невязок между измеренными и расчётными значениями мощности ФЭМ.

Качество измерений метеорологических параметров, особенно концентрации взвешенных частиц РМ, напрямую определяет достоверность входных параметров модели. Наличие систематических погрешностей или высокой вариабельности измерений приводит к искажению оценки скорости накопления загрязнений, что, в свою очередь, снижает точность прогноза выходной мощности ФЭМ. Поэтому в экспериментах было принято решение использовать данные автоматической станции мониторинга качества воздуха, находящейся вблизи экспериментальной установки, установленной Узгидрометцентром при поддержке Zamin Foundation (рис. 1). Данная станция представляет собой полнофункциональный автоматизированный измерительный комплекс высокой точности компании HORIBA, оснащённый сертифицированными аналитическими приборами, а также системой калибровки и контроля качества, соответствующей международным стандартам [5].



Рис. 1. Автоматическая станция мониторинга качества атмосферного воздуха, установленной Узгидрометцентром при поддержке Zamin Foundation [5].

Выводы:

- Разработана и верифицирована математическая модель прогнозирования загрязнения ФЭМ, использующая метрологические входные данные и учитывающая климатические особенности Узбекистана;
- Разработана программа на Python для автоматизированной подгонки параметров модели методом нелинейных наименьших квадратов. Программа обеспечивает объективную оценку коэффициентов и быструю адаптацию модели к новым входящим данным.

Литература:

1. Zheng, C., H. Tuo, H. Lu, Y. Liu. Experimental study of dust accumulation of photovoltaic modules under different wind directions and its effect on power output characteristics. // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2026. T. 79, C. 107759. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2026.107759>.
2. Goossens, D., Z.Y. Offer, A. Zangvil. Wind tunnel experiments and field investigations of eolian dust deposition on photovoltaic solar collectors. // *Solar Energy*. 1993. T. 50, № 1, C. 75-84. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90009-D](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90009-D).
3. Coello, M., L. Boyle. Simple Model for Predicting Time Series Soiling of Photovoltaic Panels. // *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2019. T. 9, № 5, C. 1382-1387. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2919628>.
4. Bessa, J.G., L. Micheli, F. Almonacid, E.F. Fernández. Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies. // *iScience*. 2021. Vol. 24, No. 3, pp. 102165. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102165>.
5. UzDaily. Three new air quality monitoring stations installed in Tashkent. URL: <https://www.uzdaily.uz/en/three-new-air-quality-monitoring-stations-installed-in-tashkent/> (дата обращения: 24 февраль 2026 г.).

RUX OKSIDINI QAYTARILISHI JARAYONI MUJASSAMLANGAN QUYOSH NURI TASIRIDA KECHISH

S.X. Sulaymonov, R.R. O‘rinboyev

O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi Materialshunoslik instituti

O‘zbekiston Respublikasi 100084, Toshkent sh., Chingiz Aytmatov ko‘chasi, 2 B.

e-mail: rahimjonravshanovich1990@gmail.com

Hozirgi kunda shamol va mujassamlanmagan quyosh energiyasi kabi qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanish bilan birgalikda energiya samaradorligi ko‘plab mahalliy energiya ehtiyojlarini qondirishi mumkin, ammo energiya talab qiladigan va yuqori haroratli jarayonlarga, ayniqsa sanoat va transportga ta’siri kamroq. Geliostatlar va texnologik minoralardan foydalanadigan keng miqyosli va mujassamlangan quyosh tizimlari yoqilg‘i va boshqa mahsulotlarni ishlab chiqarish uchun termal va termokimyoviy jarayonlarni boshqarish, shuningdek an’anaviy yuqori haroratli sanoatni boshqarish uchun yuqori haroratli texnologik jarayonlarni issiqlik bilan ta’minlashi mumkin.

Quyosh reaktorini loyihalash jarayonida ko‘plab o‘zgaruvchilarni hisobga olish kerak, ularning ko‘pchiligi o‘zaro bog‘liq [1]. Muayyan kimyoviy jarayonlar muqarrar ravishda turli reaktor konstruksiyalariga va rivojlanishning turli yondashuvlariga olib keladi. Ko‘pgina hollarda issiqlik va massa uzatishning roli reaktorni loyihalashda eng muhim omil hisoblanadi [2], Quyosh termokimyoviy reaktori H₂O ning parchalanish davrlarini o‘z ichiga olgan quyosh jarayonlarining asosiy tarkibiy qismidir. Quyosh muhandisligida quyosh oynasini mujassamlash tizimlarini hisoblash nazariyasi ancha to‘liq ishlab chiqilgan (Zohidov, Grilixes va b. asarlari), quyosh muhandisligi mutaxassislariga yaxshi ma’lum. Amalda oynaliy mujassamlash tizimining energiya xarakteristikalarini hisoblash uchun hal qilinayotgan masalaga, kerakli aniqlikka va hokazolarga qarab turli usullardan foydalaniladi [3]. Noto‘g‘ri oynaliy mujassamlash tizimi uchun, nometall proyektorlar sinfiga tegishli (8 yoki undan ko‘p yoy daqiqalaridagi noaniqliklar), energiya xususiyatlarini hisoblash uchun empirik Aparisi formulasidan foydalanish mumkin, bu shakl [4]:

$$E(r) = E_0 R_s \sin^2(U_m) h_A^2 \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 e^{-\left(h_A \frac{180r}{\pi p}\right)^2 (1+\cos(U_m))^2} \quad 1$$

bu yerda E_0 - to‘g‘ridan-to‘g‘ri quyosh nurlanishi, U_m - kontsentratorning ochilish burchagi, h_A - aniqlik parametri. Aniqlik parametri odatda eksperimental ma’lumotlar asosida aniqlanadi va kontsentratorning energiya xususiyatlariga ta’sir qiluvchi barcha omillarni o‘z ichiga oladi.

Biroq, amalda, ko‘zgularning sirt xatosidan tashqari, ko‘plab omillarning ta’sirini minimallashtirish mumkin. Shuning uchun ma’lum hollarda h_A va sk o‘rtasida aniq bog‘liqlik mavjud (sk - ko‘zgularning burchak xatosi).

Quyosh diskining bir xil yorqinligini hisobga olsak, ushbu parametrlarni bog‘laydigan [5] da quyidagi bog‘liqlik olingan:

$$h_A = \frac{\sqrt{\operatorname{erf}(\phi_c/\sqrt{2}\sigma_k)}}{\phi_c} \quad 2$$

Bu erda phs - Quyoshning kattaligi (Yer uchun 16 minut), erf - xato funksiyasi:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad 3$$

Eslatib o'tamiz, agar tasodifiy sonlar to'plami standart og'ish s bilan normal taqsimotdan keyin bo'lsa, u holda sonning o'rtacha qiymatdan a dan ko'p bo'lmagan chetga chiqish ehtimoli teng bo'ladi.

Quyosh muhandisligida quyosh oynasini mujassamlash tizimlarini hisoblash nazariyasi ancha to'liq ishlab chiqilgan quyosh muhandisligi mutaxassislariga yaxshi ma'lum. Amalda oynaliy mujassamlash tizimining energiya xarakteristikalarini hisoblash uchun hal qilinayotgan masalaga, kerakli aniqlikka va hokazolarga qarab turli usullardan foydalaniladi [3], Noto'g'ri oynaliy mujassamlash tizimi uchun, nometall proyektorlar sinfiga tegishli (8 yoki undan ko'p yoy daqiqalaridagi noaniqliklar), energiya xususiyatlarini hisoblash uchun empirik Aparisi formulasidan foydalanish mumkin, bu shakl [7]:

$$E(r) = E_0 R_s \sin^2(U_m) h_A^2 \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 e^{-\left(h_A \frac{180r}{\pi p}\right)^2 (1+\cos(U_m))^2} \quad 4$$

bu yerda E_0 - to'g'ridan-to'g'ri quyosh nurlanishi, U_m - kontsentratorning ochilish burchagi, h_A - aniqlik parametri. Aniqlik parametri odatda eksperimental ma'lumotlar asosida aniqlanadi va kontsentratorning energiya xususiyatlariga ta'sir qiluvchi barcha omillarni o'z ichiga oladi.

Biroq, amalda, ko'zgularning sirt xatosidan tashqari, ko'plab omillarning ta'sirini minimallashtirish mumkin. Shuning uchun ma'lum hollarda h_A va sk o'rtasida aniq bog'liqlik mavjud (sk - ko'zgularning burchak xatosi).

Eslatib o'tamiz, agar tasodifiy sonlar to'plami standart og'ish s bilan normal taqsimotdan keyin bo'lsa, u holda sonning o'rtacha qiymatdan a dan ko'p bo'lmagan chetga chiqish ehtimoli teng bo'ladi.

Ushbu ilmiy ishda H_2O ni termokimyoviy parchalash orqali H_2 olish texnologiyasiga ustuvor ahamiyat beriladi. Bu termokimyoviy usulning ikki bosqichdan iboratligi bilan bog'liq. Masalan, ZnO/Zn tizimi uchun dastlab ZnO dissotsilanish jarayoni sodir bo'ladi va metall Zn olinadi. Bu reaksiyada erkin O_2 chiqib ketadi. Keyingi bosqichda metall $Zn \sim 350 - 450^\circ C$ haroratda oksidlanadi va erkin H_2 olinadi. Bu reaksiya yaxshi, chunki H_2 va O_2 hosil qilish jarayoni ajralib turadi va $H_2 - O_2$ portlovchi aralashmalarini hosil qilish uchun sharoit yo'q. Bu, ayniqsa, sof H_2 bilan ishlash tajribasi va zarur infratuzilmaga ega bo'lmagan institutimiz uchun juda muhim. Shunga asoslanib, biz eng xavfsiz, minimal xavf bilan H_2O ni termokimyoviy parchalanish texnologiyasini tanladik.

ZnO ning karbotermik qaytarilishi uchun laboratoriya seriyali quyosh reaktori loyihalashtirilgan va ishlab chiqarilgan. Reaktor vertikal optik o'qi bo'lgan quyosh pechining markazlashtirilgan nuqtasida ishlashga mo'ljallangan.

ZnO ning termal dissotsiatsiyasi bilan solishtirganda, uglerodning ZnO ga qo'shilishi ikkita asosiy afzalliklarni beradi:

- 1) zarur jarayon haroratini taxminan 600 K ga kamaytiradi;
- 2) hosil bo'lgan gaz asosan Zn va CO dan iborat (Zn va O_2 emas). Bunday gaz aralashmasidan Zn ning kondensatsiyasi asosan sink bug'lari va kislorodning ZnO hosil qilish uchun rekombinatsiyasini oldini oladi.

ZnO ning termal dissotsiatsiya jarayoniga o'xshab, quyosh issiqligidan foydalangan holda karbotermik sink quyosh energiyasini moslashuvchan saqlashni ta'minlaydi. Zn metallini saqlash va tashish mumkin, bu uning energiya tarkibini moddiy aylanish jarayonini yopadigan turli jarayonlarda yanada foydalanish imkonini beradi.

ZnO ning quyosh karbotermik kamayishi uchun oqim jadvali, shu jumladan Zn ni qayta tiklashning turli jarayonlari

ZnO ning karbotermik qaytarilishi uchun soddalashtirilgan kimyoviy reaksiya:



Termodinamik jihatdan reaksiya 1220 K dan yuqori haroratlarda yakunlanadi.

Tegishli reaksiya tezligiga erishish uchun 1400 - 1500 K atrofidagi haroratlarda ishlash tavsiya etiladi.

Adabiyotlar ro'yxati:

1. Funke H.H., Diaz, H., Liang X., Carney C.S., Weimer A.W., Lib P. Hydrogen generation by hydrolysis of zinc powder aerosol // Int. J. Hydrogen Energ. -2008. -Vol. 33. -P. 1127 - 1134.
2. Chambon M., Abanades S., Flamant G. Kinetic investigation of hydrogen generation from hydrolysis of SnO and Zn solar nanopowders // Int. J. Hydrogen Energ. -2009. -Vol. 34. -P. 5326 - 5336.
3. Lv M., Zhou J., Yang W., Cen K. Thermogravimetric analysis of the hydrolysis of zinc particles // Int. J. Hydrogen Energ. -2010. -Vol. 35. -P. 2617 - 2621.
4. Loutzenhiser P.G., Galvez M.E., Hischer I., Stamatiou A., Frei A., Steinfeld A. CO₂ splitting via two-step solar thermochemical cycles with Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄ redox reactions II: Kinetic analysis // Energ. Fuel. -2009. -Vol. 23. -P. 2832 - 2839.
5. Stamatiou A., Loutzenhiser P.G., Steinfeld A. Solar syngas production via H₂O/CO₂- splitting thermochemical cycles with Zn/ZnO and FeO/Fe₃O₄ redox reactions // Chem. Mater. -2010. -Vol. 22. -P. 851 - 859.
6. Balat M. Possible methods for hydrogen production // Energy Sources Part A: Recover. Util, Environ Eff. -2009. -Vol. 31. -P. 39 - 50.
7. Steinfeld A., Palumbo R. Solar thermochemical process technology. In: Meyer RA, editor. // Encyclopedia of Physical Science & Technology, 15. Academic Press; 2001. p. 237 - 56.
8. Steinfeld A. Solar thermochemical production of hydrogen-a review // Sol Energy. -2005. - Vol. 78. -P. 603 - 15.

Sb_xSe_y YUPQA QATLAMLARIDAGI XUSUSIY NUQTAVIY NUQSONLAR

**K.M. Kuchkarov^{1,2}, B.A. Ergashev¹, A. Nasirov², M.P. Pirimmatov¹,
A.S. Matmurodov¹, X.Z. To'liboyeva^{1,2*}**

¹O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi S.A Azimov nomidagi Fizika Texnika Instituti, 100212, O'zbekiston, Toshkent sh. Chingiz Aytmatov ko'chasi 2B-uy.

²Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy Universiteti, 100174, O'zbekiston, Toshkent shahri, Talabalar shaharchasi, Universitet ko'chasi 4-uy.

Bugungi kunda Sb₂Se₃ quyosh elementining fotoelektrik parametrlari quyidagi qiymatlarga erishilgan: U_{oc}=0,467 V, I_{sc}=33,52 mA, FF(%) ≤ 0,68, η=10,57%. Quyosh elementining qisqa tutashuv toki o'zining chegaraviy qiymatiga yaqin. So'ngi yillarda QE ning salt yurish kuchlanishi

va to'ldirish koefitsiyentining qiymatlari sezilarsiz oshgan. Quyosh elementining samaradorligini bundan keyingi yuqori qiymatiga erishish uchun salt yurish kuchlanishi va to'ldirish koefitsiyentining oshishi bilan amalga oshirish mumkin. Adabiyot ma'lumotlari tahliliga ko'ra QE ning salt yurish kuchlanishi kamayishiga olib keluvchi sabablardan biri, bu Sb_2Se_3 yupqa qatlamini o'stirish jarayonida Sb_2Se_3 baza qatlamidagi boshqarib bo'lmaydigan murakkab xususiy nuqtaviy nuqsonlarni (Se_{Sb1} , Se_{Sb2} , $2Se_{Sb1}$, $2Se_{Sb2}$, V_{Sb1} , V_{Sb2} , Sb_{Se1} , Sb_{Se2} , Sb_{Se3} , V_{Se1} , V_{Se2} , V_{Se3}) hosil bo'lishidir [9]. Hozirgi kunda Sb_xSe_y yupqa qatlamlarini o'stirish uchun qo'llanilayotgan mavjud usullar ushbu nuqsonlarni boshqarish imkonini bermaydi.

Ushbu maqolada turli tarkibli (Sb, Se ga boy va stexiometrik tarkibli) Sb_xSe_y yupqa qatlamlaridagi xususiy nuqtaviy nuqsonlarning tabiati va holati tadqiq qilingan.

Mustaqil manbali bug' transport usuli bilan Sb_2Se_3 yupqa qatlamlarini turli manba temperaturalarida olish jarayoni quyidagicha olib borilgan. Taglik uchun $2,5 \times 2,5$ sm o'lchamdagi sodali ohak shishasi (SLG) tayyorlanadi va ularni sirt yuzasini uskus kislotasi, so'ng etil spirti bilan ultratovush vannasida 10 daqiqa tozalanib, azot gazi oqimida quritildi. Magnitron changlatish usuli bilan yuqori vakuum holatida taglikning turli haroratlarida shisha tagliklar sirtiga qalinligi $1 \mu m$ Mo yupqa qatlamlari o'tqazildi. Tayyor bo'lgan shisha/Mo struktura ustiga alohida manbali bug' transport usuli orqali Sb_xSe_y yupqa qatlamlari o'stirildi. O'stirish jarayonida 2×2 sm o'lchamdagi shisha va shisha/Mo tagliklari dastavval taglik tutqishlariga joylashtirildi va $1,3 Pa$ (10^{-2} mm.sim.ust.) ga teng vakuum hosil qilinib, so'ng kameraga argon (Ar) gazi kiritilib, $7 Pa$ ga teng kamera ishchi bosimi hosil qilindi. Tashqi pech yordamida ishchi hajm (kvars kamera) qizdirilib, taglik harorati $400^\circ C$ ga yetganida, manba harorati $500-525-550^\circ C$ bo'lgan holda yupqa qatlamlar o'stirildi va bug'lanish jarayoni 10 daqiqa davom etdi.

Jadval 1. Turli manba haroratlarida o'stirilgan Sb_xSe_y yupqa qatlamlarning texnologik kattaliklari va tarkibiy (EDS) natijalari

	Taglik harorati ($^\circ C$)	Manba harorati ($^\circ C$)	Bug'langan manba massasi (mg)	Qalinligi (μm)	Tarkibi		
					Sb (%)	Se (%)	Sb/Se
54	400	500	143,6	1,732	33,7	6,3	0,5083
55		525	224,2	3,276	40,1	9,9	0,6694
53		550	363,6	6,291	45,2	4,8	0,8248

Bug'lanish manbasining turli haroratlarida olingan namunalarning tarkibi energiya dispersion spektroskopiya (EDS – AzTec Advanced. Oxford Instrumtents), elektr xossalari SM2460 SourceMeter (Keithley, AQSh) qurilmalarida tadqiq qilingan.

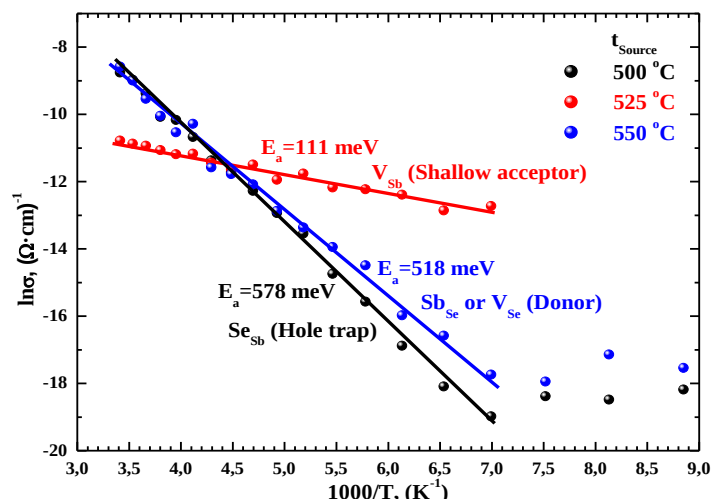
Energiya dispersion spektroskopiya natijalari tahliliga ko'ra, manbaa haroratining o'zgarishi bilan olingan yupqa qatlam tarkibidagi Se miqdorining o'zgarib borishi aniqlandi (1-jadval).

Namunalardagi nuqtaviy nuqsonlar haqida chuqurroq ma'lumot olish uchun kreostat yordamida Van der Pau usuli bilan $77-300 K$ harorat oralig'ida elektr o'tkazuvchanlikning haroratga bog'liqligi o'lchandi. Tajriba natijalari yarimo'tkazgichlar uchun xos bo'lgan Arrenius tipidagi eksponensial bog'lanish orqali ifodalandi: [1]:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (1)$$

bu yerda σ – qorong'ulikdagi solishtirma o'tkazuvchanlik, σ_0 – eksponensialgacha bo'lgan koefitsient, E_a – o'tkazuvchanlik uchun faollashuv energiyasi, k – Boltsman doimiysi va T – absolyut haroratdir.

1-rasmda manba haroratining turli qiymatlarida olingan namnalar uchun Arrenius grafigi keltirilgan. Ushbu grafik asosida har bir namuna uchun faollashuv energiyalari aniqlandi. Hisoblash natijalariga ko'ra, manbaa harorati mos ravishda 500 °C, 525 °C va 550 °C bo'lgan namnalar uchun (E_a) qiymatlari 578 meV, 111 meV va 518 meV ga teng ekani aniqlandi. Olingan natijalar Sb_2Se_3 asosidagi yupqa qatlamlar uchun adabiyotlarda keltirilgan qiymatlar bilan yaxshi mos keladi [38–40]. Se ga boy M54 namunada aniqlangan ($E_a = E_v + 0.578$) eV faollashuv energiyasi kristall panjara tugunlarida Sb atomlari o'rniga Se atomlari joylashib qolishi bilan bog'liq nuqson (Se_{Sb}) holatiga mos keladi. Ushbu turdagi antisayt nuqsonlar "hole-trap" sathlarini hosil qilib, kovaklar uchun tutuvchi markaz sifatida namoyon bo'ladi [2,3].



1 – rasm. Namunalarning solishtirma elektr o'tkazuvchanligini haroratga bogliqligi yordamida Arrenius grafigi orqali faollashuv energiyasini aniqlash grafigi

Sb ga boy M53 namunada esa ($E_a = E_c - 0.518$) eV faollashuv energiyasi aniqlanib, bu holat kristall panjarada Se atomlari o'rniga Sb atomlarining joylashishi (Sb_{Se}) yoki Se vakansiyalarining (V_{Se}) hosil bo'lishi bilan izohlanadi. Mazkur nuqsonlar donor tipidagi sathlarni shakllantirib, elektronlar konsentratsiyasining ortishiga olib keladi. Natijada namuna n-tipli elektr o'tkazuvchanlikka ega bo'ladi [4,5].

Stexiometrik tarkibli M55 namunada esa nisbatan kichik ($E_a = E_v + 0.111$) eV qiymatga ega bo'lgan faollashuv energiyasi kuzatildi. Bu Sb vakansiyalari (V_{Sb}) bilan bog'liq sayoz akseptor sathlarining mavjudligidan dalolat beradi. Bunday nuqsonlar kovaklar konsentratsiyasini oshirib, p-tipli elektr o'tkazuvchanlikning kuchayishiga xizmat qiladi va elektr xossalar nuqtai nazaridan foydali nuqsonlar sifatida qaraladi [6,7].

Umumiy holda, faollashuv energiyalarining qiymati Se va Sb ga boy namnalar uchun chuqur sathli nuqsonlarning ustunligini, stexiometrik tarkibli namunada esa asosan sayoz akseptor holatlar mavjudligini ko'rsatadi. [43].

2-jadval. Sb_xSe_y yupqa qatlamining turli qalinlikdagi nuqson xususiyatlari.

No:	Sb/Se	E_a (eV)	σ ($\Omega \times m$) ⁻¹	Tipi	Nuqson tipi [9]	Nuqson turi [9]
M54	0,5083	$E_v + 0,578$	$6,57 \times 10^{-5}$	p	Hole trap	Se_{Sb}
M55	0,6694	$E_v + 0,111$	$1,14 \times 10^{-5}$	~p	Shallow acceptor	V_{Sb}
M53	0,8248	$E_c - 0,518$	$1,89 \times 10^{-4}$	n	Donor	Sb_{Se} or V_{Se}

Xulosa

Energiya dispersion analiz (EDS) natijalarga ko'ra alohida manbali bug' transport usuli yordamida Sb₂Se₃ binar birikmasi uchirib olingan yupqa qatlamlar tarkibi manba harorati ortishi bilan Se ga boy tarkibdan Sb ga boy tarkibga tomon o'zgarib borishi aniqlandi. O'tkazuvchanligi $1,14 \times 10^{-5} (\Omega \times m)^{-1}$ dan $1,89 \times 10^{-4} (\Omega \times m)^{-1}$ oraliqda o'zgarishi kuzatildi. Solishtirma elektr o'tkazuvchanligi orqali aniqlangan faollashuv energiyalari Sb ga boy va Se ga boy namunalarda chuqur sathli nuqsonlar hosil bo'lishini, stexiometrik trakibli namunada sayoz akseptor sathli nuqsonlar mavjudligini ko'rsatdi. Bu esa stexiometrik tarkibli namunada kovaklar konsentratsiyasi oshib, p-tipi elektr o'tkazuvchanlik kuchayishiga olib keldi.

Adabiyotlar:

1. D. L. Gavinand C.T. Moynihan. Functional Form of the Arrhenius Equation;
2. C. Chen, L. Wang, Y. Li, Defect physics and carrier transport in Sb₂Se₃ absorber layers, *J. Appl. Phys.* 125 (2019) 045703;
3. C. Yuan, S. Chen, X. Yang, Native defects and conductivity type control in Sb₂Se₃ thin films, *Appl. Phys. Lett.* 110 (2017) 093903;
4. For Electrical Conductivity of Glass. Communications of the American Ceramic Society, August 1982. 129-130 pp;
5. N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, *Solid State Physics*, Brooks/Cole, New York, 1976;
6. B. G. Streetman, S. Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, 7th ed., Pearson Education, Boston, 2015;
7. Y. Zhang, H. Li, J. Chen, Electrical properties of Sb₂Se₃ thin films prepared by thermal evaporation, *Thin Solid Films* 660 (2018) 109–115;
8. Z. Li, Y. Zhou, J. Luo, Temperature-dependent electrical conductivity of Sb–Se chalcogenide thin films, *Mater. Res. Bull.* 122 (2020) 110648.
9. Udari Wijesinghe, Giulia Longo and Oliver S. Hutter. Defect engineering in antimony selenide thin film solar cells. *Energy Adv.*, 2023, 2, 12.

BIOMASSANI OLDINDAN ISHLOV BERISH TEXNOLOGIYALARI ORQALI QISHLOQ XO'JALIGI CHIQINDILARIDAN BIOGAZ ISHLAB CHIQARISH SAMARADORLIGINI OSHIRISH

K.R. Yakubov, O.O. Qurbanov, R.Sh. Rahimboyev

Abu Rayxon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti Fizika-matematika fakulteti
220100 Urganch sh.

e-mail: ollashukurqurbanov@gmail.com

Ushbu tezisda O'zbekiston sharoitida qishloq xo'jaligi chiqindilaridan biogaz ishlab chiqarish samaradorligini oshirishda oldindan tozalash texnologiyalarining roli tahlil qilingan. Fizik (ultrasonik, termal), kimyoviy, biologik va kombinatsiyalangan usullarning qiyosiy tahlili keltirilgan. Tadqiqotlar kombinatsiyalangan usullar metan ishlab chiqarishni 94% gacha, termal usullar esa ayrim xomashyolarda 136.6% gacha oshirishi mumkinligini ko'rsatgan [0,0]. O'zbekistonda qishloq xo'jaligi chiqindilarining katta resurs salohiyati mavjud bo'lib, so'nggi yillarda bu sohada muhim loyihalar amalga oshirilmoqda [0,0]. Tezis yakunida tahlil qilingan

adabiyotlar natijasida mahalliy sharoitga mos oldindan ishlov berish texnologiyalarini tanlash bo'yicha tavsiyalar berilgan. Global energetika tizimida qayta tiklanuvchi energiya manbalarining ulushi ortib bormoqda. Xalqaro Energetika Agentligi (IEA) ma'lumotlariga ko'ra, global biogaz ishlab chiqarish 2025-2030 yillarda 22% ga o'sishi kutilmoqda [0]. Biogaz ishlab chiqarishning asosiy xomashyosi bo'lgan qishloq xo'jaligi chiqindilari tarkibidagi lignotsellyuloza ularning parchalanishini qiyinlashtiradi va maxsus oldindan ishlov berish jarayonlarini talab qiladi [0,0].

O'zbekiston qishloq xo'jaligi rivojlangan davlat sifatida katta miqdordagi organik chiqindilar resursiga ega. Qishloq xo'jaligi chiqindilari tarkibiga chorva go'ngi, bug'doy va sholi somoni, paxta poyasi kiradi. Bir bosh qoramol go'ngidan kunlik 1.5-3.0 m³ biogaz olish mumkin [0]. 2025-yilda O'zbekiston Ekologiya vazirligi va Yaponiyaning Le One Co. kompaniyasi o'rtasida organik chiqindilarni biogaz va metanga aylantiruvchi pilot qurilma tashkil etish bo'yicha kelishuv imzolangan bo'lib bu orqali O'zbekistonning yuqori biogaz potensialini amalga oshirish mumkin bo'ladi [0,0].

Anaerob parchalanish jarayoni to'rt bosqichdan iborat bo'lib, bular gidroliz, asidogenez, asetogenez va metanogenez. Bu bosqichlardan gidroliz eng muhim va ko'p hollarda cheklovchi bosqich hisoblanadi. Buning sababi shundaki, qishloq xo'jaligi chiqindilari tarkibidagi murakkab organik polimerlar (tsellyuloza, gemitsellyuloza, lignin, oqsillar va yog'lar) mikroorganizmlar uchun bevosita hazm bo'lmaydi. Gidroliz bosqichida anaerob bakteriyalar tomonidan ishlab chiqarilgan fermentlar ta'sirida bu murakkab birikmalar oddiy eruvchan moddalarga (qandlar, aminokislotalar, yog' kislotalari) parchalanadi [0,0]. Keyingi bosqichlar aynan shu oddiy moddalar ustida kechadi. Shu sababli, agar gidroliz sekin yoki sust kechsa, butun jarayon sekinlashadi va biogaz ishlab chiqarish samaradorligi pasayadi. Ayniqsa, lignotsellyuloza tarkibli chiqindilarda bu muammo keskin namoyon bo'ladi, chunki ularning tabiiy bardoshli tuzilishi fermentlar ta'sirini qiyinlashtiradi [0]. Shu sababli, biomassaga oldindan ishlov berish texnologiyalari orqali biogaz ishlab chiqarish samaradorlikni oshirishning asosiy omillaridan biridir. Ushbu tezisning asosiy maqsadi – O'zbekiston sharoitida qishloq xo'jaligi chiqindilaridan biogaz ishlab chiqarishda oldindan ishlov berish texnologiyalarining ta'sirini tahlil qilishdan iborat.

Biomassani oldindan tozalash usullari to'rt asosiy guruhga bo'linadi: fizik, kimyoviy, biologik va kombinatsiyalangan [0,0]. Fizik usullarga ultratovushli, ekstruziya, mexanik maydalash va termal ishlov berish kiradi. Kimyoviy usullar ishqoriy, kislotali va oksidlovchi reagentlar yordamida lignotsellyuloza strukturasini parchalashga asoslangan. Biologik usullar fermentlar va mikroorganizmlar yordamida biomassani hazm qilishni osonlashtiradi. Gibrid usullar esa bir necha texnologiyalarni uyg'unlashtirib, yuqori samaradorlikka erishish imkonini beradi [0,0]. 1-jadvalda asosiy usullarning qiyosiy tahlili keltirilgan.

1-jadval. Oldindan ishlov berish usullarining samaradorligi

Usul	Metan o'sishi %	Xom ashyo turi	Manbalar
Ultrasonik	15-70%	Turli xil biomassalar	[0,0]
Termal (55°C)	136.6% gacha	Makkajo'xori	[0]
Termal (80°C)	62% gacha	Javdar (qora bug'doy)	[0]
Kimyoviy-ultrasonik	67-94%	Turli xil biomassalar	[0]

Ekstruziya	21-143%	Turli xil biomassalar	[0]
Biologik	30-60%	Lignotsellyuloza	[0,0]

Ultrasonik ishlov berish akustik g'ovaklanish (Acoustic cavitation) hodisasiga asoslangan bo'lib, optimal sharoitlarda (1437.8 Vt, 43.7 daqiqa) metan ishlab chiqarishni 70-76% gacha oshiradi [0]. Biroq, ayrim hollarda energiya balansi past bo'lishi mumkin [0].

Termal ishlov berish samaradorligi xomashyo turiga bog'liq: makkajo'xori uchun 55°C (136.6% o'sish), javdar (qora bug'doy) uchun 80°C (62% o'sish) samarali [0]. Akustik g'ovaklanish ishlov berish javdarda 38.7% o'sish bergan, ammo makkajo'xorida samarasiz bo'lgan [0]. Kombinatsiyalangan usullar (kimyoviy-ultratovushli, mexanik-ultratovushli) sinergik samara berib, metan ishlab chiqarishni 67-94% gacha oshirgan [0]. Ekstruziya esa uzluksiz jarayon bo'lib, samaradorlik 21-143% oralig'ida [0].

O'zbekiston sharoitida chorva go'ngi, paxta poyasi va somon asosiy xomashyo hisoblanadi [4,11]. Tahlillar quyidagilarni tavsiya etadi:

- Chorva go'ngi uchun ultrasonik usul (energiya balansini hisobga olish kerak) [0,0];
- Paxta poyasi va somon uchun kombinatsiyalangan usullar [0,0,0];
- Kichik fermerlar uchun energiya tejamkor termal usullar [0].

Xulosa. Tezida olib borilgan tahlillar asosida quyidagi xulosalarga kelindi:

1. Oldindan tozalash usullari biogaz ishlab chiqarish samaradorligini sezilarli oshiradi: kombinatsiyalangan usullar 94% gacha, termal usullar 136.6% gacha, ultrasonik usullar 70% gacha [0,0,0].
2. Usul samaradorligi xomashyo turiga bog'liq – makkajo'xori uchun termal (55°C), javdar uchun 80°C, echki go'ngi uchun ultrasonik usul samarali [0,0].
3. Kombinatsiyalangan usullar sinergik samara berib, an'anaviy usullarning cheklovlarini bartaraf etadi [0].
4. O'zbekiston sharoitida chorva go'ngi uchun ultrasonik, paxta poyasi va somon uchun kombinatsiyalangan usullar tavsiya etiladi. Kichik fermerlar uchun energiya tejamkor termal usullar maqsadga muvofiq [0,0,0,0].
5. Kelgusida mahalliy xomashyo turlariga moslashtirilgan optimallashtirilgan rejimlarni ishlab chiqish, energiya balansi va iqtisodiy samaradorlikni baholash bo'yicha tadqiqotlar olib borish lozim [0].

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR:

1. Shah, V., et al. (2025). Unlocking biogas potential. *Energy*, 138244. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138244>.
2. Pap, B., & Maróti, G. (2025). Ultrasonic pretreatment for enhanced anaerobic digestion of dairy goat manure. *Fuel*, 399, 135650. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135650>.
3. Sharma, S., et al. (2025). Enhancing biogas production from lignocellulosic biomass. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, e70251. <https://doi.org/10.1002/ep.70251>.
4. Chevalier, A., et al. (2025). Extrusion as a pretreatment. *Bioresource Technology Reports*, 102063. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102063>.
5. Rajendran, N., et al. (2025). Modeling of biogas production via ultrasonic pretreatment. *International Journal of Hydrogen Energy*, 108, 458-472. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.210>.

6. Kun.uz (2025). Uzbekistan to launch pilot project for methane production. <https://kun.uz/en/news/2025/06/26/>.
7. Zhang, Y., et al. (2025). Different pretreatment of biomass for gasification. *Journal of the Energy Institute*, 101992. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.101992>.
8. Ikram, M.M., et al. (2025). Process intensification of anaerobic digestion. *RSC Advances*, 15, 28464-28480. <https://doi.org/10.1039/D5RA04093K>.
9. Okoro, O.V., et al. (2025). Combination of pretreatments enhances biomethane yields. *BioEnergy Research*, 18, 45. <https://doi.org/10.1007/s12155-025-10846-8>.
10. Rameshwar, S.S., et al. (2025). Advancing Green Gasification. *ACS Omega*, 10(41), 47761-47776. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c04385>.
11. Toreniyazova, V.S., & Jumanova, P. (2025). Agricultural waste and obtained from it energy. *Central Asian Journal of Academic Research*, 3(6 Part 2), 56–60. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15679424>.
12. IEA (2025). Renewables 2025. Paris: IEA Publications.
13. Angelidaki, I., et al. (2018). Biogas upgrading. *Biotechnology for Biofuels*, 11, 92. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1175-6>.
14. Carrère, H., et al. (2010). Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability. *Journal of Hazardous Materials*, 183, 1-15 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.06.129>.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ УДЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ УЗБЕКИСТАНА

В.Г. Дыскин^{1,2}, И.А. Юлдошев^{2*}, О.Ш. Жураев², Б.М. Ботиров²

¹НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз им. М. Улугбека,
Узбекистан, 100057, Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20

²Ташкентский государственный технический университет, Узбекистан, 100095,
Ташкент, ул. Университетская, 2

*e-mail: yuldashev.i2004@gmail.com

В мировом масштабе декарбонизация энергетики и стратегии борьбы с изменениями климата требуют форсированного развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечных фотоэлектрических систем [1,2]. За последние десятилетия установленная мощность фотоэлектрических станций (ФЭС) значительно возросла, превратив их в значимый элемент национальных энергосистем [2].

Выработка электроэнергии ФЭС нестабильна из-за прямой зависимости от погодных условий. В частности, генерация недавно введенных в эксплуатацию систем демонстрирует значительную вариативность [3, 4].

Эффективность фотоэлектрических систем определяется не только коэффициентом использования установленной мощности (КИУМ), но и фактическим объемом выработки в процессе эксплуатации. В связи с этим растет потребность в универсальных показателях для объективного сравнения ФЭС, работающих в различных климатических и технических условиях.

С этой точки зрения показатель удельной выработки (*Specific Yield*) является одним из наиболее важных и широко применяемых параметров для оценки эксплуатационной эффективности солнечных фотоэлектрических станций (ФЭС) [5]. Данный параметр позволяет объективно сравнивать фотоэлектрические системы, расположенные в различных регионах и имеющие разную установленную мощность или конфигурацию.

Удельная выработка — это количество электроэнергии, выработанное фотоэлектрической системой за определённый период времени (как правило, за год), в расчете на один киловатт установленной пиковой мощности станции [6]. Этот показатель отражает фактическую эксплуатационную эффективность фотоэлектрической системы:

$$SY = \frac{W_f}{P_p} \quad (1)$$

где:

W_f — количество электроэнергии, выработанной за выбранный период (кВт·ч);
 P_p — пиковая мощность фотоэлектрической системы при стандартных условиях (STC) тестирования, (кВт).

Сравнение ФЭС с различной установленной мощностью и годовой генерацией наиболее эффективно проводить через показатель удельной выработки. Анализ фактической производительности системы после ввода в эксплуатацию осложняется тем, что она зависит не только от проектных решений и качества монтажа, но и от динамических факторов: интенсивности солнечной радиации и температуры фотоэлектрических модулей.

В современной литературе удельная выработка рассматривается как ключевой параметр мониторинга ФЭС [7]. Международные исследования (ЕС, Ближний Восток, Азия) подтверждают, что этот показатель в значительной степени детерминирован локальными климатическими условиями [3–4, 9].

Обычно рассчитывается годовая удельная выработка, хотя в ряде случаев определяются и среднемесячные значения. Типичные показатели для систем в Великобритании составляют 750–800 кВт·ч/кВт; в экваториальных регионах с высоким уровнем инсоляции эти значения достигают 1500–2000 кВт·ч/кВт. Годовая выработка напрямую зависит от ресурсов солнечной радиации и варьируется от года к году в зависимости от погодных условий, даже при стабильной работе оборудования [10]. Коэффициент производительности (*Performance Ratio*, PR) соотносит реальную выработку с инсоляцией, приходящейся на фотоэлектрическую панель. Данный показатель отражает совокупное влияние температуры элементов, а также электрических потерь в инверторе и кабельных линиях:

$$PR = \frac{SY}{T_p} = \frac{W_p}{T_p \cdot P_p} \quad (2)$$

где:

T_p — количество пиковых солнечных часов в году в месте расположения ФЭС. Значение $T_{\text{пик}}$ рассчитывается по формуле:

$$T_p = \frac{H_{\text{SITE}}}{G_{\text{STC}}} \quad (3)$$

где H_{SITE} — солнечная инсоляция в месте расположения ФЭС за год, $W \times h/m^2$; G_{STC} — солнечная радиация при условии STC , $1000 W/m^2$ [11-14].;

Нами проведены мониторинг и расчетно-экспериментальные исследования энергетических параметров ФЭС, подключенных к низковольтной распределительной сети в различных регионах Узбекистана (табл. 1). На рис. 1 приведены значения годовой удельной выработки маломощных ФЭС, эксплуатирувавшийся в регионах республики в 2025 г. Анализ представленных данных показывает, что валовой потенциал солнечной энергии в Республике Узбекистан характеризуется значительными территориальными различиями.

Табл. 1. Сравнительный анализ потенциала солнечной генерации в регионах Узбекистана

Регионы	S_y кВт·ч/кВт	КИУМ, %	PR	$T_{\text{пик}}$, час [15]
Андижан	1350,19	15,4	0,75	2650
Бухара	1549,35	17,7	0,86	2930
Фергана	1323,14	15,1	0,74	2650
Джиззах	1479,17	16,8	0,82	2930
Хорезм	1331,37	15,2	0,74	2900
Наманган	1501,24	17,1	0,83	2650
Навоий	1402,79	15,8	0,78	2930
Кашкадарья	1577,45	18,0	0,88	2950
Самарканд	1334,9	15,2	0,74	2930
Сырдарья	1303,35	14,8	0,72	1700
Сурхандарья	1455,09	16,6	0,81	2950
Каракалпакстан	1434,02	16,4	0,8	2900
Ташкент	1434,01	18,0	0,50	2852

Нами проведены мониторинг и расчетно-экспериментальные исследования энергетических параметров ФЭС, подключенных к низковольтной распределительной сети в различных регионах Узбекистана (табл. 1). На рис. 1 приведены значения годовой удельной выработки маломощных ФЭС, эксплуатирувавшийся в регионах республики в 2025 г.

Анализ представленных данных показывает, что валовой потенциал солнечной энергии в Республике Узбекистан характеризуется значительными территориальными различиями.

Наибольшие значения удельной выработки электроэнергии и коэффициента использования установленной мощности зафиксированы в Кашкадарьинской (S_y — 1577,45 кВт·ч/кВт, КИУМ — 18,0%), Бухарской (S_y — 1549,35 кВт·ч/кВт, КИУМ — 17,7%) и Наманганской областях (S_y — 1501,24 кВт·ч/кВт, КИУМ — 17,1%), что свидетельствует о высокой эффективности эксплуатации ФЭС в данных регионах. Коэффициент

производительности в большинстве регионов находится в диапазоне 0,72–0,88, что указывает на удовлетворительное техническое состояние и эксплуатационную надежность установок. Наивысшее значение PR наблюдается в Кашкадарьинской области (0,88), тогда как относительно низкий показатель выявлен в городе Ташкенте (0,50). Это обусловлено совокупностью факторов, характерных для плотной городской застройки: повышенным уровнем запылённости, эффектом частичного затенения модулей соседними зданиями и сооружениями, а также интенсивным тепловым перегревом фотоэлектрических панелей в условиях ограниченной естественной вентиляции, что приводит к значительным температурным потерям мощности. Количество пиковых солнечных часов варьируется от 1700 в Сырдарьинской области до 2950 в Кашкадарьинской и Сурхандарьинской областях, что напрямую влияет на объёмы годовой выработки. В целом регионы с более высокими значениями пиковых солнечных часов демонстрируют и более высокие показатели удельной выработки на объектах ВИЭ.

Таким образом, результаты анализа подтверждают высокий потенциал развития солнечной энергетики в южных и центральных регионах Узбекистана. Обоснована целесообразность приоритетного размещения новых ФЭС в зонах с максимальной солнечной инсоляцией, высокими значениями КИУМ и коэффициента производительности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Skoplaki E., Palyvos J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations // *Renewable Energy*. 2009. Vol. 34, No. 1. P. 23–29. DOI: 10.1016/j.renene.2008.04.009.
2. International Energy Agency (IEA). Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028. Paris: IEA, 2023.
3. Yuldoshev I., Shoguchkarov S., Jamolov T., Rustamova Sh. Features of operation of the grid connected photovoltaic power station with a capacity of 10 kW // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 216. P. 1-8. DOI: 10.1051/e3conf/202021601172.
4. Yuldoshev I., Kurbanov Y., Rustamova Sh., et al. Modeling the operation of a 10 kW grid-tied photovoltaic power plant and its features // *AIP Conference Proceedings*. 2022. Vol. 2552. P. 1-7. DOI: 10.1063/5.0113931.
5. IEC 61724-1:2017. Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017.
6. Mellit A., Kalogirou S. A., Shaari S., et al. Methodology for predicting specific yield of photovoltaic systems // *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 165. P. 191–202.
7. Kumar N. M., Subramaniam U., Mathew M., Blaabjerg F. Solar PV system performance assessment: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 134. Art. 110298.
8. Huld T., Müller R., Gambardella A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa // *Solar Energy*. 2012. Vol. 86, No. 6. P. 1803–1815.
9. Sengupta M., Xie Y., Lopez A., et al. The National Solar Radiation Database (NSRDB) // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 89. P. 51–60.
10. Jenkins N., Ekanayake J. Renewable Energy Engineering. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2024. 509 p.
11. Masters G. Renewable and Efficient Electric Power Systems. 2nd ed. Wiley, 2013.
12. Peake S. (ed.). Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. 4th ed. Oxford University Press, 2017. (Исправлено: *Power Jar* → *Power for*).

13. Twidell J. Renewable Energy Resources. 4th ed. Routledge, 2021.
14. Wenham S. R., Green M. A., Watt M. E., et al. *Applied Photovoltaics*. 3rd ed. Earthscan, 2011.
15. Avezov R. R., Avezova N. R., et al. History and state of solar engineering in Uzbekistan // *Applied Solar Energy*. 2012. Vol. 48. P. 14–19.

MIKRO GES TURBINA AKTIV ISHCHI G'ILDIRAGINING OPTIMAL GEOMETRIK PARAMETRLARINI ANIQLASH

O.O. Bozarov¹, J.N. Usmonov², N.A. Kozimjonov²

¹*Qo'qon universiteti Andijon filiali*

²*Andijon davlat universiteti*

Mikro gidroelektr stansiyalar kichik suv oqimlarining energiyasidan foydalanish imkonini berib, ekologik toza energiya ishlab chiqarish imkonini yaratadi. Shu sababli mikro GES turbinalarining optimal geometrik parametrlarini aniqlash ilmiy va amaliy jihatdan dolzarb masala hisoblanadi. Mazkur tadqiqot ishining maqsadi mikro GES turbinasining aktiv ishchi g'ildiragi uchun optimal geometrik parametrlarni aniqlash hamda ularning energiya samaradorligiga ta'sirini o'rganishdan iborat.

Tadqiqot jarayonida gidrodinamika va suyuqlik mexanikasi qonuniyatlariga asoslangan nazariy tahlil usullaridan foydalanildi. Turbina ishchi g'ildiragining geometrik parametrlarini aniqlashda suv oqimining tezligi, bosimi va sarfi asosiy parametr sifatida qabul qilindi [1-2]. Aktiv ishchi g'ildirak diametri quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$D = \frac{60 V}{\pi n}$$

bu yerda: D – ishchi g'ildirak diametri, V – suv oqimining tezligi, n – turbina aylanish tezligi.

Turbina samaradorligi esa quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$\eta = \frac{P}{\rho g Q H}$$

bu yerda: η – turbina samaradorligi, P – ishlab chiqarilgan quvvat, ρ – suv zichligi, g – erkin tushish tezlanishi, Q – suv sarfi, H – suv bosimi.

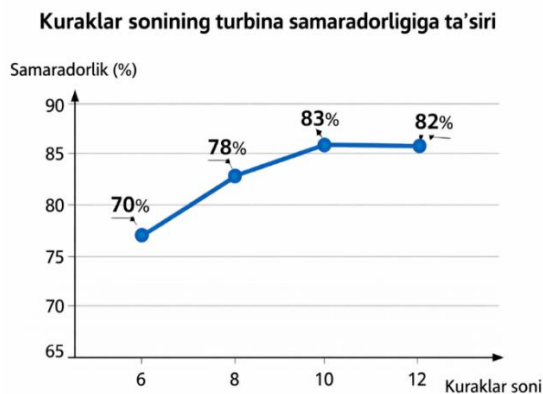
Tadqiqotda turli geometrik parametrlar uchun hisoblash ishlari olib borilib, ularning turbina samaradorligiga ta'siri tahlil qilindi. Mikro GES turbinasining ishchi g'ildiragi geometrik parametrlarining optimal qiymatlari hisoblash natijalari shuni ko'rsatdiki, ishchi g'ildirakning geometrik parametrlarini optimallashtirish turbina samaradorligiga sezilarli darajada ta'sir qiladi. 1-jadval.

1-jadval

Parametr	Belgilanishi	Optimal qiymat
Ishchi g'ildirak diametri	D	0.8–1.0 m
Kuraklar soni	Z	8–10
Kirish burchagi	β_1	20–30°
Chiqish burchagi	β_2	15–20°

Parametr	Belgilanishi	Optimal qiymat
Ishchi g'ildirak kengligi	B	0.15–0.35 m

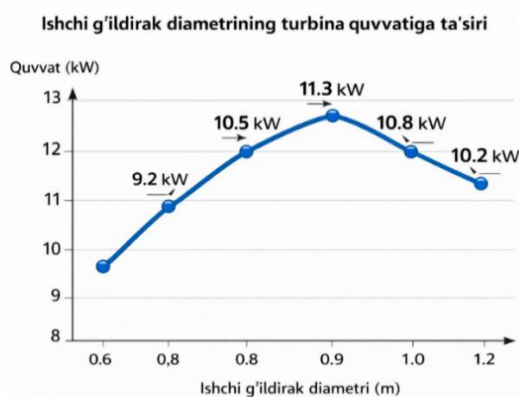
Kuraklar soni oshgani sari suv oqimi bilan energiya almashinuvi yaxshilanadi 1-rasm. Ammo kuraklar sonining ortib ketishi gidravlik qarshilikni oshiradi [5]; 1-grafik.



1-grafik. Kuraklar sonining turbina samaradorligiga ta'siri

6 ta kurak → 70 %, 8 ta kurak → 78 %, 10 ta kurak → 83 %, 12 ta kurak → 82 %

Natijalar shuni ko'rsatadiki, optimal natija 10 ta kurak mavjud bo'lganda kuzatiladi 2-grafik.



2-grafik. Ishchi g'ildirak diametrining turbina quvvatiga ta'siri

0.6 m → 9.5 kW; 0.8 m → 11.0 kW; 0.9 m → 12.5 kW; 1.0 m → 11.8 kW; 1.2 m → 10.3 kW.

Tahlil shuni ko'rsatdiki, 0.9 m diametr eng optimal qiymat hisoblanadi.



1-rasm. Mikro GES turbinasining ishchi g'ildiragi konstruktiv sxemasi

Rasmda turbina ishchi g'ildiragining asosiy elementlari ko'rsatilgan:

Markaziy val, ishchi g'ildirak diski, kuraklar, suv oqimi yo'nalishi.

Bu rasm suv oqimi energiyasining turbina aylanish momentiga aylanish jarayonini ko'rsatadi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatadiki, mikro GES turbinasining ishchi g'ildiragi parametrlarini optimallashtirish qurilmaning umumiy samaradorligini oshiradi. Ayniqsa kuraklar soni va ularning burchaklari suv oqimining energiyasini maksimal darajada o'zlashtirishga imkon beradi.

Natijalar boshqa ilmiy tadqiqotlar bilan ham mos keladi. Ko'plab tadqiqotchilar mikro GES turbinalari uchun 8–10 ta kurak optimal hisoblanishini ta'kidlaydi [3-4].

Xulosa

Mazkur tadqiqotda mikro GES turbinasining ishchi g'ildiragi uchun optimal geometrik parametrlar aniqlandi. Tadqiqot natijalariga ko'ra:

ishchi g'ildirak diametri – 0.8–1.0 m

kuraklar soni – 8–10 ta

kirish burchagi – 20–30°

chiqish burchagi – 15–20°

Mazkur parametrlar tanlanganda turbina samaradorligi oshadi va energiya yo'qotishlari kamayadi. Olingan natijalar mikro gidroenergetika qurilmalarini loyihalashda amaliy ahamiyatga ega.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. White F.M. Fluid Mechanics. – McGraw Hill, 2016.
2. Çengel Y.A. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. – McGraw Hill, 2018.
3. Nag P.K. Power Plant Engineering. – McGraw Hill, 2017.
4. Bhattacharya S. Small Hydro Power Systems. – CRC Press, 2018.
5. O. O. Bozarov, N. A. Kozimjonov. Analytical relationships between geometric and energy parameters of the water wheel. Technical science and innovation, Tashkent State Technical University. 2023, №2, p. 99-107.

ЗАЩИТНЫЙ КОРПУС ВРАЩАТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА

С.А. Даминов*, О.Ф. Тукфатуллин, Д.С. Пулатова, Э.Д. Мухамедиев

НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУз им. М. Улугбека

100057, г. Ташкент, Узбекистан

*e-mail: daminovsa@gmail.com

Системы слежения за Солнцем (солнечные трекары) позволяют повысить эффективность фотоэлектрических установок за счёт оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей относительно падающего солнечного излучения [1]. Применение таких систем обеспечивает увеличение выработки электрической энергии по сравнению со стационарным расположением модулей.

Эксплуатация солнечных трекаров в климатических условиях Узбекистана сопровождается воздействием ряда неблагоприятных факторов, включая высокую

запылённость атмосферы, атмосферные осадки и значительные суточные перепады температуры. Эти факторы приводят к загрязнению и коррозии элементов вращательных механизмов трекеров, что может существенно снизить их надёжность и срок службы.

Во всех конструкциях солнечных трекеров защита вращательных узлов, не предусмотрена. В результате подшипники и элементы передачи движения подвергаются воздействию влаги, пыли и продуктов коррозии. В связи с этим разработка защитных конструктивных элементов, обеспечивающих защиту вращательного механизма от внешних воздействий, является актуальной инженерной задачей.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка конструкции защитного корпуса вращательного механизма [2, 3] солнечного трекера, предназначенного для повышения эксплуатационной надёжности системы в условиях неблагоприятных климатических воздействий. Особое внимание уделено разработке геометрии корпуса, обеспечивающей эффективный отвод атмосферной влаги и защиту механизма от загрязнений.

Моделирование конструкции защитного корпуса выполнялось в системе автоматизированного проектирования Autodesk Fusion 360. При проектировании учитывались размеры опорного профиля конструкции трекера, расположение подшипников вращательного механизма и условия отвода атмосферной влаги.

На первом этапе был разработан пробный вариант защитного корпуса (рис. 1),



Рис. 1. Пробный вариант верхней части защитного корпуса вращательного механизма: 3D-модель (слева) и изготовленный образец (справа)

представляющий собой верхнюю часть с двумя выемками для установки на опорный профиль вращательного механизма. Геометрия корпуса была выбрана таким образом, чтобы обеспечить минимальный зазор между корпусом и элементами механизма.

Анализ конструкции показал необходимость улучшения условий отвода воды из зоны контакта корпуса с опорным профилем. Поэтому на втором этапе конструкция корпуса была усовершенствована путём добавления отверстий для крепёжных винтов и специальных водоотводящих элементов вдоль кромок выемок (рис. 2). Предложенная геометрия позволяет направлять поток дождевой и талой воды за пределы корпуса и предотвращает её накопление внутри конструкции.

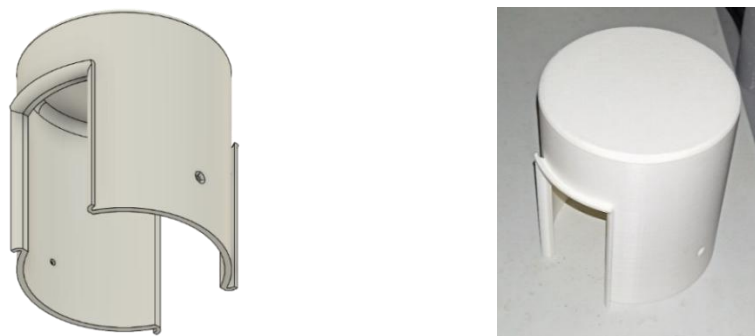


Рис. 2. Усовершенствованный вариант верхней части защитного корпуса с элементами отвода воды: 3D-модель (слева) и изготовленный образец (справа)

На третьем этапе была разработана вспомогательная нижняя часть корпуса, обеспечивающая дополнительную фиксацию конструкции и защиту вращательного механизма с нижней стороны. Вспомогательный элемент содержит выступы, соответствующие форме выемок верхней части корпуса, что обеспечивает плотное соединение элементов конструкции (рис. 3). В результате защитный корпус представляет собой двухкомпонентную систему, состоящую из верхней и нижней частей.



Рис. 3. Нижняя часть корпуса (слева) и общий вид собранной конструкции (справа)

Изготовление опытных образцов защитного корпуса осуществлялось методом аддитивного производства (3D-печати) с использованием 3D-принтера Creality K2 Pro и филамента из ударопрочного ABS-пластика. Применение аддитивных технологий позволило оперативно изготовить несколько вариантов конструкции и провести их экспериментальную проверку.

Для оценки работоспособности разработанного корпуса были проведены натурные испытания на экспериментальном солнечном трекере, установленном на крыше здания НИИ физики полупроводников и микроэлектроники. Испытания проводились в зимний период с 12 января по 28 февраля 2026 года.

В процессе испытаний корпус подвергался воздействию атмосферных осадков, включая снегопады, а также многократным циклам обледенения и последующего оттаивания. Суточные температурные колебания в этот период составляли от положительных значений днём до отрицательных температур в ночное время.

Результаты наблюдений показали, что разработанная конструкция корпуса обеспечивает эффективный отвод дождевой и талой воды и предотвращает её попадание в область вращательного механизма. После завершения испытаний корпус полностью

сохранил свою геометрическую форму, а материал корпуса не продемонстрировал признаков разрушения или потери механической прочности.

Таким образом, проведённые испытания подтвердили работоспособность и устойчивость разработанной конструкции защитного корпуса к воздействию неблагоприятных климатических факторов.

Выводы

- Разработана конструкция защитного корпуса вращательного механизма солнечного трекера, предназначенная для эксплуатации в условиях повышенной запылённости и атмосферных воздействий.
- Показано, что применение аддитивных технологий позволяет оперативно разрабатывать и изготавливать конструктивные элементы солнечных энергетических установок.
- Натурные зимние испытания подтвердили эффективность предложенной конструкции защитного корпуса и её устойчивость к воздействию климатических факторов.

Литература:

1. Рязкин Г.Н. и др. Солнечный трекер с системой самораскрытия // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика», 2021, Т. 21, № 1, С. 82–89.
2. Запорожец В.П., Малая Н.В. Универсальный защитный кожух вращающегося узла агрегата. Патент РФ № RU 175 382 U1, 2017.
3. Шагаев Г.Х. и др. Устройство защиты вращающихся узлов машин от внешних загрязнений. Патент РФ № RU 2 137 952 C1, 1999.

BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL FROM ORGANIC WASTE IN THE ARAL SEA REGION: THE CASE OF KHOREZM REGION AND THE REPUBLIC OF KARAKALPAKSTAN.

K. Yakubov, R. Rakhimbaev, R. Bazarbayev, D. Kurbanov, O. Kurbanov
*Urgench State University after name Al-Biruni, 220100, 14, Khamid Alimdzhan.st,
Urgench, Khorezm, Uzbekistan.*

The Khorezm region and the Republic of Karakalpakstan, located in the northwestern part of the Republic of Uzbekistan within the Aral Sea zone, represent a significant agricultural area. The primary economic activity in these regions is agriculture, encompassing crop cultivation and livestock farming. Consequently, these sectors generate substantial quantities of organic waste [0]. Biomass serves as a traditional energy source for biogas production and represents a promising avenue for Uzbekistan's agrarian sector. The country has the potential to generate 0.3 million tons of oil equivalent from biomass, which could meet 15–19% of Uzbekistan's energy needs [0]. Unfortunately, the management of this organic waste is currently inadequate. Organic waste from farms and livestock operations is processed using traditional methods, primarily through open-air (aerobic) composting. There is no well-established system for monitoring manure composition for

biogas production or for its distribution to fields. The gradual phase-out of energy subsidies in Uzbekistan, coupled with the high initial costs of alternative energy technologies, has led to livestock manure being used for heating and cooking rather than being returned to the soil as fertilizer [0]. In autumn, the burning of crop residues, and in rural areas, the widespread use of coal for heating, remain the most significant factors negatively impacting air quality. As a result, wind-blown salt dust particles, nitrogen oxide compounds, carbon monoxide, methane, and carbon dioxide are released directly into the atmosphere, seriously impacting environmental ecology [2,0].

Biogas technologies offer a solution to numerous pressing environmental problems, including soil salinization, preservation of the fertile topsoil layer, wind-induced soil erosion in the Aral Sea region, deforestation for firewood, and the uncontrolled release of large quantities of carbon dioxide and methane into the atmosphere.

Extensive global scientific research has been conducted on biogas production from cattle manure. Most experimental studies involve pre-experiment physicochemical measurements, including: cattle manure moisture content, dilution rate, total solids (TS) content, volatile solids (VS) content, daily substrate loading rate, daily biogas yield, and the percentage composition of gases in the biogas [0,0,0,0]. These parameters are critically important for the biogas production sector. However, existing research on biogas reactors in the Uzbek part of the Aral Sea region has primarily focused on economic aspects, design features, and production potential. For instance, Saidmamatov et al. highlighted the potential of biogas production from agricultural waste in the Aral Sea region, as well as the associated economic and social barriers [0]. Saipov et al. forecast the future development prospects of biogas technology in Uzbekistan [0]. Furthermore, Anarbayev et al. provide scientific insights into the positive environmental impact of biogas plants in Uzbekistan, specifically regarding the reduction of greenhouse gas emissions into the atmosphere [0].

Agricultural waste management and energy supply remain critical challenges in the Aral Sea region, while the efficiency of small-scale biogas technologies under local climatic conditions is still insufficiently studied. This research investigated biogas production from cattle manure using a small-scale biogas reactor equipped with a horizontal static mixing system (1 m³ working volume, 0.4 m³ reserve volume) in the Urganch district of the Khorezm region over one seasonal cycle.

Environmental and substrate temperature, daily dry matter loading, organic dry matter content, biogas yield, and gas composition (CH₄, CO₂, H₂S) were continuously monitored. In parallel, a biochemical methane potential (BMP) test was performed using the same substrate. Kinetic modeling using the Modified Gompertz (SGompertz) model was applied to predict biogas production.

The BMP test showed a theoretical methane potential of 208 mL/g VS for cattle manure. In the real reactor, the average summer biogas yield reached 176 L/kg VS (176 mL/g VS), with methane content of 54.32%, CO₂ of 33.16%, and H₂S concentration of 1710 ppm. In autumn, biogas yield decreased to 83 L/kg VS (83 mL/g VS), while methane content increased to 64.54%, CO₂ decreased to 20.9%, and H₂S averaged 1656 ppm. The bioconversion efficiency of the reactor was 56.7% in summer and 25.6% in autumn.

Results demonstrated that substrate temperature instability and simplified mixing significantly influenced biogas productivity. Higher temperature stability led to increased methane content. The Modified Gompertz model accurately predicted cumulative biogas production ($R^2 =$

0.986), while differences between BMP and reactor performance clearly reflected the impact of the Aral Sea region's natural climate.

Overall, the study provides a comparative assessment of seasonal performance and potential of controlled and uncontrolled small-scale biogas systems in the Aral Sea region.

REFERENCES:

1. Reimov.N., & Kadirbayeva.G. (2023). Orol bo'yi hududining qishloq xo'jaligi ixtisoslashuvdagi muammolari va ularga ta'sir qiluvchi omillar. Устойчивые направления управления земельными ресурсами в Узбекистане: проблемы и решения, 1(1), 216–224. извлечено от <https://inlibrary.uz/index.php/land-management/article/view/23856>.
2. Toderich K, Massino I, Shoaib I, Tsukatani T, Khujanazarov A, Rabbimov A, et al. Utilization of agriculture residues and livestock waste in Uzbekistan. KIER Discussion Paper No 651. Kyoto, Japan: Kyoto Institute of Economic Research; 2008. p. 16. [http://refhub.elsevier.com/S1364-0321\(24\)00094-7/sref109](http://refhub.elsevier.com/S1364-0321(24)00094-7/sref109).
3. Yakubov Komiljon, Bazarbayev Rustam, Qurbanov Davron, Sharipov Maksud, Masharipov Jamshid and Karazhanov Smagul. "The relationship between environmental factors and dust accumulation by machine learning" *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, vol. 238, no. 11, 2024, pp. 2023-2032. <https://doi.org/10.1515/zpch-2023-0479>.
4. Haryanto, A., Triyono, S., & Wicaksono, N. H. (2018). Effect of Hydraulic Retention Time on Biogas Production from Cow Dung in A Semi Continuous Anaerobic Reaktor. *International Journal of Renewable Energy Development*, 7(2), 93-100. <https://doi.org/10.14710/ijred.7.2.93-100>.
5. Bagaya, Noufou, Issaka Ouédraogo, Windé Nongué Daniel Koumbem, Younoussa Moussa Baldé, Gwladys Wendwaoga Sandwidi, Sette Diop, and Sié Kam. 2023. “Experimental Characterization of Influential Parameters of Cow Dung Substrates in Biogas Production”. *Current Journal of Applied Science and Technology* 42 (15):18-27. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i154123>.
6. Terashima M., Goel R., Komatsu K., Yasui H., Takahashi H., Li Y. Y., and Noike T., CFD simulation of mixing in anaerobic reaktors, *Bioresource Technology*.(2009) 100,no.7, 2228–2233. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.069>.
7. Makamure, F., Mukumba, P., & Makaka, G. (2024). Biogas Production from a Solar-Heated Temperature-Controlled Biogas Reaktor Sustainability, 16 (22) , 9894. <https://doi.org/10.3390/su16229894>.
8. Saidmamatov, O.; Rudenko, I.; Baier, U.; Khodjanizayov, E. Challenges and Solutions for Biogas Production from Agriculture Waste in the Aral Sea Basin. *Processes* 2021, 9, 199. <https://doi.org/10.3390/pr9020199>
9. Z.U. Saipov, G.A.Arifdzhanov. Current state and prospects for the development of biogas energy in Uzbekistan. *Ekonomika i upravlenie problemy resheniya* 2(7):171-184. January 2020. <https://doi.org/10.36871/ek.up.pr2020.07.02.021>.
10. A.Anarbaev, O.Tursunov, D.Kodirov, Sh.Muzafarov, A.Babayev, A.Sanbetova, L.Batirova and B. Mirzaev. Reduction of greenhouse gas emissions from renewable energy technologies in agricultural sectors of Uzbekistan. *E3S Web of Conferences* 135:01. December 2019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501035>.

QUVURLARDAGI ORTIQCHA EVAZIGA ISHLAYDIGAN ELLIPTIK MIKROGIDROTURBINANI MAQBULLASHTIRISH

S. Saydullayeva

Qo‘qon universiteti Andijon filiali

Ma'lumki, an'anaviy elektr energiyasi ishlab chiqarish jarayonida yer osti yoqilg'i zaxiralarini keskin kamayishi bilan birga zaxarli gazlarni yer atmosferasida qolishi tufayli juda katta ekologik muammolarni keltirib chiqarmoqda. Ushbu global muammolarni bartaraf etish yollaridan biri sifatida energiya ishlab chiqarishda ekologik toza hisoblangan qayta tiklanadigan energiya manbalaridan foydalanishga to'la o'tish konsepsiyasi butun jahon miqyosida ustivor yo'nalish qilib belgilandi.

Shu sababli, qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan samarali foydalanish, xususan suv ta'minot tizimida quvurlarda isrof bo'layotgan ortiqcha bosimdan energiya resursi sifatida foydalanib elektr energiya ishlab chiqarish dolzarb ilmiy-amaliy vazifalardan biri sanaladi [1,2].

Odatda, iste'molchilar suv ta'minoti tizimidagi mavjud tarmoqlarda ortiqcha suv bosimini barqarorlashtirish talab etiladi. Bunday hollarda esa yuqori bosimli quvur tizimlarida bosimni me'yorlashtirish uchun PRV (**Pressure Reducing Valve**) qurilmalari keng qo'llaniladi. Biroq bu jarayonda oqim energiyasining sezilarli qismi issiqlik va gidravlik yo'qotishlarga aylanadi [3]. Shu nuqtai nazardan, ortiqcha bosim energiyasini qayta tiklash ilmiy va amaliy ahamiyatga ega muammo hisoblanadi. Bu jarayonda yo'qotiladigan bosim energiyasidan foydalanish mumkinligi ta'kidlanib, bu borada turli tadqiqotlar olib borilmoqda[4].

Ushbu ishda taklif etilgan quvur ichiga o'rnatiladigan elliptik lopastli mikrogidroturbina modeli aynan shu maqsadda ishlab chiqildi[5,6]. Elliptik shakl oqim sohaslarini kuraklarga ta'sir etmay ajralishini kamaytirish va kurak orqa sohasida hosil bo'ladigan uyurmalarini minimal darajaga yetkazish orqali aylantiruvchi momentni oshirib, barqaror ishlashini ta'minlashga xizmat qiladi.

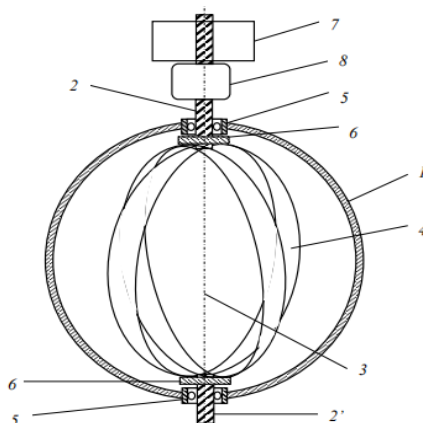
Qaralayotgan elliptik mikrogidroturbina konstruktsiyasi vertikal valga biriktirilgan 4ta aerodinamik elliptik lopastlardan iborat bo'lib, rotor val bilan birga aylanishda lopast ishchi zonasi elliptik shaklga ega bo'ladi. CFD (**Computational Fluid Dynamics**) modellashtirishda quvur ichidagi oqim laminar deb qabul qilinib, Navye–Stoks tenglamalari yordamida suv oqimi tezligi va bosim taqsimoti hisoblandi:

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left(-\frac{dP}{dz} \right) (R^2 - r^2)$$

Bu formula asosida lopastlarning markazdan optimal radial masofasi: $r_{opt} \approx \frac{R}{2} r$ deb topildi.

CFD hisoblashlarda Turbulent Flow k- ω SST modeli ishlatilgan bo'lib, bu model devor yaqinidagi oqimlarni aniq aks ettiradi va oqim tezligi yuqori bo'lgan joylarda k- ϵ modeli bilan birlashtiriladi.

1-rasmda elliptik gidroturbina rotor markaziy gorizontaldagi tezlik maydoni ko'rsatilgan. CFD natijalari shuni ko'rsatdiki: quvur markazida maksimal tezlik 1,96 m/s, kirish qismida o'rtacha tezlik 1,20 m/s. Lopast qavariq qismida mahalliy tezlik 2,32 m/s gacha oshdi, rotor ortida esa 0,18–0,32 m/s oralig'ida sekinlashish kuzatildi.



**1-rasm. 1 — Korpus; 2 — Ishchi g'ildirak (rotor); 2' — Rotor segmenti; 3 — Val;
4 — Yo'naltiruvchi lopastlar; 5 — Rotor pervanelari; 6 — Podshipnik uzellari; 7 —
Kirish kanali; 8 — Chiqish kanali;**

Elliptik geometriya kurakorti uyurma sohasining hajmini 27% ga, turbulent kinetik energiya zichligini 18% ga kamaytirdi, dinamik bosim esa 2680–2750 Pa bo'lib, an'anaviy PRV yoki sferik modelga nisbatan 21% yuqori bo'ldi. Bu aylantiruvchi momentning ortishiga olib keldi.

Shuningdek, o'rta aylantiruvchi moment 10,6 N·mga teng bo'lib, 27–30% ortishi, foydali ish koeffitsienti 49% dan 62%ga ortganligini, bu bilan gidravlik yo'qotishlar 16% ga va kurak orqa uyurma sohasi 27% ga kamayganligi aniqlandi

Elliptik mikrogidroturbina yuqori bosimli quvurlarda ortiqcha bosim energiyasini qayta tiklashda samarali ekanligi tasdiqlandi. CFD natijalari shuni ko'rsatdiki, elliptik geometriya oqimni barqarorlashtiradi, uyurmali sohasini qisqartiradi va aylantiruvchi momentni oshiradi. Taklif etilgan konstruktsiya past bosimli quvur tizimlarida mikro gidroenergiya yig'ish uchun ilmiy asoslangan samarali yechimdir.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Chandran et al., "Assessment of Wind Energy potential at Gong Kedak and Pantai Chendering, Malaysia," J. Design for Sustainable and Environment, 3(1), 2021.
2. Vairavamoorthy, K., Lumbers, J., Leakage reduction in water distribution systems: optimal valve control, J. Hydraul. Eng., 124, 1146–1154, 1998.
3. Lucid Energy Inc. *LucidPipe™ Power System Technical Overview*, 2016. https://docs.lib.purdue.edu/context/ectfs/article/1224/viewcontent/FACTSHEET_LucidPipe_10202016.pdf
4. Berrada, A., Bouhssine, Z., Arechkik, A., 2019. Optimisation and economic modeling of micro hydropower plant integrated in water distribution system. J. Clean. Prod. 232, 877e887. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.036>.
5. Aliyev R., Saydullayeva S. Ellipticheskaya gidravlicheskaya turbina // Nauchno-texnicheskiy jurnal "Uzbekgidroenergetika". – 2023. – №4 (20). – B. 54–57.
6. Aliev Rayimjon, Bozarov Oybek, Saydullayeva Saidaxon, Abbosova Nozimaxon, Aliev Suhrob. Gidravlik turbina, UZ Patent № FAP 2833 (06.10.2025).

KO'RSATKICHLARI O'RTASIDAGI ANALITIK BOG'LANISHLARNI TADQIQ ETISH

O.O. Bozarov¹, J.N. Usmonov², N.A. Kozimjonov²

¹*Qo'qon universiteti Andijon filiali*

²*Andijon davlat universiteti*

Bugungi kunda energiya resurslariga bo'lgan talabning ortib borishi qayta tiklanuvchi energiya manbalaridan foydalanishni yanada dolzarb masalaga aylantirmoqda. Hidroenergetika qayta tiklanuvchi energiya manbalari orasida ekologik toza va barqaror energiya ishlab chiqarish imkonini beruvchi muhim yo'nalishlardan biri hisoblanadi. O'zbekiston Respublikasida mavjud anhorlar, kanallar va irrigatsiya tizimlarida oqayotgan suv oqimlari kichik gidroenergetika qurilmalarini joriy etish uchun katta salohiyatga ega. Biroq ko'plab mikro-GES qurilmalarida ishchi g'ildirak lopastlarining geometrik parametrlari optimal tanlanmaganligi sababli energiya samaradorligi past darajada qolmoqda.

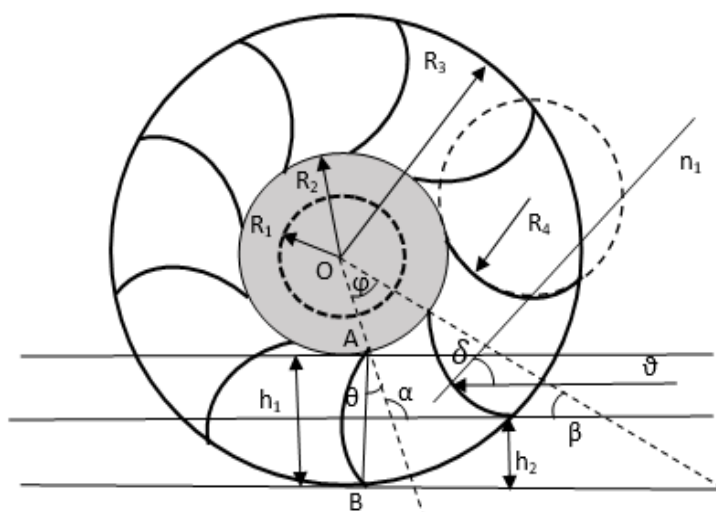
Shu sababli mikro-GES ishchi g'ildiragining geometrik parametrlarini ilmiy asosda aniqlash hamda ularning energetik ko'rsatkichlarga ta'sirini tahlil qilish muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega. Tadqiqot davomida mikro-GES ishchi g'ildiragiga suv oqimining ta'siri nazariy va analitik usullar yordamida o'rganildi. Suv oqimi charxpalak lopastlariga ta'sir etganda hosil bo'ladigan kuch gidrodinamik va gidrostatik bosimlarning yig'indisi sifatida qaraldi.

Hisoblashlar natijasida lopastlarga suv oqimi ko'rsatadigan ta'sir etuvchi kuch uchun quyidagi ifoda olindi:

$$F_c = \frac{\rho g l}{2} \left[\left(h_1 + \frac{\vartheta^2 \cos^2 \delta}{g} \right) h_1 + \frac{\vartheta^2 h_2}{g} \left(1 - \frac{\cos^2 \delta}{g} \right) \right]; \quad (1)$$

bu yerda ρ – suv zichligi g – erkin tushish tezlanishi ϑ – suv oqimi tezligi δ – oqimning lopastga tushish burchagi h_1 va h_2 – lopast balandliklari. Lopastlarga ta'sir etuvchi kuch quyidagi ko'p o'zgaruvchili funktsiyaga bog'liq:

Umuman olganda lopastlarga ta'sir etuvchi kuch α , θ , δ , φ , R_4 , h_1 erkin o'zgaruvchi kattaliklarning ko'p o'zgaruvchili funktsiyasi $F_c = F(\alpha, \theta, \delta, \varphi, R_4, h_1)$ iborat 1-rasm. (1) formula bilan hisoblangan qiymati, ko'p o'zgaruvchili F_c funktsiyaning maksimal qiymatidan 7-8% ga farq qiladi [1-2].



1-rasm. Mikro-GES ishchi g'ildiragining geometrik sxemasi.

Nazariy hisoblashlar asosida 5 kVt quvvatga mo'ljallangan mikro-GES ishchi g'ildiragining optimal

geometrik parametrlari aniqlandi.

1-jadval. Mikro-GES ishchi g'ildiragining geometrik parametrlari

Parametr	Parametr belgilanishi	Qiymati
Lopast yuqori balandligi	h_1	400 mm
Lopast pastki balandligi	h_2	190 mm
Charxpalak radiusi	R_3	650 mm
Lopast egrilik radiusi	R_4	450 mm
Lopastlar orasidagi burchak	φ	40°
Lopast egrilik burchagi	δ	20°

2-jadval. Mikro-GES energetik ko'rsatkichlari

Ko'rsatkichi	Ko'rsatkichi belgilanishi	Qiymati
Generator quvvati	P	5 kVt
Foydali ish koeffitsienti	η	92 %
Chiqish kuchlanishi	U	220 V

Tadqiqot natijalariga ko'ra, lopast burchagining $\delta = 20^\circ$ qiymati mikro-GES qurilmasining samarali ishlashi uchun maqbul deb topildi. Shuningdek, ishchi g'ildirak lopastlarining egrilik radiusi ham suv oqimining yo'nalishini samarali boshqarishga xizmat qiladi. Egrilik radiusining optimal tanlanishi suv oqimining energiyasini maksimal darajada mexanik energiyaga aylantirish imkonini beradi [4]. Shu asosda hisoblangan geometrik parametrlar asosida 5 kVt quvvatga mo'ljallangan mikro-GES ishchi g'ildiragining konstruktiv modeli ishlab chiqildi 2-rasm.



2-rasm. 5 kVt mikro-GES ishchi g'ildiragi konstruksiyasi.

Tajriba natijalari nazariy hisoblashlar bilan solishtirilganda ular orasidagi farq 3,4 % ni tashkil etdi [3]. Tadqiqot natijalari mikro-GES ishchi g'ildiragining geometrik parametrlarini optimallashtirish qurilmaning energiya samaradorligini sezilarli darajada oshirishini ko'rsatdi. Ayniqsa, lopast egrilik radiusi va oqimning tushish burchagi energiya o'zlashtirish darajasiga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.

Taklif etilgan konstruktiv parametrlar kichik suv oqimlariga ega kanallar va irrigatsiya tizimlarida mikro-GES qurilmalarini samarali qo'llash imkonini beradi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. Bozarov O., O'sarov X., Kiryigitov B. Asinxron faza-rotorli elektr dvigateli negizida mikro-GES elektr generatorini tayyorlash. *O'zbekgidroenergetika ilmiy-texnik jurnali*, 2020.

2. Bozorov O.O., Kozimjonov N.A. Tez oqar anhor va kanallarga mo'ljallangan ko'tariluvchi mikro-GES. 2023.
3. Qodirov D.B. Past bosimli suv oqimlari uchun energiya samarador mikrogidroelektrostansiya. PhD avtoreferati. 2018.
4. O. O. Bozarov, N. A. Kozimjonov. Analytical relationships between geometric and energy parameters of the water wheel. Technical science and innovation, Tashkent State Technical University. 2023, №2, p. 99-107.

Si–CdTe TANDEM QUYOSH ELEMENTIGA SnS_2 QATLAMINI JOYLASHTIRISH ORQALI SAMARADORLIKNI MODELLASHTIRISHK.R. YAKUBOV¹, D.SH. KURBANOV¹, D.R. AMINOV¹, S.ZH. KARAZHANOV²,
GUANGGEN ZENG³¹*Abu Rayxon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti Fizika-matematika fakulteti
220100 Urganch sh.*²*Quyosh energiyasi bo'limi, Energiya texnologiya instituti, Instituttveien 18, 2027 Kjeller,
Norway*³*Xitoy, Sichuan viloyati, Chengdu shahri, Sichuan Universiteti, Materialshunoslik va
Muhandislik insituti, 610065*

So'nggi yillarda tandem quyosh elementlarining samaradorligini oshirish muammosi fotovoltaika sohasida eng dolzarb ilmiy masalalardan biridir. An'anaviy CdS/CdTe ETL qatlamlarida chegara rekombinatsiyasi va energetik nomosliklar natijasida tok yo'qotilishi yuqori bo'lib, samaradorlikni cheklaydi. Bundan tashqari, CdS tarkibidagi kadmiy ekologik xavf tug'diradi, bu esa "Yashil fotovoltaika" talablariga zid keladi. Shu sababli, Si–CdTe tandemlarida elektron tashuvchi qatlamini optimizatsiya qilish, chegaradagi yo'qotishlarini kamaytirish va toksik materiallardan qochish ilmiy jihatdan dolzarb muammo hisoblanadi. Bu masalani hal qilish istiqbolli yo'nalishlardan biri sifatida SnS_2 materialini ETL sifatida qo'llash ko'rilmoqda. SnS_2 keng optik shaffoflik va qulay Energiya zonalarining moslashuvchanligiga ega bo'lib, elektronlar tashilishini yaxshilaydi va chegara rekombinatsiyasini kamaytiradi. Shu bilan birga, SnS_2 ekologik jihatdan xavfsiz bo'lib, CdS ga nisbatan muqobil sifatida qaraladi [1].

SnS_2 ning elektron tashish qatlami (ETL) sifatidagi samaradorligini baholash maqsadida Glass/ITO/ETL/n-Si/CdTe/Ni tandem strukturasi SCAPS-1D dasturida modellashirildi [1,9]. Taqqoslash bir xil simulyatsiya sharoitida amalga oshirildi: absorber va pastki qatlam parametrlarining barchasi o'zgartirilmasdan saqlandi, faqat ETL materiali almashtirildi [2].

Simulyatsiya natijalariga ko'ra, SnS_2 asosidagi model CdS ga variantga nisbatan taxminan 4 % yuqori energiya samaradorligini namoyon etdi. Bu farq kichik ko'rinsada, tandem strukturada chegara sohasidagi yo'qotishlarida muhim rol o'ynaydi [2]. Yaxshilanishning asosiy sababi ETL/absorber chagarasida qulayroq energetik moslashuvchanligi bilan bog'liq [6,8]. Xususan, SnS_2 /CdTe chegarasida hosil bo'ladigan o'tkazuvchanlik zonasi siljishda elektronlar uchun optimal yo'l hosil qiladi [6]. Bunday energetik konfiguratsiya elektronlarning yaxshi o'tkazishni ta'minlaydi va chegarada rekombinatsiyasini kamaytiradi [8]. Aksincha, CdS/CdTe chegarasida energetik nomoslik natijasida rekombinatsiya ehtimoli yuqoriroq bo'lishi mumkin [5,6].

Bundan tashqari, SnS_2 keng optik shaffoflikka ega ($E_g \approx 2.24$ eV) [7]. Bu qisqa to'liqinli fotonlarning absorber qatlamga samarali yetib borishini ta'minlab, qisqa tutashuv toki (J_{sc}) ning oshishiga ijobiy ta'sir ko'rsatadi [2]. CdS ning taqiqlangan zona qiymati yuqoriroq (≈ 2.42 eV) bo'lsa-da, real chegara nuqsonlari va energetik sathlar tashish jarayonlariga salbiy ta'sir qilishi mumkin [5,6]. Materialshunoslik nuqtai nazaridan ham SnS_2 ustunlikka ega [5]. CdS tarkibida kadmiy mavjud bo'lib, ekologik va toksikologik cheklovlariga ega [7]. SnS_2 esa nisbatan ekologik xavfsiz material hisoblanadi va kelajakda "Yashil fotovoltaika" konsepsiyasiga mos keladi [10]. Shu bilan birga, CdS texnologik jihatdan yetuk va CdTe asosidagi sanoat quyosh elementlarida keng qo'llanilgan an'anaviy ETL hisoblanadi [3,5]. Biroq SCAPS-1D natijalari shuni ko'rsatadiki, SnS_2 tandem konfiguratsiyada elektron tashishni yaxshilash va chegara rekombinatsiyasini kamaytirish nuqtai nazaridan istiqbolli muqobil variant bo'lishi mumkin [8,9].

Shunday qilib, SnS₂ asosidagi ETL Si–CdTe tandem quyosh elementlarida samaradorlikni oshirish, energetik moslashuvni yaxshilash va ekologik xavfsizlikni ta'minlash nuqtai nazaridan muhim ilmiy yo'nalish sifatida qaralishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Maryam Haghighi va boshqalar. A modeling study on utilizing SnS₂ as the buffer layer of CZT(S,Se) solar cells. *Solar Energy*. Volume 167, June 2018, Pages 165-171.
2. Shockley W., Queisser H.J. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J. Appl. Phys.* 1961;32:510–519.
3. Green M.A. et al. Solar cell efficiency tables. *Progress in Photovoltaics*. 2023.
4. Sze S.M., Ng K.K. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, 2007.
5. Romeo A. et al. Development of thin-film CdTe solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2004;83:243–250.
6. Wei S.-H., Zunger A. Band offsets and optical bowing in semiconductor alloys. *Applied Physics Letters*. 1998;72:2011–2013.
7. Sinsermsuksakul P. et al. SnS₂ and related materials for photovoltaic applications. *Advanced Energy Materials*. 2014;4:1400496.
8. Li X. et al. Band alignment engineering in CdTe solar cells. *Solar Energy*. 2018;159:390–397.
9. Decock K. et al. Numerical simulation of thin film solar cells using SCAPS. *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2011;1:92–98.
10. Green M.A. *Third Generation Photovoltaics*. Springer, 2006.

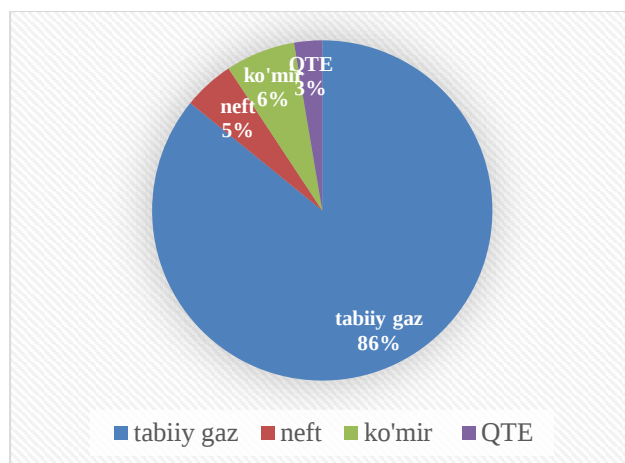
O'ZBEKISTON SHAROITIDA QUYOSH ENERGIYASIDAN FOYDALANISHNING SALOHİYATI VA UNI RIVOJLANTIRISH ISTIQBOLLARI

N.O. Axmedjonov

*Cyber university davlat universiteti,
Toshkent viloyati, Nurafshon shahri, Yangiobod k. 42-uy
E-mail: nodirbek.axmedjonov@bk.ru*

Mamlakatimizda bugungi kunda elektr energiyasining katta qismi tabiiy gaz va ko'mir hisobidan ishlab chiqarilmoqda. Umumiy energiya ta'minoti 2024-yil holati bo'yicha: tabiiy gaz 85,87 % ni tashkil etadi, qolgan qismini neft 4,84 % va ko'mir 6,624 %, QTE manbalari 2,66 % ni egallagan¹ (1-rasm). Biroq bu model uzoq muddatda na ekologik, na iqtisodiy jihatdan barqaror hisoblanmaydi. Shu bois, hukumat tomonidan "yashil energetika" sohasiga alohida e'tibor qaratilib, 2030-yilgacha elektr energiyasi ishlab chiqarishning kamida 25–30 foizini qayta tiklanuvchi energiya manbalari hisobidan ta'minlash belgilangan².

Zamonaviy dunyoda energiya manbalarining tanqisligi va iqlim o'zgarishi muammolari barqaror taraqqiyotning asosiy to'siqlaridan biriga aylanmoqda. Shu munosabat bilan, qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM) ya'ni quyosh, shamol, biomassa, geotermal va gidroenergiya muqobil va ekologik toza energiya manbalari sifatida tobora katta ahamiyat kasb etmoqda. Bu energiya manbalari atrof-muhitga minimal zarar yetkazadi, uglerod chiqindilarini kamaytiradi va uzoq muddatda iqtisodiy jihatdan ham tejamkor hisoblanadi. O'zbekiston geografik joylashuvi, tabiiy resurslari va iqlim sharoitlari nuqtai nazaridan qayta tiklanuvchi energiya manbalari orqali energiya ishlab chiqara olishi mumkin bo'lgan katta salohiyatga ega davlatlardan biri hisoblanadi.



1-rasm. Umumiy energiya ta'minoti 2024-yil holati bo'yicha.

O'zbekiston yiliga o'rtacha 300 dan ortiq quyoshli kunlarga ega bo'lib, bu ko'rsatkich quyosh fotoelektr stansiyalari uchun nihoyatda qulay. Mamlakat bo'yicha quyosh nurlanishining o'rtacha darajasi 4,52 kWh/m²/kun atrofida bo'lib³, bu Markaziy Osiyodagi eng yuqori ko'rsatkichlardan biridir. Surxondaryo, Qashqadaryo, Xorazm, Buxoro va Navoiy viloyatlari quyosh energiyasidan samarali foydalanish uchun eng istiqbolli hududlar sanaladi.

Ayni vaqtda Respublikamiz hududida qurilayotgan va qurilishi rejalashtirilgan QES larining statistikalarini (2-rasm) berib ketamiz. Xorazm viloyati Tuproqqal'a tumanida "Sarimay Solar" quyosh elektr stansiyasi Fransiyaning "Votalia" kompaniyasi tomonidan 2025-yil noyabr oyiga topshirish rejalashtirilgan. Loyiha 177 gektar maydonni egallagan bo'lib, 100 MV quvvatga ega, bu kamida 60 mingta honadonni elektr energiyasi bilan ta'minlashga yetadi. Havoga chiqariladigan CO₂ chiqindisini kamaytirish yiliga 230 ming tonnadan ortiq bo'lib, mazkur loyiha O'zbekistonning toza energiya ishlab chiqarishni kengaytirish va "yashil iqtisodiyot"ga o'tish bo'yicha sa'y-harakatlarini qo'llab-quvvatlaydi⁴.

Buxoro viloyatida, Abu Dabining Masder kompaniyasi tomonidan Nur Bukhara Solar PV + BESS (Nur Bukhara quyosh fotovoltaik stansiyasi va batareya energiya saqlash tizimi) loyihasi ham 2025-yilda yakunlanishi rejalashtirilgan bo'lib, quvvati 250 MW solar PV + 63 MW / 126 MWh (batareya energiya saqlash tizimi BESS) ga ega. taxminan 55,000 ga yaqin xonadonlarga elektr energiyasi yetkaziladi. Viloyatda yana bitta loyiha Artemisia (Votalia kompaniyasi) gibrid loyiha 126 MW fotovoltaik + 300 MW shamol + 100 MW / 200 MWh BESS quvvatga ega, uch kompleks: quyosh, shamol, va energiya saqlash gibrid loyihasi qurilishi 2026-yilda boshlanishi rejalashtirilgan.

Samarqand va Jizzax viloyatidagi asosiy loyihalar Nur Samarkand (Masdar) 220 MW Solar PV stansiyasi va Nur Jizzakh (Masdar) – 220 MW Solar PV stansiyasi hisoblanadi. Ushbu loyihalar yakunlangach, ikki stansiya birgalikda taxminan 1.12 milliard kilovatt-soat (≈ 1.12 TWh) yiliga elektr ishlab chiqaradi, CO₂ chiqindilarini sezilarli darajada kamaytirish kutilmoqda.

Navoiy viloyatida quvvati 100 MV "Navoi Scaling Solar 1" loyihasi 2021-yilda ishga tushgan. Surxondaryo viloyatida Sherabad Solar Project (PV quyosh fotoelektr stansiyasi) quvvati 457 MW ga teng bo'lib, ishga tushirilish muddati 2026-yilga belgilangan⁵. Andijon, Namangan va Qashqadaryo viloyatlarida ham quyosh elektr stansiyalari qurilishi rejalashtirilgan.



2-rasm. Respublikamiz hududida qurilayotgan va qurilishi rejalashtirilgan QESlar

O'zbekiston qayta tiklanuvchi energiya manbalarini keng joriy etish bo'yicha so'nggi yillarda katta qadamlar tashlagan bo'lsada, bu jarayonni sekinlashtiruvchi bir qator tizimli va texnik muammolar mavjud. Mamlakatda hozircha quyosh panellari, inverterlar, turbinalar va akkumulyator tizimlari mahalliy ishlab chiqarilmaydi yoki juda cheklangan hajmda ishlab chiqariladi. Bu holat xorijdan importga bog'liqlikni keltirib chiqaradi, natijada loyiha qiymati oshadi. Quyosh va shamol elektr stansiyalari asosan uzoq hududlarda joylashgan bo'lib, ularni milliy tarmoqqa ulash katta infratuzilma xarajatlarini talab etadi.

Qayta tiklanuvchi energiya sohasining barqaror rivojlanishi, avvalo, yetuk mutaxassislar, ilmiy salohiyat va texnik kadrlar tayyorligiga bevosita bog'liq. Energetika va muhandislik yo'nalishlarida o'qitilayotgan talabalarning amaliy tayyorgarligi yetarli darajada emas. Ko'pgina oliy ta'lim muassasalarida zamonaviy laboratoriya-uskunalar va sinov maydonchalari mavjud emas. Shu sababli Oliy ta'lim muassasalarida "yashil energetika", energiya samaradorligi va barqaror rivojlanish texnologiyalari yo'nalishlarini kengaytirish, xalqaro universitetlar bilan qo'shma dasturlarni yo'lga qo'yish, ilmiy-tadqiqot markazlari va ishlab chiqarish korxonalari o'rtasida ilm-fan - ishlab chiqarish - ta'lim integratsiyasini kuchaytirish zarur. Xulosa qilib aytganda, qayta tiklanuvchi energiya manbalari O'zbekistonning energetik xavfsizligi, ekologik barqarorligi va iqtisodiy mustaqilligini ta'minlashda muhim o'rin tutadi. Tizimli islohotlar, kadrlar salohiyatini oshirish, ilmiy izlanishlarni kuchaytirish va xalqaro hamkorlikni kengaytirish orqali bu soha mamlakat iqtisodiyotining eng istiqbolli yo'nalishlaridan biriga aylanishi mumkin.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. O'zbekiston Respublikasi milliy statistika qo'mitasi. O'zbekiston Respublikasi yoqilg'i va energiya balansi (2024 yil)
2. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining PQ-4477-son qarori, 2019-yil 22-oktabr)
3. International Energy Agency. (2023). Solar Energy Policy in Uzbekistan: A Roadmap. Paris: IEA. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/solar>
4. Voltalia kompaniyasi (2024). O'zbekistonda Sarimay quyosh elektr stansiyasi qurilishi va batareya orqali energiya saqlashning jadal rivojlanishi boshlandi. Voltalia rasmiy sayti, 15 may 2024-yil. <https://www.voltalia.com>
5. <https://www.masder.ae>

QAZIB OLISH SANOATIDA MUQOBIL ENERGIYA TIZIMLARI: ILMIY TAHLILI

O‘.K. Sunnatova, M.M. Raxmatova

Navoiy davlat univesiteti

Qazib olish sanoati energiya sarfi yuqori va atrof-muhitga katta ta’sir ko’rsatadigan soha hisoblanadi. An’anaviy yoqilg’ilar — ko‘mir, neft va gaz — ekologik iz qoldiradi, ishlab chiqarish xarajatlarini oshiradi va global iqlim o‘zgarishiga salbiy ta’sir ko’rsatadi. Shu sababli, so‘nggi yillarda muqobil energiya (ME) tizimlari — quyosh, shamol, geotermal, gidro va bioyoqilg’ilar — qazib olish sanoatida ham tadbiq etilmoqda.

Ushbu maqola “Renewable Energy Systems in the Mining Industry: A Literature Review and Research Agenda” (Hossein Abbaspour va boshq., 2022) nomli maqola asosida qazib olish sanoatida ME tizimlarining potentsiali, qo‘llanilishi va istiqbollari tahlilini beradi. Tezisning maqsadi — sohada amalga oshirilgan ilmiy ishlarni sharhlab, kelgusidagi tadqiqotlar uchun yo‘nalishlar belgilash.

Muqobil energiya tizimlari atrof-muhitga zarar etkazmaydigan va iqtisodiy jihatdan foydali hisoblanadi. Qazib olish sanoatida ularning qo‘llanilishi bir necha bosqichni o‘z ichiga oladi:

- Konlarni qazib olish;
- Mineralni transport qilish va qayta ishlash;
- Energiya ta’minoti va jarayonlarni optimallashtirish.

ME tizimlarining afzalliklari:

1. Energiya xarajatlarini kamaytirish;
2. CO₂ emissiyasini kamaytirish;
3. Sanoat jarayonlarini ekologik barqaror qilish.

Biroq, texnik va iqtisodiy cheklovlar mavjud: kapital xarajatlar yuqori, infrastruktura talab etiladi va ayrim tizimlar iqlim sharoitiga bog‘liq. Shu sababli, qazib olish sanoati uchun hibrid tizimlar (masalan, quyosh + batareya yoki shamol + PV) samarali yechim sifatida ko‘riladi.

Maqola asosida Hossein Abbaspour va boshq. (2022) tomonidan tahlil qilingan 40 ta ilmiy ish, konferensiya materiallari, magistrlik va dissertatsiya ishlari sharhlangan. Adabiyotlar uch asosiy mavzu bo‘yicha guruhlangan:

1. Potentsial va amalga oshirish imkoniyatlari;
2. ME tizimlarini tanlash jarayoni;
3. Tizimlarning qo‘llanilishi va istiqbollari.

Har bir ishning iqtisodiy samaradorligi, ekologik ta’siri va texnologik integratsiya imkoniyatlari o‘rganilgan.

Sharh shuni ko‘rsatadiki:

- Qazib olish sanoatida ME tizimlari energiya xarajatini kamaytiradi va ekologik barqarorlikni oshiradi;
- Texnik va iqtisodiy to‘siqlar mavjud: yuqori kapital xarajatlar, infrastruktura cheklovlari va iqlim sharoitiga bog‘liqlik;
- Tadqiqotlar kelajakda hibrid tizimlar, optimizatsiya metodlari va maxsus dasturiy ta’minot ishlab chiqishga e’tibor qaratishni taklif qiladi.

Kelgusidagi ilmiy yo‘nalishlar:

1. Ko‘p faktorli baholash usullari;
2. Optimizatsiya metodlari;

3. Qazib olish va mineralni qayta ishlash operatsiyalari;
4. Dasturiy ta'minot ishlab chiqish.

Tizim turi	Afzalliklar	Cheklovlar	Qo'llanilish bosqichi
Quyosh (PV)	Energiyani arzon ishlab chiqarish, ekologik	Ob-havo sharoitiga bog'liq	Konning off-grid energiyasi
Shamol	Uzluksiz energiya, kam xarajat	Shamol tezligiga bog'liq	Qazib olish va transport
Gidro	Barqaror energiya, uzoq muddatli ishlash	Suv manbalariga bog'liq	Mineralni qayta ishlash
Geotermal	Barqaror, kam chiqindili	Geotermal manbalarining cheklanganligi	Jarayonlarni isitish
Bioyoqilg'i	Qayta tiklanuvchi, chiqindilarni kamaytiradi	Ishlab chiqarish xarajatlari yuqori	Transport va energiya manbai

Raqamli natijalar tavsiyasi

- Qazib olish sanoatida ME tizimlari energiya xarajatini 20–30% kamaytirishi mumkin.
- CO₂ emissiyasini kamaytirish 10–25% gacha bo'ladi.
- Hibrid tizimlar (quyosh + batareya) uzoq masofali konlarda energiya mustaqilligini 90% gacha oshiradi.

Ushbu maqola qazib olish sanoatida ME tizimlarining potentsiali va qo'llanilishini tizimli tahlil qiladi. Natijalar sanoat loyihalarida energiya samaradorligini oshirish, ekologik barqarorlikni ta'minlash va kelgusidagi ilmiy tadqiqotlar uchun yo'nalishlarni belgilashga xizmat qiladi.

Qazib olish sanoatida mexanizatsiya va avtomatlashtirilgan (ME) tizimlar ekologik va iqtisodiy jihatdan samarali bo'lib, hibrid tizimlar va optimizatsiya metodlarining qo'llanilishi ishlab chiqarish samaradorligini oshiradi. Kelgusida dasturiy ta'minot, ko'p faktorli baholash va tahliliy tadqiqotlar yordamida yanada samarali va mukammal yechimlar ishlab chiqish imkoniyatlari mavjud.

Foydalangan adabiyotlar:

1. Abbaspour, H., et al. (2022). *Renewable Energy Systems in the Mining Industry: A Literature Review and Research Agenda*. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER).

V ШЎБА. ҚАТТИҚ ЖИСМЛАРНИНГ РАДИАЦИОН ФИЗИКАСИ

RADIOAKTIV ISHLOV BERILGAN TABIIY TOLALARINING OPTIK XOSSALARINI TADQIQ QILISH

A.T.Mamadalimov¹, N. K. Xakimova¹, Sh.M. Norbekov², S.U.Umarova³

¹*Yarimo`tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti*

²*Toshkent menejment va iqtisodiyot instituti*

³*Qarshi davlat universiteti*

Mazkur tadqiqotda sun'iy radionuklid bo'lgan γ -⁶⁰Co izotopi bilan nurlantirilgan paxta tolalari namunalarining optik xususiyatlarini o'rganishdan iborat. KMnO₄ va yod bilan termik ishlov berilgan Surxon-18 va Surxon-14 navli paxta tolalarining optik xossalari ya'ni fotoluminesensiya (FL) va infraqizil (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) (FTIR) spektroskopiya usullarini birgalikda qo'llash orqali kompleks tarzda o'rganildi. Ushbu yondashuv tolalarning energetik holatlari va molekulyar tuzilishi o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash imkonini berdi.

Natijalar asosida taqiqlangan zonadagi chuqur sathlarning energiyasi baholandi. KMnO₄ bilan legirlangan namunada yuqori optik faollik kuzatildi. Tadqiqot natijalari tolalarning optoelektron qurilmalarda qo'llanish imkoniyatlarini tasdiqlaydi.

So'ngi paytlarda tabiiy tolalar fizikasi sohasida tadqiqotlar muvaffaqiyatli olib borilmoqda. Xususan, paxta tolalarining yarimo`tkazuvchanlik xossalari aniqlangan [1-4]. Paxta tolalari ketma-ket almashinadigan kristalli va amorf tuzilishlariga ega [4]. Hozirgi vaqtda tabiiy yarimo`tkazgich tolalari fizikasi sohasida jadal tadqiqotlar olib borish natijasida elektron texnika elementlarini-elektron namlik o'lgachichni, diodlarni, fotodiodlarni va tranzistorlarni yaratishga imkon berdi [3-4].

Paxta tolalari asosiy tarkibiy qismi bo'lgan sellyuloza tufayli murakkab kristalli-amorf tuzilishga ega bo'lib, ularning optik xossalari funksional guruhlar holati va strukturaviy defektlar bilan chambarchas bog'liq. FTIR spektroskopiya usuli yordamida tolalarning kimyoviy tuzilmasidagi o'zgarishlar aniqlanib, ular FL spektrlarida kuzatilgan emissiya xususiyatlari bilan solishtirildi.

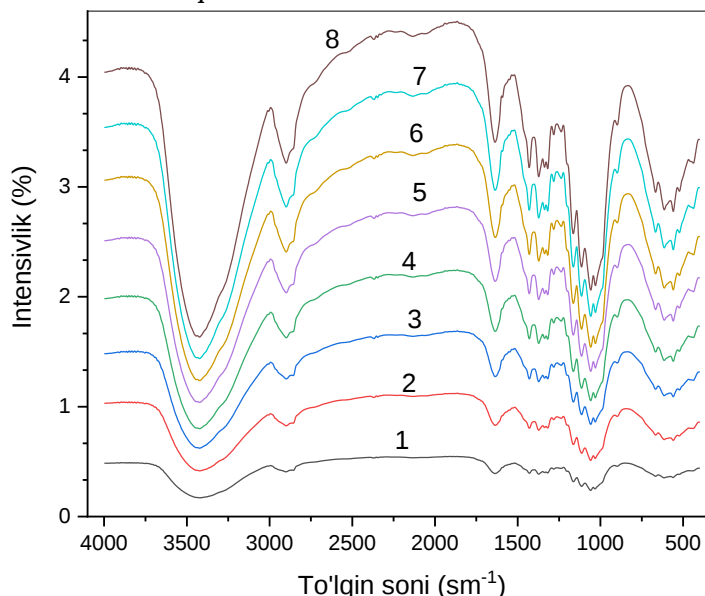
1-rasm. (1) Surxon-14 navli paxta tolasi γ -⁶⁰Co izotopi bilan nurlantirilgan. (2) Surxon-18 navli paxta tolasi γ -⁶⁰Co izotopi bilan nurlantirilgan va KMnO₄ bilan legirlangan. (3) Surxon-14 navli paxta tolasi γ -⁶⁰Co izotopi bilan nurlantirilgan va yod bilan legirlangan. (4) Surxon-14 navli paxta tolasi γ -⁶⁰Co izotopi bilan nurlantirilgan. (5) Surxon-18 navli paxta tolasi γ -⁶⁰Co izotopi bilan nurlantirilgan va yod bilan legirlangan. (6) Surxon-14 navli paxta tolasi γ -⁶⁰Co izotopi bilan nurlantirilgan va KMnO₄ bilan legirlangan. (7) Surxon-14 navli toza paxta tolasi. (8) Surxon-18 navli toza paxta tolasi. γ -⁶⁰Co nurlanishi, KMnO₄ va yod bilan modifikatsiya qilingan holatda o'rganilgan. FTIR tahlil paxta tolasi tarkibidagi sellyuloza funksional guruhlari va ularning radiatsion hamda kimyoviy ishlov natijasida yuz beradigan strukturaviy o'zgarishlarini aniqlash imkonini beradi. Paxta tolasi sellyulozasining asosiy FTIR diapazonlari Paxta tolasi asosan β -D-glyukopiranoza birliklaridan tashkil topgan sellyulozadan iborat. FTIR spektrlarida quyidagi asosiy yutilish zonalarini kuzatiladi:

1-jadval

1-rasmdagi grafikda ushbu zonalar aniq ko'rinadi va radiatsiya hamda kimyoviy ishlov

To'lqin soni (cm ⁻¹)	Guruh	Tavsif
3300–3400	O–H stretching	Sellyuloza gidroksil guruhlari
2890–2920	C–H stretching	Metilen guruhlari
1730–1740	C=O	Oksidlangan guruhlari (karbonil)
1640	O–H bending	Adsorbsiyalangan suv
1430	CH ₂ bending	Kristallik indeks bilan bog'liq
1370	C–H bending	Sellyuloza skeleti
1160	C–O–C stretching	Glikozid bog'lari
1050–1030	C–O stretching	Spirt guruhlari
895	β -glikozid bog'	Sellyuloza amorf fazasi

natijasida ularning intensivligi o'zgaradi. γ -⁶⁰Co nurlanishi sellulozada radiatsion destruksiya va zanjir uzilishi jarayonlarini keltirib chiqaradi.



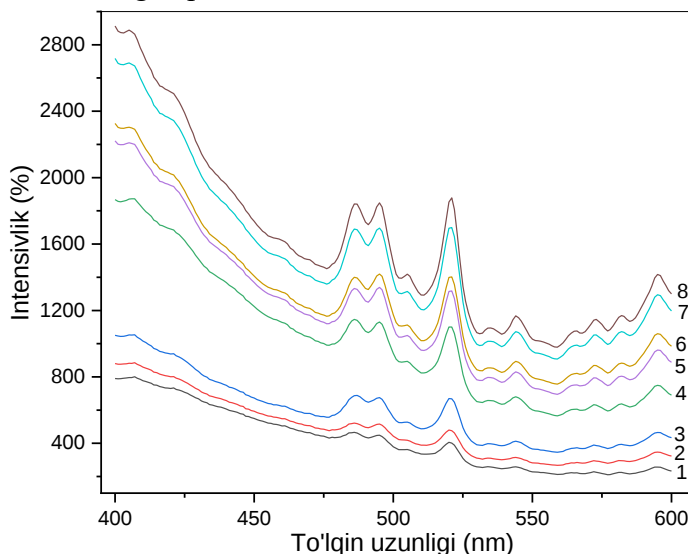
1-rasm. Surxon-14 va Surxon-18 navli paxta tolalarining FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) spektrlari.

Asosiy kuzatuvlar: 3300–3400 cm⁻¹ (O–H guruhi) Toza paxta tolalarida (7 va 8 spektrlar) keng va kuchli yutilish kuzatiladi. Nurlantirilgan namunalar (1 va 4) da intensivlik kengligi ortgan shuningdek intensivlik biroz kamaygan. Bu vodorod bog'lari tizimining buzilishi va selluloza kristallik darajasining pasayishi bilan izohlanadi. Yod bilan ishlov berilgan namunalar (3 va 5) 3300 cm⁻¹ O–H pikining shakli o'zgaradi. Bu vodorod bog'larining qayta tashkil bo'lishi selluloza–yod komplekslari hosil bo'lishini bildiradi.

Paxta tolasi asosan β -D-glyukopiranoza birliklaridan tashkil topgan sellulozadan iborat. Sellyuloza molekulasida klassik xromofor guruhlari kam bo'lsa ham, PL emissiya quyidagi manbalar hisobiga yuzaga keladi: oksidlangan guruhlari (C=O, COOH), radikal markazlar, konjugatsiyalangan fragmentlar, selluloza zanjirlarining klasterlashuvi. Tadqiqotlarda selluloza materiallarida 370 nm, 430–470 nm va 505–510 nm atrofida uchta asosiy emissiya zonasi kuzatilishi aniqlangan.

γ -⁶⁰Co nurlanishi paxta tolasi sellulozasida erkin radikallar va defekt markazlari hosil bo'lishiga olib keladi. Radiatsiya natijasida selluloza zanjirining qisman degradatsiyasi yuz berib,

karbonil guruhlar miqdori ortadi, bu esa luminesensiya intensivligini oshiradi. KMnO_4 bilan modifikatsiya qilingan namunalar eng yuqori FL intensivligini ko'rsatadi, bu oksidlangan emissiya markazlarining ko'payishi bilan bog'liq.



2-rasm. Surxon-14 va Surxon-18 navli paxta tolalarining fotolumensensiya spektri.

Yod bilan legirlash selluloza zanjirlari orasida kompleks tuzilmalar hosil qilib, emissiya spektrining siljishiga olib keladi. Surxon-18 navli paxta tolasi Surxon-14 ga nisbatan yuqori optik faollikka ega, bu uning kristallik darajasi yuqoriligi bilan izohlanadi. Fotoluminesensiya spektrlaridagi o'zgarishlar paxta tolasi strukturasi radiatsion va kimyoviy modifikatsiya orqali boshqarilishi mumkinligini ko'rsatadi.

Adabiyotlar:

1. Zakirov A.S., Yuldashev Sh.U., Wang H.J., Cho H.D., Kang T.W., Khamdamov J.J., Mamadalimov A.T. Photoluminescence study of the surface modified and MEH-PPV coated cotton fibers // Journal of Luminescence. 2011 V.131. Pp. 301–305.
2. Усмонов Х.У, Никонович Г.В. Электронная микроскопия целлюлозы. Тошкент. Издательство Академии наук УзССР. 1962. 264 стр.
3. Zakirov A.S., Yuldashev Sh.U., Cho H.D., Lee J.C., Kang T.W. and Mamadalimov A.T. Organic photodiodes on the base of cotton fibers/polymer composite. Journal of Applied Physics 110, 114522 (2011).
4. А.Т.Мамадалимов, З.А.Додобоев, К.Махмудов, Ш.Туйчиев, М.Шерматов. Фотопроводимость хлопковых волокон. Доклады АН РУз 1995г. №5-6. стр.22-24.

ВЛИЯНИЕ АЛЬФА-ЧАСТИЦ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ ПАЛЛАДИЯ

Ш.Б. Утамурадова, Д.А. Рахманов

Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном университете Узбекистана. Узбекистан, 100057, Ташкент.

e-mail: dilmurod-1991@bk.ru

В условиях интенсивного развития ядерной энергетики, космической техники и

высокоэнергетической электроники всё более актуальной становится задача создания радиационно-стойких полупроводниковых материалов. Кремний, являясь основным материалом современной микро- и наноэлектроники, широко применяется в приборах, работающих в условиях воздействия ионизирующих излучений. Однако известно, что облучение высокоэнергетическими частицами приводит к деградации его электрофизических свойств вследствие образования радиационных дефектов, которые существенно изменяют параметры проводимости и рекомбинации носителей заряда [1].

Альфа-частицы, обладая большой массой и высокой ионизирующей способностью, вызывают в кремнии интенсивное образование точечных и кластерных дефектов, таких как вакансии, межузельные атомы и их комплексы. Эти дефекты формируют глубокие уровни в запрещённой зоне, которые действуют как эффективные центры рекомбинации и компенсации, приводя к снижению концентрации свободных носителей заряда и росту электрического сопротивления материала. В результате существенно ухудшаются характеристики полупроводниковых приборов, особенно предназначенных для работы в радиационных условиях [2].

Палладий является одним из таких элементов, способных существенно влиять на дефектную подсистему кремния. В зависимости от условий диффузионного легирования и термической обработки атомы Pd могут образовывать различные дефектные комплексы, изменяющие распределение энергетических уровней в запрещённой зоне и тем самым определяющие электрофизические свойства материала. В ряде работ показано, что подобные примеси могут как ухудшать, так и, при оптимальном выборе технологических режимов, улучшать радиационную стойкость кремния [3].

В качестве объектов исследования использовались монокристаллические пластины кремния n-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho \approx 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (марка КЭФ-40). Легирование кремния палладием осуществлялось диффузионным методом. Для этого атомы палладия предварительно напылялись на поверхность кремниевых пластин, после чего образцы помещались в откачанные и запаенные кварцевые ампулы. Диффузионный отжиг проводился при температуре $T = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 часов.

После завершения процессов легирования и повторной очистки поверхности исходные и легированные образцы подвергались облучению α -частицами с энергией 2 МэВ. Облучение проводилось при дозах 5×10^{14} и $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ с использованием электростатического ускорителя «ЭГ-5» в Лаборатории нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований (ЛИФ ОИЯИ).

Исследование электрических свойств образцов проводилось методом импедансной спектроскопии при комнатной температуре ($T \approx 300 \text{ K}$). Измерения выполнялись с использованием импедансметра «Ellins P-45X» в двухэлектродной измерительной ячейке в частотном диапазоне от 1 Гц до 0.5 МГц. Амплитуда переменного измерительного сигнала составляла 10 мВ, что позволяло проводить измерения в линейном режиме без внесения дополнительных нелинейных искажений в электрический отклик образцов.

На рис.1 представлены импедансные спектры исходного и легированного образца n-Si до и после облучения α -частицами с энергией 2 МэВ при дозах 5×10^{14} и $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Как видно, что сопротивление исходного образца до облучения составляет 123.4 кОм. После облучения сопротивление возрастает до 241.1 кОм и 533.9 кОм соответственно.

Резкое увеличение сопротивления сопровождается существенным расширением полукруга на диаграммах Найквиста, что указывает на рост суммарного импеданса и

замедление релаксационных процессов [4]. Данный эффект обусловлен образованием радиационных дефектов в кристаллической решётке кремния (вакансий, межузельных атомов и их комплексов), которые формируют глубокие уровни в запрещённой зоне и действуют как центры рекомбинации и компенсации [5]. В результате уменьшается концентрация свободных носителей заряда и подвижность электронов, что приводит к увеличению объёмного сопротивления.

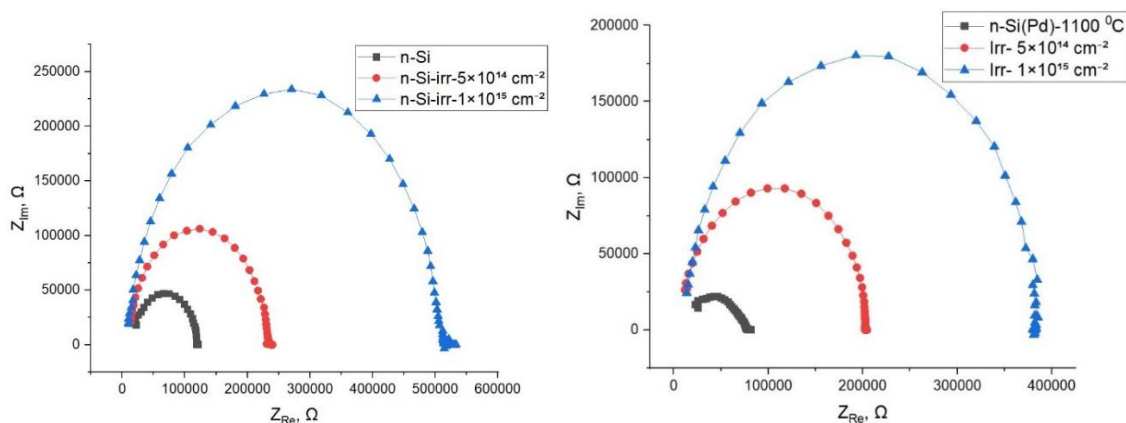


Рис.1. Годографы исходного(а) и легированного(б) образца n -Si: до (черная линия), после облучения с дозой $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (красная линия) и $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (синяя линия)

Таким образом, нелегированный n -Si демонстрирует низкую радиационную стойкость, поскольку уже при дозе $1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ его сопротивление возрастает более чем в 4 раза по сравнению с исходным значением.

Для образцов n -Si<Pd>, полученных диффузионным легированием при 1100°C , исходное сопротивление составляет 82.4 кОм, что заметно меньше, чем у нелегированного кремния (123.4 кОм). Это свидетельствует о том, что процесс высокотемпературной диффузии частично улучшает структурное качество кристалла и снижает вклад технологических дефектов в общее сопротивление(рис.2.б).

После облучения сопротивление увеличивается до 203.7 кОм ($5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и 381.3 кОм ($1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$). Несмотря на существенный рост, абсолютные значения сопротивления остаются ниже, чем у соответствующих нелегированных образцов. Это означает, что присутствие атомов Pd частично компенсирует негативное влияние радиационных дефектов.

С физической точки зрения атомы Pd в кремнии формируют глубокие уровни и способны образовывать комплексы с вакансиями и другими радиационными дефектами (Pd–V, Pd–Si–V) [6]. Такие комплексы уменьшают электрическую активность радиационных дефектов, снижая их эффективность как центров рекомбинации. В результате деградация электрических свойств под действием облучения в легированных образцах при 1100°C выражена слабее, чем в исходном n -Si, однако остаётся достаточно заметной.

Литература:

1. Fretwurst E., Moll M., Lindström G. *Radiation damage in silicon detectors*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2007, Vol. 578, p. 108–117.

2. Utamuradova Sh.B., Daliev Sh.Kh., Rakhmanov D.A., Uteniyazova A.B., Abiyev A.S., 2025. Raman spectroscopy of gamma-irradiated silicon doped with rhodium. East European Journal of Physics, 4, P.696-700.
3. Srour J. R., McGarrity J. M. Radiation effects on microelectronics in space. *Proceedings of the IEEE*, 1988, **76**, 1443–1469. <https://doi.org/10.1109/5.16328>
4. Utamuradova Sh.B., Rakhmanov D.A., Tuan P.L., Doroshkevich A.S., Kinev V.A., Tatarinova A., Isayev R.Sh., Abiyev A.S., 2025. New materials, compounds and applications. 9(1). Pp.50-57.
5. Watkins G. D. Intrinsic defects in silicon. Materials Science in Semiconductor Processing, 2000, Vol. 3, p. 227–235.
6. Utamuradova Sh.B., Daliev Sh.Kh., Rakhmanov D.A., Samadov S.F., Doroshkevich A.S., 2023. Investigation of radiation defect formation of irradiated n-Si<Pt>. Advanced Physical Research, Vol. 5, No. 3, P.183–191.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ ГАЛЛИЕМ, ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Ш.Б. Утамурадова, О.К. Атабоев

*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники,
Ташкент, Узбекистан*

В последние годы кремниевые солнечные элементы (СЭ) вновь привлекают значительное внимание для космических применений, особенно для краткосрочных миссий на низкой околоземной орбите (LEO, 500-2000 км). Это обусловлено их высокой эффективностью преобразования солнечной энергии, экономической эффективностью, технологической зрелостью и благоприятным соотношением мощности к массе [1].

В настоящее время современные кремниевые СЭ, такие как гетероструктурные (НJT – Heterojunction Technology) СЭ и элементы со структурой с туннельным оксидом и пассивированным контактом (TOPCon – Tunnel Oxide Passivated Contact), демонстрируют эффективность преобразования солнечной энергии более 25% при стандартных наземных условиях (AM1.5G), что соответствует примерно 23% при космическом спектре AM0 [2].

В последние годы НJT СЭ достигли наивысшей эффективности среди однопереходных кремниевых фотоэлектрических преобразователей. Рекордная эффективность таких элементов в наземных условиях достигает 27.1% (AM1.5G, 1000 Вт/м²) [2]. Помимо высокой эффективности, данные солнечные элементы характеризуются относительно высокой радиационной стойкостью, технологической простотой изготовления и низкой себестоимостью. Благодаря этим преимуществам НJT СЭ рассматриваются как перспективные источники электроэнергии для космических аппаратов малых размеров, в частности спутников класса CubeSat, функционирующих на низких околоземных орбитах.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы является исследование влияния электронного облучения с энергией 1 МэВ на фотоэлектрические характеристики кремниевых гетероструктурных СЭ р-типа, легированных галлием.

Для проведения исследования НТ СЭ (рис. 1) были созданы на подложках монокристаллического кремния р-типа, легированных галлием и выращенных методом Чохральского (Cz-Si). Параметры подложек: концентрация акцепторов $N_a \geq 3.1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщина $\sim 135 \text{ мкм}$, кристаллографическая ориентация поверхности (100), исходное объемное время жизни свободных носителей заряда $\tau_{\text{bulk}} \geq 0.22 \text{ мс}$. Подробная информация о технологии изготовления высокоэффективных НТ СЭ приведена в работе [3].

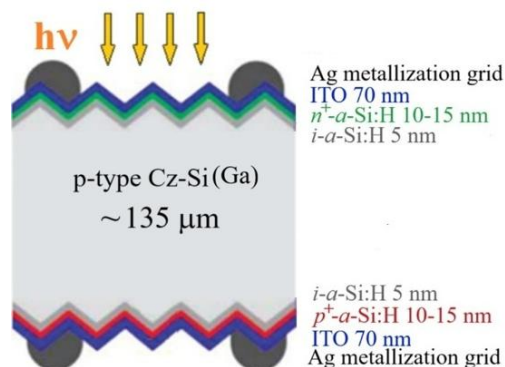


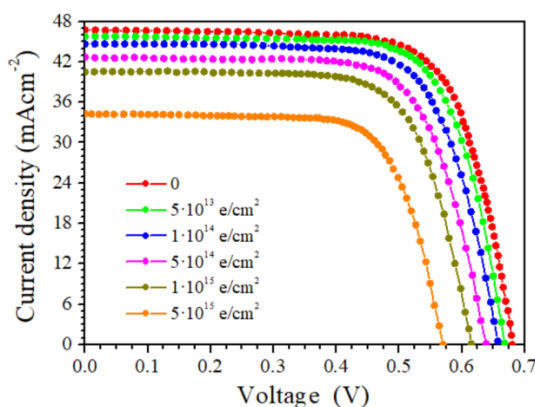
Рис. 1. Схематический вид кремниевого НТ солнечного элемента.

Облучение образцов электронами проводилось на ускорителе У-003 Института ядерной физики АН РУз в режиме холостого хода для предотвращения утечек тока во время облучения при комнатной температуре. Энергия электронов составляла 1 МэВ, интенсивность потока электронов $\sim 1.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Образцы облучались в диапазоне флюенсов $5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{15} \text{ е/см}^2$. Погрешность измерения флюенса электронов (Φ_e) не превышала $\sim \pm 10 \%$.

Спектральная фоточувствительность (квантовая эффективность) гетероструктурных солнечных элементов (СЭ) исследовалась с использованием измерительной системы QEX10 в режиме короткого замыкания при 300 К. Измерения нагрузочных вольт-амперных характеристик (НВАХ) проводились с использованием импульсного имитатора солнечного излучения класса ААА (SS-80AA) со спектром АМ0 ($136,7 \text{ мВт/см}^2$) также при 300 К.

Для исследования природы радиационных дефектов в объеме кремния, образовавшихся после электронного облучения, применялся метод ёмкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Измерения проводились на установке Boonton 7200 совместно с генератором импульсов Tektronix AFG3021C при частоте заполнения 1 МГц. Эксперименты выполнялись в азотном криостате JANIS VPF-100 в диапазоне температур 30–300 К.

На рис. 1 приведены нагрузочные вольт-амперные характеристики (НВАХ) НТ солнечных элементов до и после облучения электронами с энергией 1 МэВ при флюенсах $5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{15} \text{ е/см}^2$. Из рис. 1а видно, что электронное облучение существенно влияет на вид НВАХ. При этом значения J_{sc} уменьшаются от 46.75 мА/см^2 ($\Phi = 0 \text{ е/см}^2$) до 34.5 мА/см^2 при увеличении флюенса до $5 \cdot 10^{15} \text{ е/см}^2$. Аналогичные тенденции наблюдаются и для зависимостей $V_{\text{oc}}(\Phi)$ и $\eta(\Phi)$. В исследуемом диапазоне флюенсов значение V_{oc} уменьшается от 0.68 В до 0.57 В (на 16.2 %), а значение η — от 17.2 % до 10.7 %.



На рис. 1. НВАХ НТ СЭ до и после облучения электронами с энергией 1 МэВ при $\Phi=5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{15} \text{ e/cm}^2$.

Известно, что ухудшение выходных параметров солнечных элементов с ростом дозы облучения связано с образованием радиационных дефектов в объёме СЭ, которые играют роль рекомбинационных центров. Эти дефекты отрицательно влияют на время жизни (и, соответственно, длину диффузии) неосновных носителей заряда в базе СЭ, что приводит к снижению выходных параметров солнечных элементов.

Длина диффузии неосновных носителей заряда при облучении высокоэнергетическими частицами изменяется по закону [4]:

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{L_0^2} + K_L \phi, \quad (1)$$

где L_0 и L - соответственно длина диффузии неосновных носителей заряда до и после облучения; K_L - коэффициент радиационного повреждения длины диффузии неосновных носителей заряда; ϕ - доза (флюенс) электронов.

На рис. 2 представлены зависимости длины диффузии (а) и её изменения в виде $\Delta(1/L^2)$ от флюенса электронов. Из рис. 2а видно, что с ростом дозы облучения длина диффузии уменьшается экспоненциально. При этом её значение до облучения электронами составляло $\sim 669.3 \text{ мкм}$.

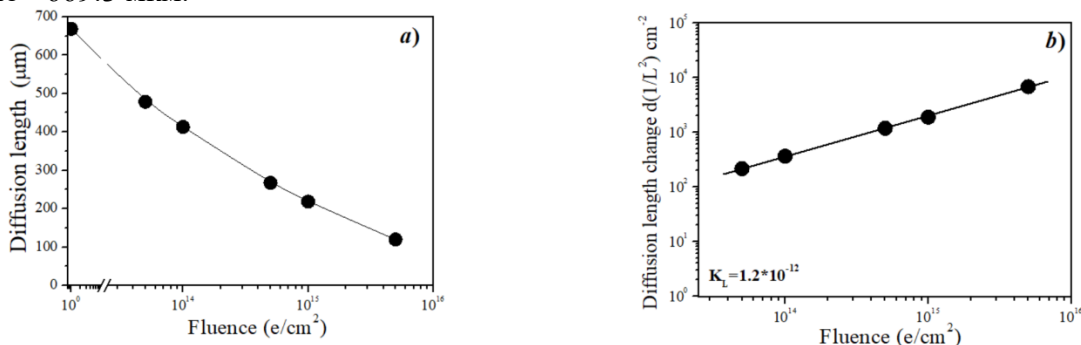


Рис. 2. Зависимости длины диффузии неосновных носителей заряда (а) и её изменения, представленного в виде $\Delta(1/L^2)$, от флюенса электронов с энергией 1 МэВ.

С увеличением дозы облучения значение длины диффузии постепенно уменьшается и достигает 119.6 мкм при $5 \cdot 10^{15} \text{ e/cm}^2$. На основе зависимости $L(\Phi)$, представленной в виде $\Delta(1/L^2)$ от Φ , был рассчитан коэффициент радиационного повреждения $K_L = 1.2 \cdot 10^{-12}$. Полученное значение на порядок меньше, чем для кремниевых солнечных элементов, применяемых в космической технике ($5.6 \cdot 10^{-11}$) [4], что свидетельствует о более высокой радиационной стойкости исследуемых структур и перспективности их применения в космическом пространстве.

На рис. 3 приведена спектральная зависимость внешнего квантового выхода (EQE) НТТ солнечных элементов до (1) и после облучения электронами с энергией 1 МэВ при различных значениях флюенса. Из представленной зависимости видно, что после электронного облучения значения EQE незначительно снижаются, в основном в длинноволновой области спектра электромагнитного излучения.

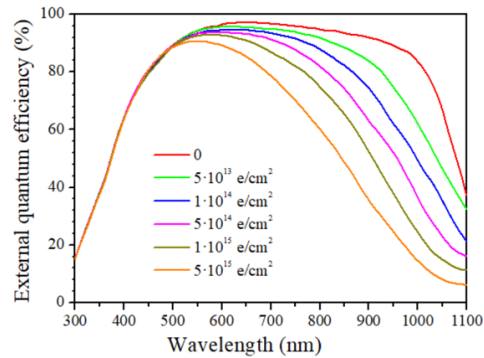


Рис. 3. Спектральная зависимость внешнего квантового выхода НТТ СЭ, до и после облучения электронами с энергией 1 МэВ.

Незначительное падение EQE наблюдается начиная с длин волн около 650 нм и выше. Это указывает на то, что радиационные дефекты преимущественно образуются в объеме кремния. Из рис. 3 также видно, что с увеличением дозы облучения наклон спектральной зависимости EQE, при котором начинается снижение её значения, смещается в коротковолновую область спектра. Это свидетельствует о росте концентрации радиационных дефектов в области, расположенной ближе к р-п-переходу.

$$EQE = \frac{1 + \frac{S}{\alpha D}}{\frac{SL}{D} \sinh\left(\frac{x}{L}\right) + \cosh\left(\frac{x}{L}\right)}, \quad (2)$$

где, EQE – внешний квантовый выход, S – скорость поверхностной рекомбинации, α – коэффициент поглощения, L – диффузионная длина неосновных носителей заряда, x – глубина залегания р-п- перехода.

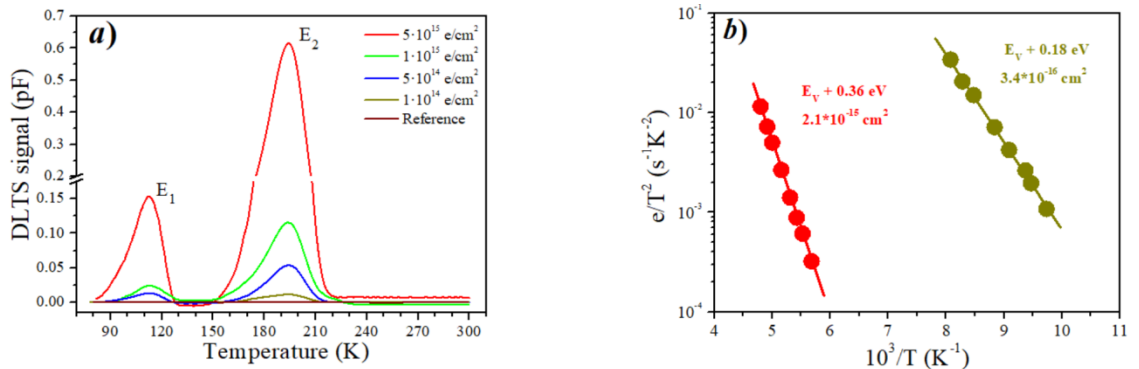


Рис. 4. Спектры DLTS (a) и кривые Аррениуса (b) для НТТ СЭ, облученных электронами с энергией 1 МэВ при $\Phi=5 \cdot 10^{13} - 5 \cdot 10^{15} \text{ e/cm}^2$. Скорость эмиссии – 100 c^{-1} .

Согласно выражению (2), после облучения СЭ электронами увеличивается скорость поверхностной рекомбинации (S), в то время как длина диффузии (L) уменьшается. Образование радиационных дефектов при взаимодействии с высокоэнергетическими частицами приводит к деградации L. В результате эффективность сбора носителей снижается: фотогенерированные носители, образующиеся в глубине подложки (базы), с меньшей вероятностью достигают контактов.

Это вызывает уменьшение значений EQE в длинноволновой области спектра при облучении высокими дозами электронов, что полностью согласуется с выражением (2).

Таким образом, деградация EQE оказывает более значительное влияние на ток короткого замыкания, чем на напряжение холостого хода солнечного элемента.

На рис. 4 показаны спектры DLTS (a) и кривые Аррениуса (b) для НТТ солнечных элементов, облученных электронами с энергией 1 МэВ при различных флюенсах в диапазоне от $5 \cdot 10^{13}$ е/см² до $5 \cdot 10^{15}$ е/см². Как видно из рис. 4, с увеличением дозы облучения в спектрах DLTS появляются два глубоких энергетических уровня (дефекта) в нижней половине запрещенной зоны, возникающие в результате взаимодействия с электронами. Энергии активации этих глубоких уровней и сечения захвата носителей, вычисленные из кривых Аррениуса, составляют для первого глубокого центра (E_1) $E_v+0.18$ эВ, $3.4 \cdot 10^{-16}$ см², а для второго глубокого центра (E_2) $E_v+0.36$ эВ, $2.1 \cdot 10^{-15}$ см². Согласно литературным данным [4], акцепторный уровень с энергетическим положением $E_v+0.36$ эВ связан с комплексом Si–Oi, а уровень с $E_v+0.18$ эВ соответствует дивакансии (V–V).

Литературы:

1. A. U. Rehman, S.H. Lee. Silicon space solar cells: progression and radiation-resistance analysis. Journal of the Korean Physical Society. 68, 593–598. 2016
2. M.A. Green, E.D. Dunlop, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, G. Siefer, X. Hao, J.Y. Jiang. Solar cell efficiency tables (Version 66). Progress in Photovoltaics: Research and applications. 33(7), 795–810, 2025.
3. O.K. Ataboev, Sh.B. Utamuradova, I.E. Panaiotti, E.I. Terukov, D.A. Malevskiy, A.I. Baranov, A.V. Troshin. Temperature dependence of photovoltaic performance of silicon heterojunction solar cells based on gallium- and phosphorous-doped silicon wafers. Radiation Physics and Chemistry. 240, 113407, 2026.
4. M. Yamaguchi. Radiation-resistant solar cells for space use. Solar Energy Materials and Solar Cells. 68(1), 31-53, 2001.

XRD PATTERNS OF THE Ta-Si SYSTEM AT PROTON IRRADIATION

Sh.B. Utamuradova, A.B. Uteniyazova, M.M. Muxammadiyeva, M.H. Fayzullayeva

*Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University
named after Mirzo Ulugbek*

e-mail: aysara.uteniyazova@yahoo.com

Proton radiation damage is an important failure mechanism for electronic devices in near-Earth orbits, deep space and high energy physics facilities [1]. Protons can cause ionizing damage and atomic displacements, resulting in device degradation and malfunction [2]. Shielding of electronics increases the weight and cost of the systems but does not eliminate destructive single events produced by energetic protons. Modern electronics based on semiconductors – even those specially designed for radiation hardness – remain highly susceptible to proton damage. The conversion of semiconducting materials (i.e., the controlled variation of their properties) using beams of light ions, in particular, of protons, has become one the most promising and actively developing physicotechnological methods in recent years. The interest in proton irradiation is caused by the wide and controlled range of the treated depths of the material and by the absence of complex radiation defect clusters with high annealing temperatures.

Proton irradiation influence changes in the properties of semiconductors by three main factors: the formation of new impurities as a result of nuclear reactions, radiation defect formation, and the accumulation of hydrogen atoms. The irradiation of silicon with protons gives rise to primary point radiation defects, i.e., vacancies V and the interstitial silicon atoms Si_i (the Frenkel pairs) related to them; these defects are generated along the ion track as a result of the development of collision cascades that involve the ions and the crystal-lattice atoms [3].

It is known from the literature that radiation defects include, first of all, the complex consisting of interstitial oxygen O_i and vacancy V (A -center), divacancy ($V-V$), and the complex consisting of phosphorus at the lattice site P_s and vacancy V (E -center).

Radiation defects in Ta-Si systems were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) analysis before and after irradiation with 650 keV protons. In the Fig.1. shows of XRD spectres of Ta-Si system.

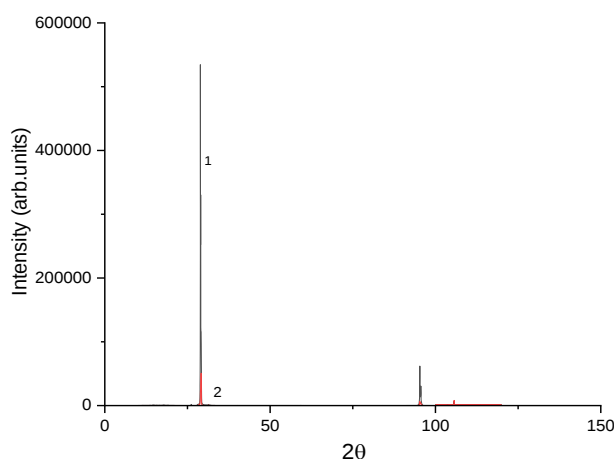


Fig.1. XRD spectres of Ta-Si system (1) and Ta-Si system(2) irradiated by proton

Refractory metal silicides are widely used in the microelectronics industry as interconnects and contacts owing to their low contact resistance and thermal stability, which are produced by the refractory metal–silicon reactive diffusion process in the solid state. Among these silicides, tantalum silicide is important in the microelectronics industry for the use as interconnects and contacts because of thermal stability and low contact resistance [4]. This is produced by reaction-diffusion at the metal-silicon interface in the solid state. Tantalum silicide ($TaSi_2$) is the potential high temperature material and micro-electronic material.

$TaSi_2$ is mainly used as a high-temperature reinforcing material to improve the oxidation resistance, thermal shock resistance, compactness. As so far, the structural stability, mechanical, thermodynamic properties and high temperature oxidation of $TaSi_2$ silicide have also been investigated by experimental and theoretical methods. Experimental and theoretical results indicate that $TaSi_2$ silicide exhibit the brittle behavior [5].

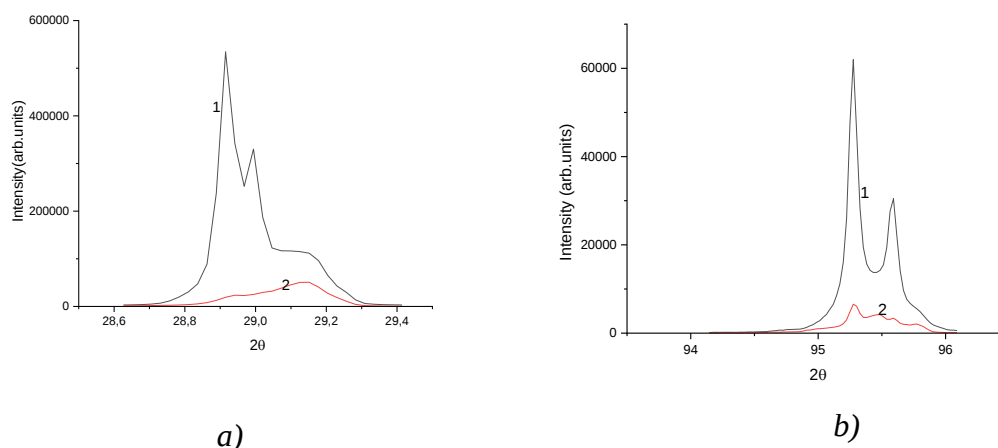


Fig.2. XRD spectres of peaks at $2\theta=28.92$, $2\theta=28.98$, $2\theta=95.29$, $2\theta=95.59$ in the Ta-Si system (1) and peaks at $2\theta=28.94$, $2\theta=29.12$, $2\theta=95.26$, $2\theta=95.47$, $2\theta=95.57$, $2\theta=95.76$ in the Ta-Si system(2) irradiated by proton

The reduction of intensity is an indication of defect productions upon irradiation which creates lattice disturbance. On the other hand, XRD patterns collected by parallel beam geometry (Fig. 2. (a) and (b)) from region reveal the same trend with less prominent variation in the intensity of (110) peaks of the irradiated samples compared with the unirradiated one. This may be attributed to the presence of unirradiated portion in the irradiated samples while taking the XRD data in the parallel beam geometry, as slight variation in thickness might exist among the samples.

References:

1. Ghidini, T. Materials for space exploration and settlement. Nature Materials 17, 846–850 (2018).
2. Xapsos, M. A. et al. Probability model for worst case solar proton event fluences. IEEE Transactions on Nuclear Science 46, 1481–1485 (1999).
3. S. P. Murarka, Silicides for VLSI Applications (Academic Press, New York 1983).
4. Mahmood F., Ahmed H. et.al. J. Appl. Phys. Part 2 – Lett. 30 (1991) p. L1418-L1421.
5. A. Gunes, Katarzyna, M. Edward, Phase stability, microstructure and high-temperature properties of NbSi₂- and TaSi₂-oxide conducting ceramic composites, J. Mater. Sci. 53 (2018) 9958–9977.

МАТЕРИАЛШУНОСЛИК ВА НАНОТЕХНОЛОГИЯЛАРДА ЭГ-2 ЭЛЕКТРОСТАТИК ТЕЗЛАТКИЧИДАН ФОЙДАЛАНИШНИНГ ПЕРСПЕКТИВ ИМКОНИЯТЛАРИ

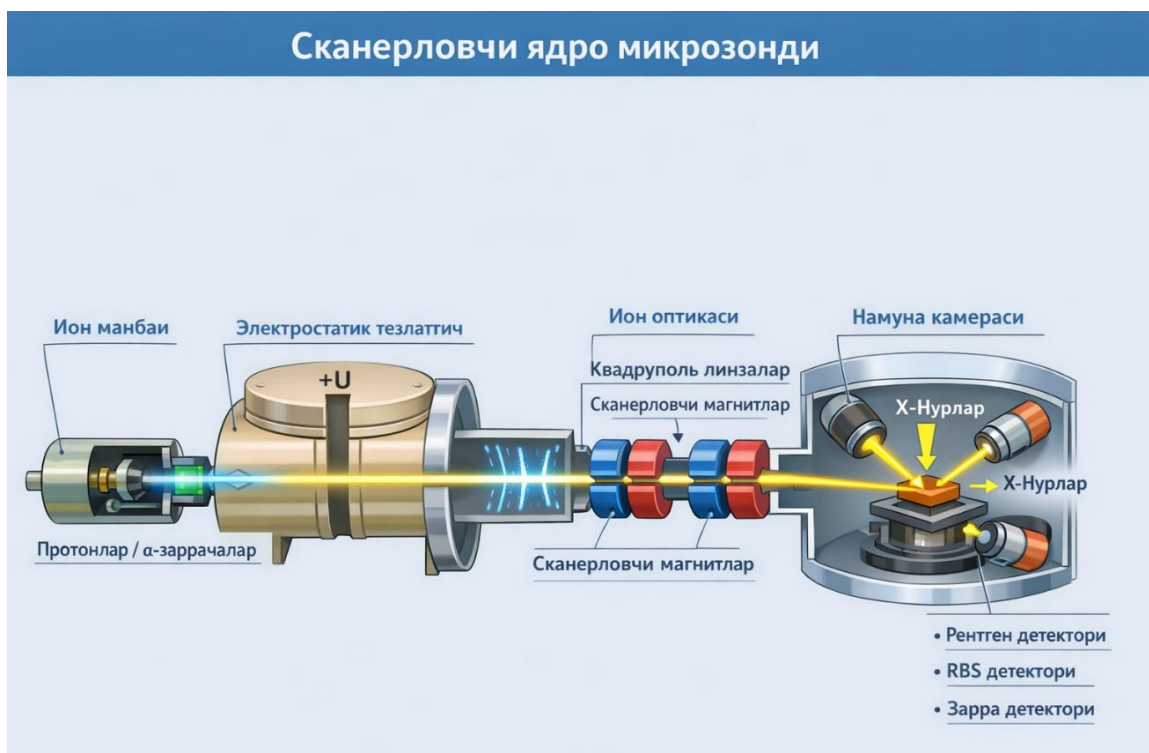
Я.А.Сайдимов, Ф.Б.Умаров

Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий – тадқиқот институти

Наноўлчамли масштабларда структураланган материалларнинг физик ва механик хоссаларини тадқиқ этиш, шунингдек ушбу хоссаларни бошқариш имкониятини ўрганиш наноматериаллар яратиш соҳасида истикболли технологияларни ишлаб чиқишнинг муҳим шартларидан бири ҳисобланади. Замонавий нанотехнологиялар ривожли материалларнинг атом ва наноўлчамдаги тузилишини чуқур ўрганишни, уларнинг таркиби ҳамда физик параметрларини аниқ назорат қилишни талаб этади. Шу сабабли наноматериалларнинг

тузилиши ва элемент таркибини аниқлаш, шунингдек уларни тайёрлаш ва амалий қўллаш жараёнларини самарали бошқариш имконини берувчи янги турдаги илмий асбоб-ускуналарни яратиш долзарб вазифалардан бири ҳисобланади [1].

Бундай асбобларни ишлаб чиқишда қўлланиладиган физик принциплар доираси жуда кенг бўлиб, улар орасида паст ва ўрта энергияли зарядланган заррачаларнинг фокусланган дасталаридан фойдаланиш алоҳида аҳамиятга эга. Фокусланган электрон, ион ёки бошқа зарядланган заррачалар дасталари модданинг наномикёсдаги тузилишини таҳлил қилиш, унинг элемент таркибини аниқлаш ҳамда юза ва ҳажм структурасига локал таъсир кўрсатиш имкониятини беради.



1-расм . Сканерловчи ядро микрозондининг умумий кўриниши.

Маълумки, турли хил зарядланган заррачалар модда билан ўзаро таъсирлашиш хусусиятлари жиҳатидан бир-биридан фарқ қилади. Уларнинг энергияси, массаси ва зарядига боғлиқ равишда қаттиқ фазадаги модда билан ўзаро таъсир механизми ҳам турлича намоён бўлади. Шунинг учун зарядланган заррачалар дасталаридан фойдаланиш материалларнинг структураси ва физик хоссаларини тадқиқ қилишда, шунингдек янги функционал наноматериалларни яратишда муҳим илмий ва амалий аҳамиятга эга.

Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий тадқиқот институтига қарашли, протонлар энергияси 1 МэВ (гелий ионлари учун 2 МэВ) бўлган электростатик тезлаттични принцип жиҳатдан (айрим ўзгартиришлар киритиш ҳисобига) сканерловчи ядро микрозонди сифатида ишлатиш мумкин. Сканерловчи ядро микрозонди (Scanning Nuclear Microprobe) — бу ион дастасини микрон ўлчамгача фокусилаб, намуна юзасини нукта-нукта сканер қилиш орқали модданинг таркиби ва тузилишини таҳлил қилишга хизмат қилади.

Нур дастасининг намуна атомлари ядролари билан ўзаро таъсири натижасида иккиламчи нурланишлар (рентген, гамма нурланиши ва сочилган ионлар) ҳосил бўлади. Ушбу нурланишлар детекторлар ёрдамида қайд этилади ва бу элемент таркибини, уларнинг концентрациясини ҳамда намунадаги тақсимотини юқори сезгирлик билан аниқлаш имконини беради. Ушбу қурилманинг кўриниши 1-расмда келтирилган.

Бизда ишлаётган электростатик тезлатгични микрозондга айлантириш учун қуйидаги қурилмалар бўлиши шарт:

1. Ион оптикиси (квадруполь линзалар)
– дастани 1–5 мкм гача фокуслаш учун.
2. Сканерловчи магнит ёки электростатик система
– дастани намуна бўйлаб х, у-ўқлар бўйича ҳаракатлантириш учун.
3. Детекторлар
 - Si(Li) ёки SDD рентген детектори (PIXE)
 - кремний детектори (RBS)
4. вакуум камераси ва намуна столи

Ҳозирда кўплаб мамлакатларда ушбу қурилмадан кенг фойдаланилмоқда. Масалан: Польшанинг Краков шаҳридаги ЭГ-2 электростатик тезлатгичининг битта канали сканерловчи ядровий микрозонди — сифатида ишлатилмоқда. У Henryk Niewodniczański Institute of Nuclear Physics (IFJ PAN, Краков) да яратилган илмий таҳлил қурилмаси бўлиб, у юқори энергияли протонлар ёки бошқа ионлар дастасини микроўлчамларигача фокусилаб, намуна юзасини сканерлаш орқали модданинг таркибини таҳлил қилиш учун яримўтказгичлар физикаси, биофизика, материалшунослик ва геология соҳаларида кенг қўлланилмоқда.

Адабиётлар:

1. Пономарев А.Г. Применение сфокусированных пучков заряженных частиц низких и средних энергий в нанотехнологиях. Сборник трудов по физике ускорителей и нанотехнологий. Институт прикладной физики Национальной Академии наук Украины г. Сумы, стр.64.

ОБЩИЕ ЭФФЕКТЫ РАДИАЦИОННОГО СИНЕРГИЗМА В НЕЖИВОЙ И ЖИВОЙ ПРИРОДЕ

Ахматова Г.Й.¹, Искадарова Ф.А.³, Иброхимов Р.Р.^{1,2}

Оксенгендлер Б.Л.¹, Сулейманов С.Х.¹, Тураева Н.Н.²

¹Институт материаловедения Академии наук Республики Узбекистан, ул. Чингиза Айтматова, 26, 100084, Ташкент, Узбекистан.

²Университет Вебстер, Сент-Луис, США.

³Центр развития нанотехнологии при Национальном Университете Узбекистана им. М. Улугбека, Ташкент, 100174, Узбекистан

⁴Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, ул. Университетская, 2, 100095, Ташкент, Узбекистан.

Концепция Синергизма (совместное действие) является в последнее время наиболее популярной в науке и технологии взаимодействия радиации с веществом. Примеры этого многообразны, что делает актуальным поиск наиболее общих унифицированных закономерностей Синергизма. Различные эффекты и их трактовка рассмотрены, в частности, для случая двух факторов воздействия (ионизирующей радиации и температуры), причём обсуждается роль изменения их интенсивности. Результаты эксперимента показаны на рис.1, где наблюдаются немонотонные зависимости: при изменении одного фактора воздействия и постоянстве другого: эффект $1 = F_1(T = var, Y = const)$ и эффект $2 = F_2(T = var, Y = const)$

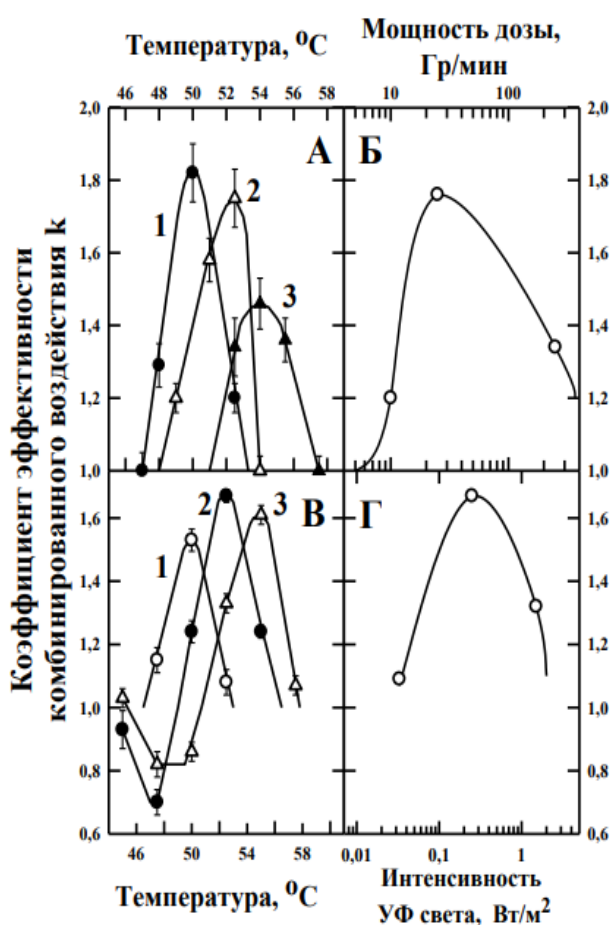


Рис. 1. А, Б: Результаты

одновременного терморadiационного

действия на диплоидные дрожжевые клетки *Saccharomyces cerevisiae*, штамм XS800. А – зависимость коэффициента эффективности комбинированного воздействия k от температуры, при которой происходило облучение, и от мощности дозы ионизирующего излучения; кривые 1 – 10, 2 – 25, 3 – 250 Гр/мин; Б – зависимость коэффициента k от мощности дозы ионизирующего излучения при фиксированной действующей температуре (52,5 °С). В, Г: Результаты одновременного действия ультрафиолетового излучения (254 нм) и гипертермии на диплоидные дрожжевые клетки *Saccharomyces cerevisiae*, штамм XS800. В – зависимость коэффициента k от температуры, при которой происходило облучение: 0,033 (кривая 1), 0,25 (кривая 2) и 1,5 Вт/м² (кривая 3); Г – зависимость коэффициента k от интенсивности УФ-света при постоянной

Для механизма субповреждений диаграмма синергизма, показанная на рис. 2-3, приводит к кинетическим уравнениям (1), где имеется стационарное решение (2):

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = N_0[\alpha_{p1} + \beta_{T1}] + N_2[\beta_{T21}] - N_1 \cdot [\gamma_{от}] \\ \frac{dN_2}{dt} = N_0[\alpha_{p2}] - \beta_{T21}N_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$N_1(t) = \phi[\alpha_{p1}, \alpha_{p2}, \beta_{T1}, \beta_{T2}, \gamma_{от}; N_0] \quad (2)$$

Оно справедливо для убитых клеток (в радиационной биомедицине) — и повреждения молекул (в радиационной физике конденсированных сред – см. формулы (1) и (2)). В этом выражении $\alpha_p, \beta_T, \gamma_{от}$ отражают вероятности (интенсивности) радиационного и теплового факторов воздействия, $\gamma_{от}$ – вероятность отжига повреждений. Для дальнейшего рассмотрения положим $\beta_T = \beta_T^0 \exp\left(-\frac{Q_\beta}{K_T}\right)$; $\gamma_{от} = \gamma_0 \exp\left(-\frac{Q_T}{K_T}\right)$; $\gamma_{от}^* = \gamma_0^* \exp\left(-\frac{Q_\beta}{K_T}\right)$, причем Q_j — энергии активации всех каналов теплового отжига. Очевидно, что при определенном соотношении вышеозначенных величин, можно получить все различные виды кривых представленных на рис.1, в том числе и «горбатых», т.е. – с

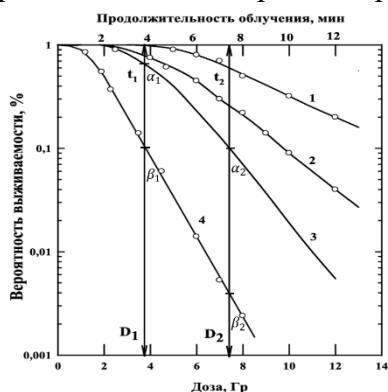


Рис. 2. Пример количественной оценки коэффициента синергетического усиления (пример из радиационной онкологии) [2].

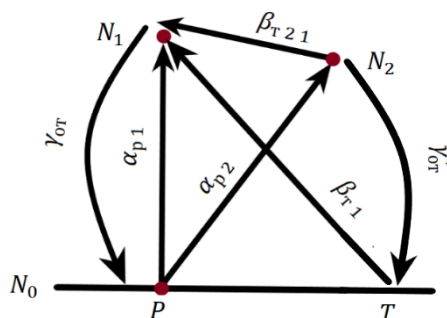
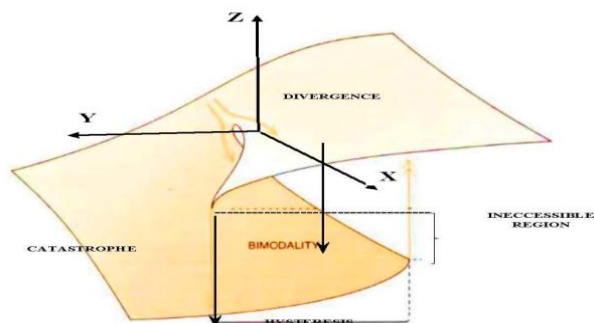


Рис. 3. Схема трех факторного воздействия на раковую опухоль (посравнению с рис.3. здесь добавлен распад состояния N_2 с возвратом в исходное состояние N_0 ; вероятность максимумом.

максимумом.

Кроме метода анализа всех явлений Синергизма (совместного действия) типа указанных на рис. 1, 2 и 3, в рамках диаграммной техники можно выделить еще одно чрезвычайно важное обстоятельство. Здесь «на лицо» нелинейное взаимодействие двух причин (назовем их управляющими параметрами), и имеется еще одна величина – результат (который назовем параметром порядка). Эти наблюдения приводят к мысли использовать в качестве метода моделирования теорию катастроф Рене Тома [3].



Идея применения ТК: сочетание управляющих параметров (X,Y) выделяет области (+) или (-) синергизма для параметра порядка Z.



Rene Thom (1923–2002) — французский математик, создатель теории катастроф. Лауреат медали

В таком случае уравнениям (1) и (2) можно сопоставить топологическую поверхность характерного вида Уитни, получаемую при введении соответствующих переменных X и Y (управляющих параметров) и Z (параметра порядка).

В нашем случае параметр порядка Z отражает величину стационарной концентрации N_1 , а управляющие параметры X и Y отражают роль «интенсивности радиации» и интенсивности тепла температуры. Интересно, что при произвольных величинах X и Y мы получаем ситуацию так называемого неаддитивного взаимодействия радиации и тепла, что особенно важно в связи с идеей соединения «стандартной радиационной физики» с q – деформированной статистической физикой Тцаллиса [2,4]. Большой интерес вызывает вид траектории в пространстве $\{X, Y\}$ двигаясь вдоль которой система демонстрирует свойство аддитивности факторов воздействия

Литература:

1. Евстратова Е.С., Гераскин С.А., Жураковская Г.П., Толкаева М.С., Петин В.Г. Общие закономерности синергических и антагонистических взаимодействий в радиобиологии // Радиация и риск. – 2023. – Т. 32. – № 2. – С. 132–141. DOI: 10.21870/0131-3878-2023-32-2-132-141.
2. Oksengendler B. L., Ashurov M., Suleymanov S., Turaeva N., Iskandarova F., Akhmatova G., Ibrokhimov R. Synergism in radiation effects in condensed matter. Fundamental and application aspects // arXiv:2602.14085 [cond-mat.other]. — 2026. — DOI: 10.48550/arXiv.2602.14085.
3. R. Gilmore, *Catastrophe Theory for Scientists and Engineers* (Dover, New York 1981).
4. Тцаллис К. Динамический сценарий неэкстенсивной статистической механики // Physica A. 2004. Т. 340. С. 1–10.

YEVROPIY KIRISHMA ATOMLARI BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING DIFFUZIYA CHUQURLIGI TADQIQOTI

G‘.H. Mavlonov, J.M. Nazirov

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti professori
[mail:g.mavlonov@tdtu.uz](mailto:g.mavlonov@tdtu.uz)

Zamonaviy elektronika va optoelektronika sohasida kremniy asosidagi materiallar alohida o‘rinda turadi. Kremniy - eng keng tarqalgan yarim o‘tkazgich material bo‘lib, u mikroelektronika sanoatining asosi hisoblanadi. So‘nggi yillarda kremniyga nodir yer elementlarini (NYE) aralashitirish orqali yangi xususiyatlarga ega bo‘lgan materiallar olish dunyo olimlarida katta qiziqish uyg‘otmoqda[1].

Tadqiqotda n-tipdagi, solishtirma qarshiligi $60-100 \Omega \times \text{sm}$ bo‘lgan monokristall kremniy namunalardan foydalanildi. Yevropiy atomlarining kremniyga diffuziya jarayoni kvars trubali ampulalarda yuqori vakuumli muhit hosil qilinib, diffuziya Magnetic MG17-60/300 elektr pechida 1-jadvalda keltirilgan parametrlar asosida o‘tkazildi. Diffuziya parametrlari quyidagi jadvalda keltirib o‘tilgan.

1-jadval

Parametr	1-holat	2-holat	3-holat
Temperatura	1000°C	1100°C	1200°C
Vaqt	6 soat	10 soat	14 soat
Muhit	Vakuum (10^{-5} Pa)	Vakuum (10^{-5} Pa)	Vakuum (10^{-5} Pa)

Har bir temperatura rejimi uchun 3 ta namuna tayyorlandi. Diffuziya jarayonidan so'ng namunalar bosqichma-bosqich sovutish usuli bilan sovutildi. Sovutish tezligi 5°C/min ni tashkil etdi.

Harorat diapazoni 1000-1200 °C gacha, vaqt intervali esa 6 dan 14 soatgacha belgilab olinib, Yevropiy atomlarining kremniy ichiga kirib borish chuqurligi Fikning ikkinchi qonuni asosida hisoblandi. Eksperimental ma'lumotlar shuni ko'rsatadiki, *Eu* atomlarining diffuziyasi jarayoni kutilganidan ko'ra sekinroq kechadi. Bu holat *Eu* atomlarining katta atom radiusi tufayli panjara tugunlari orasida emas, balki asosan vakansiyalar orqali harakatlanishi bilan izohlanadi. Kremniyda diffuziya jarayonlari quyidagi omillarga bog'liq bo'lib bunda Temperatura - diffuziya jarayonining eng muhim parametri biri hisoblanadi harorat oshishi diffuziya koeffitsientining eksponensial oshishiga olib keladi[2]. Diffuziya chuqurligini aniqlashda muhim kattaliklardan biri bu diffuziya koeffitsiyenti (*D*) bo'lib diffuziya koeffitsiyentini Arrenius tenglamasiga ko'ra hisoblash mumkin:

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right) \quad \text{yoki} \quad D = D_0 \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}}$$

Bu yerda D_0 – harakatchanlik koeffitsiyenti $5 \times 10^{-3} \text{sm}^2/\text{s}$ E_a - aktivlanish energiyasi bo'lib, u yevropiy uchun taxminan 2.8 - 3.4eV ni tashkil etdi. Bu yuqori energiya yevropiyning kremniy panjarasida “og'ir” kirishma ekanligini tasdiqlaydi. Diffuziya koeffitsiyenti diffuziya chuqurligini aniqlashdagi asosiy omillardan biri hisoblanib quyidagi formulaga asoslangan holda aniqlashimiz mumkin[3]

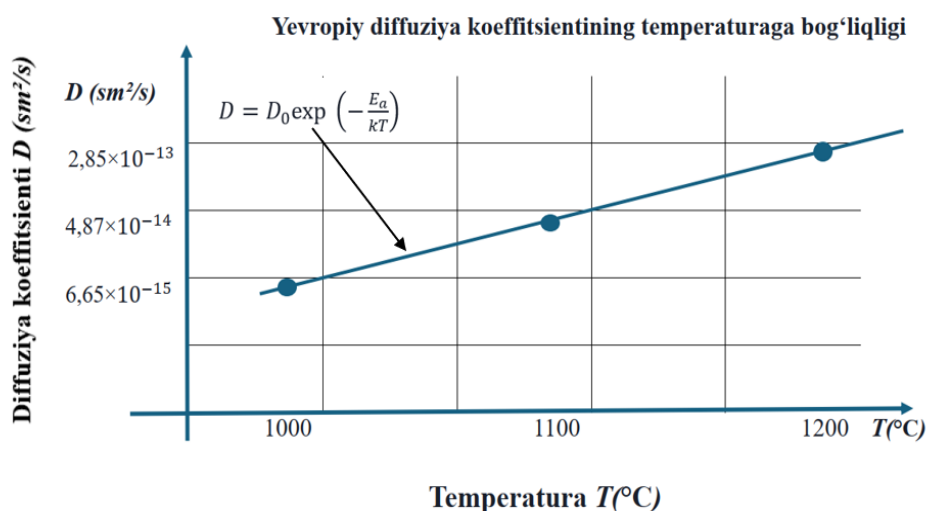
$$x = 2\sqrt{Dt}$$

Bu yerda:

D - diffuziya koeffitsiyenti;

t - diffuziya vaqti

Tadqiqot natijalariga ko'ra, (2-jadval) yevropiy atomlarining kremniydagi diffuziya koeffitsientlari temperaturaga hamda diffuziya chuqurligi diffuziya koeffitsienti va diffuziya



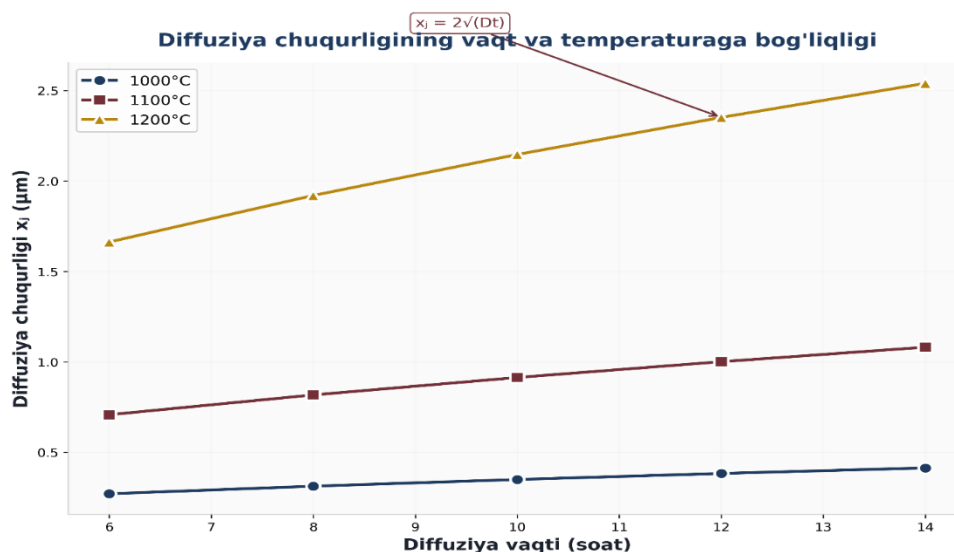
vaqtiga bog'liqligini ko'rsatdi. Quyidagi jadvalda har xil temperaturalarda olingan diffuziya koeffitsientlari va chuqurligi keltirilgan:

1-rasm: Diffuziya koeffitsientini temperaturaga bog'liqligi

2-jadval

Temperatura, °C	Vaqt, soat	D, sm ² /s	x, µm
1000	6	$6,65 \times 10^{-15}$	0.24
1100	10	$4,87 \times 10^{-14}$	0.837
1200	14	$2,85 \times 10^{-13}$	3.45

2-jadvaldagi qiymatlar asosida diffuziya koeffitsientini temperaturaga bog'liqligi hamda diffuziya vaqtining diffuziya chuqurligiga bog'liqlik grafigini tasvirlasak quydagi ko'rinishda aks etadi.



2-rasm: Diffuziya chuqurligining vaqt va temperaturaga bog'liqlik grafigi

Tadqiqot davomida kremniy kristall panjarasiga kiritilgan yevropiy atomlarining harorat va vaqt omillariga bog'liq ravishda diffuziyaning xususiyatlari tahlil qilindi. Tadqiqot natijalar shuni ko'rsatdiki, diffuziya jarayoni asosan issiqlik ta'sirida faollashadi hamda harorat oshishi bilan yevropiy atomlarining kremniy ichkarisiga kirib borish chuqurligi ortadi.

Tajriba va nazariy hisob-kitoblar asosida diffuziya jarayonining asosiy qonuniyatlari aniqlanib, kremniyda yevropiy atomlarining taqsimlanish holati baholandi. Shuningdek, diffuziya chuqurligi vaqt davomiyligi va legirlash sharoitlariga sezilarli darajada bog'liq ekanligi aniqlandi. Olingan natijalar yarimo'tkazgich materiallarning fizik xossalarini boshqarishda hamda optoelektronika va mikroelektronika qurilmalarini yaratishda muhim ahamiyatga ega. Shu bilan birga, yevropiy bilan legirlangan kremniy materiallari yangi turdagi funksional yarimo'tkazgichlar ishlab chiqishda istiqbolli material sifatida qaralishi mumkin. Tadqiqot natijalari kelajakda yarimo'tkazgich texnologiyalarini rivojlantirish, xususan, yuqori samarali elektron va optoelektron qurilmalar yaratish uchun ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar:

1. N.F.Zikrillayev, G.H.Mavlonov, L. Trabzon, S.B.Isamov, Y.A. Abduganiev, Sh.N. Ibodullaev, G.A. Kushiev. Magnetic Properties of Silicon Doped with Impurity Atoms of Europium. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(6\).06001](https://doi.org/10.21272/jnep.15(6).06001)
2. Hussein Fneich, Nathalie Gaumer, Stéphane Chaussedent, Wilfried Blanc, Ahmad Mehdi: Europium-Doped Sol-Gel SiO₂-Based Glasses: Effect of the Europium Source and Content,

Magnesium Addition and Thermal Treatment on Their Photoluminescence Properties.
<https://doi.org/10.3390/molecules23071768>

3. S.S. Dwaraknath, G.S. Was: The diffusion of cesium, strontium, and europium in silicon carbide: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.04.034>

4. Fahmida Azmi*, Brahim Ahammou, Optical and Mechanical Properties of Europium-Doped Silicon Nitride Thin Films Deposited by ECR-PECVD with Magnetron Sputtering. DOI 10.1149/2162-8777/adc23e

К ПРОБЛЕМЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАДИАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ СИСТЕМ С ВЫСОКОЙ ЭНТРОПИЕЙ

Азимов¹ Ж.Т., Тураева² Н.Н., Оксенгендлер³ Б.Л.

¹*Кафедра естественных дисциплин, Университет военной безопасности и обороны Узбекистана. г. Ташкент, Мирзо-Улугбекский район, ул. Паркент, 2.*

²*Department of Biological Sciences, Webster University, St. Louis, MO, US*

³*Институт Материаловедения Академии Наук РУз. г. Ташкент, ул. Бодомзор йули 2Б*

Все объекты современной твердотельной электроники, функционирующие в сложных реакционных условиях, подвергаются деградации, выходя при этом за предел («красные линии») возможных диверсий (см. [1]). Поэтому появление объектов нового типа вызывает необходимость обязательного изучения радиационной деградации (особенно, в условиях космического облучения). Все сказанное относится и к средам с высокой энтропией [2]. Отмечая ряд работ в этой области, нельзя не заметить отсутствие фундаментальных идей, а с этим – и фундаментальных подходов в этой области. Вмести с тем, такая возможно присутствует, что и обсуждается ниже.

Выделим некоторые фундаментальные элементы в этой области.

1. Можно предположить, что базовым понятием объекта с повышенной энтропией является целостность (по какому-то выбранному свойству) для всего объекта.
2. Свойства высоко энтропийных объектов должны быть в меру изменяющимися при радиационном воздействии, определяемыми необходимыми соотношениями порядка и беспорядка [3].
3. Высокая энтропия объектов может быть уподоблена большой инертной массе тяжёлых объектов с реакцией на внешние воздействия, описываемые динамикой Ньютона, и информационной динамикой Шеннона, причем они должны имеют близкую интерпретацию [4].
4. При построении микроскопической теории радиационных эффектов, необходимо учитывать 5 типов радиационно-стимулированных процессов: дефектообразование, радиационно-стимулированную диффузию, квазихимические реакции с дефектами различного масштаба и размерности (дислокации и границы раздела) [5].
5. Эти процессы описываются вероятностными методами и дают коэффициенты соответствующих радиационно-стимулированных процессов атомных перестроек [6].
6. Полученные коэффициенты используются для записи кинетических уравнений (по схеме Плацмана-Стародубцева) [7].

7. Исходя из глубокой аналогии радиационного отклика живой и неживой Природы (и те, и другие относятся к Сложным системам), можно уподобить радиационную стойкостью неживой и живой Природы (со сложной структурой) адаптационным процессам в живых системах, т.е. полезно провести аналогию между «деградацией» и «болезнью» [8].

Очень важен вопрос о физической причине, с помощью которой достигается целостность в поведении системы (принцип фон – Берталанфи). В обсуждаемом случае сплава из множества различных химических элементов, логично (видимо) использовать идеи протекания в сочетании с моделью Ф.Андерсона [9]. В этом случае деградация представляет собой нарушение процесса протекания или получение в модели Андерсона корреляционной длины, меньше характерного размера неупорядоченной цепочки Андерсона. По – видимому, в случае многофакторного воздействия радиации может оказаться полезной концепция радиационного Синергизма [10].

Заключение мы хотели бы отметить следующее важное обстоятельство: во многих работах при обсуждении стабильности структур систем с высокой энтропией используются идеи Больцмана – Гиббса, которые справедливы лишь для равновесных систем. Как показывает литература, однако, в подавляющем числе ситуаций технология получения высоко энтропийных систем реализуется в неравновесных и даже сильно неравновесных условиях (причем в открытых системах!), когда может быть использована либо термодинамика Онзагера и даже синергетика Пригожина – Хакена [11].

Далее, скорость «релаксации» условий технологий на столько велика, а скорость релаксации параметров среды отнюдь не обязательно экспоненциально (во времени), а степенная (ибо система относится к категории Complexity), то вся система полна метастабильных состояний, и её, возможно, следует описывать в рамках подхода q-деформированной статистики Тсаллиса [12].

Таким образом, наука о деградации (особенно, радиационной) весьма богата идеями и результатами, но совсем непроста.

Литература:

1. Винетский В.Л., Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. – Киев, Наукова Думка 1979. 350 с.
2. Ashritha Salian, Pradyut Sengupta, Iteesha Wishalakshi Aswath et al. Int J. Appl CeramTechnol. 2023; P. 1-26.
3. Jiasheng Wang, Jianzhong Jiang, Peter K. Liaw. et al. Metals 2025, 15, 632 с.
4. Николис Дж. Динамика иерархических систем. Перевод с английского Ю.А. Данилова – М.: Издательство «МИР». 1989. 510 с.
5. Оксенгендлер Б.Л., Тураева Н.Н. Радиационная физика низких температур: Концепции и эффекты, часть 1, Препринт ИЯФ АН РУз, Ташкент. 1992. Р-9-567.
6. Юнусов М.С., Махмудов А.Ш., Оксенгендлер Б.Л. и др. Элементарные атомные процессы и электронная структура дефектов в полупроводниках. – Ташкент. Фан. 1986. 176 с.
7. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 448 с.
8. Климонтович Ю.Л. Энтропия и информация открытых систем. Журн. Успехи физических наук. Апрель 1999. Том. 169, №4.
9. Anderson P.W. Absence of diffusion in certain random lattice. – Phys. Rev., 1958. v. 109. P. 1492.

10. Oksengendler B.L. Ashurov M.X., Suleymanov S.X. et al. Концепция “complexity” в радиационной физике и технологии. Материалы международной научной конференции «Новые материалы и технологии». Ташкент. 15-16 май. 2023. С. 17-18.
11. Николис Г, Пригожин И.Р. Самоорганизация в неравновесных системах. Перевод с английского канд. хим. наук В.Ф. Пастушенко. Под редакцией доктора хим. наук Ю.А. Чизмадзе. – М.: Издательство «МИР». 1979. 510 с.
12. Олемской А.И. Синергетика сложных систем. – М.: ЛЕНАНД, 2022. – 384 с.

VI ШЎБА. КОНДЕНСАЦИЯЛАНГАН МУҲИТЛАР ФИЗИКАСИ

G'OVAKLI KREMNIY MORFOLOGIYASINI BOSHQARISHNING
ELEKTROKIMYOVIY USULLARI

**A.T. Mamadalimov, N.K. Hakimova, D.E. Xazratov, M.S. Ismatova,
D.A. Azimova, N.A. Qushboqov.**

*Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar
fizikasi va mikroelektronika ilmiy tadqiqod instituti*

xazratovdilshod323@gmail.com

So'nggi yillarda yarim o'tkazgichli materiallar texnologiyasida g'ovakli kremniy muhim ahamiyat kasb etmoqda. Uning katta ichki sirt maydoni, optik va elektr xususiyatlarini boshqarish imkoniyati uni sensorlar, nanoelektronika, fotonika hamda biotibbiyot sohalarida istiqbolli materialga aylantirmoqda. G'ovakli kremniy – bu monokristalli kremniydan tashkil topgan, gubkasimon tuzilishga ega modda bo'lib, u tasodifan kashf etilgan bo'lsada, tez orada eng ko'p o'rganilgan kremniy strukturalaridan biriga aylangan. 1956-yilda g'ovak kremniy kashf etilganidan beri, g'ovak kremniy tuzilmalarini tayyorlash uchun 20 dan ortiq usul ishlab chiqilgan. Ushbu usullar ikki asosiy toifaga bo'linadi: yuqoridan-pastga va pastdan-yuqoriga yo'nalgan struktura bo'yicha olinadi. Yuqoridan-pastga yondashuvda, monokristall kremniy plastinasining klasterlari olib tashlanib, deyarli mukammal kristall tuzilmasida bo'shliqlar hosil qilinadi va bu orqali g'ovak tuzilma shakllantiriladi. Bu yondashuv kremniy plastinkasidan atomlarni kimyoviy yoki fizik usullar bilan olib tashlashga asoslanadi. Natijada, kremniy asosidagi g'ovakli kremniy qatlami olinadi. Aksincha, pastdan-yuqoriga yondashuvda kremniy klasterlarini shunday tarzda birlashtirishga asoslanadiki, kristall tuzilmani hosil qilgan holda, oraliqda bo'sh joylar qoldiriladi va natijada g'ovak tuzilma sintez qilinadi. Bu yondashuvlar odatda g'ovakli kremniy kukunlarini hosil qiladi [1-4].

Metod va natijalar: G'ovak kremniy tuzilmalari, boshqa g'ovak materiallar singari, asosan g'ovak o'lchamlariga qarab tasniflanadi. G'ovak o'lchami 2 nanometrdan kichik bo'lgan tuzilmalar mikrog'ovak kremniy, 50 nanometrdan katta bo'lganlari esa makrog'ovak kremniy deb ataladi; bu oraliqda joylashgan tuzilmalar esa mezog'ovak kremniy deb yuritiladi. G'ovak diametri, shakli, yo'nalishi, tarmoqlanishi, o'zaro bog'liqligi va taqsimoti kabi juda keng o'zgaruvchan xususiyatlar tufayli, morfologiya bu materialning eng kam miqdoriy baholanadigan jihatlaridan biridir [5]. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, anodik o'yish jarayonida qo'llanilgan tok zichligi, o'yish vaqti hamda elektrolit tarkibi g'ovakli kremniy qatlamining morfologik xususiyatlariga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi [6]. Tok zichligi oshirilgan sari hosil bo'lgan g'ovaklarning diametri va chuqurligi ortdi. Jumladan, 20 mA/sm² tok zichligida olingan namunalarda sirtida mayda va zich g'ovaklar (diametri ~200 nm) kuzatilgan bo'lsa, 40 mA/sm² holatida bu g'ovaklar diametri 500–700 nm gacha yetdi. Biroq, tok zichligi haddan tashqari oshirilganda (50 mA/sm² va yuqoriroq) g'ovaklarning strukturasida buzilishlar – notekis kengayishlar va bir-biriga qo'shib ketgan g'ovaklar kuzatiladi. O'yish vaqti oshgan sayin g'ovaklar chuqurlashdi va qatlamning umumiy qalinligi ortadi. 10 daqiqa davom etgan o'yishdan keyin hosil bo'lgan qatlamning qalinligi taxminan 3–5 mkmni tashkil etgan bo'lsa, 30 daqiqalik o'yish natijasida u 15 mkm gacha yetadi. Shuningdek, o'yish vaqti ortishi bilan g'ovaklarning yuqori qatlamga nisbatan chuqur qatlamlarida bir tekislik darajasi pasaydi. Elektrolit tarkibiga kiritilgan etanol

g'ovaklarning tartibli va silliq shakllanishiga ijobiy ta'sir ko'rsatdi. Etanol ishtirokisiz o'tkazilgan tajribalarda g'ovaklar notekis, deformatsiyalangan va ko'p hollarda yopiq shaklda hosil bo'ldi. Optik yordamida olingan tasvirlar asosida qatlamning tuzilmasi modellashirildi. G'ovaklarning silindrsimon va konussimon shakllari, ularning bir jinsliliqi, oraliq masofa va yo'nalishdagi o'zgarishlar aniqlanib, texnologik parametrlar bilan bog'liq ravishda grafiklarda ifodalandi.

Xulosa. Ushbu natijalar shuni ko'rsatadiki, anodik o'yish parametrlarini sinchkovlik bilan boshqarish orqali maqsadli morfologik xususiyatlarga ega g'ovakli kremniy qatlamlarini olish mumkin. Bu esa uni optoelektronika, sensorlar va biotibbiyot sohalarda amaliy qo'llash uchun zarur texnologik asos bo'lib xizmat qiladi. Olib borilgan eksperimentlar natijasida g'ovaklarning diametri, chuqurligi va qatlamning bir jinsliliqi kabi muhim morfologik ko'rsatkichlarni aniq boshqarish imkonini beruvchi optimal texnologik rejimlar aniqlandi. Tadqiqot yakunida olingan ma'lumotlar asosida g'ovakli kremniy hosil qilish jarayonini barqarorlashtirish hamda ushbu usulni sanoat ishlab chiqarishiga tatbiq etish bo'yicha zaruriy texnologik tavsiyalar ishlab chiqilgan.

Adabiyotlar:

1. Zhang, G. X. (2006). Porous silicon: morphology and formation mechanisms. In *Modern aspects of electrochemistry* (pp. 65–133). https://doi.org/10.1007/978-0-387-31701-4_2
2. A.T. Mamadalimov, D.E. Xazratov. (2025). "G'ovakli kremniyning strukturaviy, elektr va optik tavsiflari" Fanlar akademiyasi ma'ruzalari №5, 48-53 bet.
3. Santos, A., & Kumeria, T. (2015). Electrochemical etching methods for producing porous silicon. In *Springer series in materials science* (pp. 1–36). https://doi.org/10.1007/978-3-319-20346-1_1
4. Losic, D., & Santos, A. (2015). Electrochemically engineered nanoporous materials. In *Springer series in materials science*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20346-1>
5. Lytovchenko, V. (2017). Preparation and study of porous Si surfaces obtained using the electrochemical method. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*, 20(4), 385–395. <https://doi.org/10.15407/spqeo20.04.385>
6. Smith, R. L., & Collins, S. D. (1992). Porous silicon formation mechanisms. *Journal of Applied Physics*, 71(8), R1–R22. <https://doi.org/10.1063/1.350839>

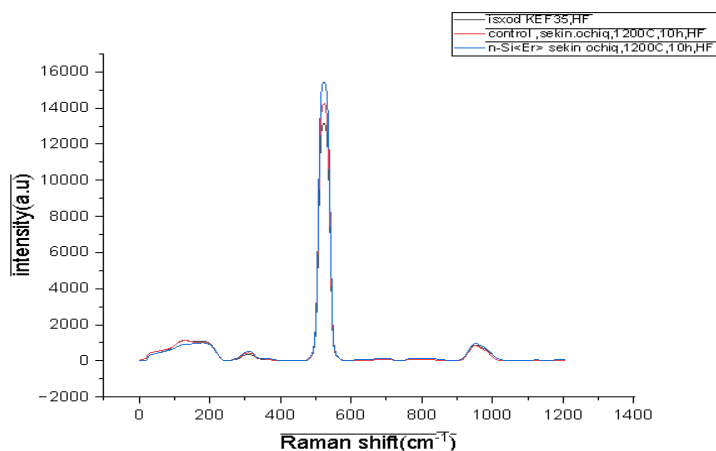
ERBIY BILAN LEGIRLANGAN KREMNIYNING RAMAN SPEKTROSKOPIK XUSUSIYATLARINI TADQIQ QILISH

J.J. Hamdamov, B.Sh. Aliqulov, M.U. Erkinov.

O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yyarimo 'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy – tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston
e-mail: mirzadavlat5711@gmail.com

Erbii (Er) bilan legirlangan kremniy (Si) kristallarining Raman spektroskopik tahlili tadqiq qilindi. Tadqiqotning maqsadi legirlash jarayonining kremniy kristall panjarasi tebranish ta'sirini aniqlashdan iborat. Namunalar yuqori harorat 1200 C da termik ishlov berilgandan so'ng Raman spektroskopiya usuli yordamida tahlil qilindi. Olingan spektrlarda 520 cm⁻¹ atrofidagi asosiy optik fonon cho'qqisining siljishi va kengayishi kuzatildi. Bu holat kristall panjarada strukturaviy

nuqsonlar yuzaga kelganini ko'rsatadi. Natijalar erbiy bilan legirlangan kremniy asosidagi optoelektron materiallarning fizik xossalarini yaxshilash va infraqizil diapazonda ishlovchi qurilmalar yaratishda muhim ahamiyat kasb etadi.



1-rasm Erbiy bilan legirlangan Si kremniyning Raman spektri

Kremniy asosidagi materiallar zamonaviy mikroelektronika va fotonika sohalarida asosiy konstruktiv materiallardan biri hisoblanadi. So'nggi yillarda nodir yer elementlari, xususan Erbiy bilan legirlangan Kremniy tizimlari infraqizil diapazondagi ($\lambda \approx 1.54 \mu\text{m}$) nurlanish xossalari sababli katta ilmiy qiziqish uyg'otmoqda. Er^{3+} ionlarining kremniy panjarasiga kristall struktura, fonon spektri sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Shu sababli mazkur tizimning tebranish xususiyatlarini Raman spektroskopiya usuli yordamida tadqiq qilish dolzarb masala hisoblanadi[1-2].

Raman spektr tahlili natijasida barcha namunalarda 520 cm^{-1} atrofida joylashgan birinchi tartibli optik fonon tebranishi kuzatildi. Legirlanmagan kremniyda ushbu cho'qqi yuqori intensivlikka ega bo'lib, kristall tuzilmaning yuqori darajadagi mukammalligini ko'rsatadi.

Erbii bilan legirlangan namunalarda 520 cm^{-1} cho'qqining kichik chastotaviy siljishi hamda spektral kengayishi qayd etildi. Cho'qqining yuqoriga o'sishi kristall panjarada nuqsonlarni kamayishi bilan birga kristall pajara yaxshilanganligini ko'rish mumkin, pastga siljishi esa kiritilayotgan namunaning hisobiga kristall panjarada buzilishlar, nuqsonlar va dislokatsiyalarni ortishini ko'rishimiz mumkin. Spektral chiziqning kengayishi esa kristall panjarada nuqsonlar konsentratsiyasining ortishi va amorf qatlamlar oshganini bildiradi. $150\text{--}300 \text{ cm}^{-1}$ sohada kuzatilgan qo'shimcha past intensivlikdagi tebranish legirlash natijasida hosil bo'lgan lokal tebranish markazlari yoki Er-Si komplekslarining mavjudligi bilan bog'liq bo'lishi mumkin. $900\text{--}1000 \text{ cm}^{-1}$ oralig'idagi keng signal esa ikkilamchi (ikki-fononli) jarayonlar yoki kislorod bilan bog'liq tebranishi izohlanadi.[2-3]

Xulosa

Raman spektrida, erbiy bilan legirlangan kremniy namunasi yuqori kristallikka ega bo'lib, asosiy Raman cho'qqi $\approx 520 \text{ cm}^{-1}$ orqali monokristall kremniyning xususiyatlarini saqlab qolgan. Kirishmaning joylashuvi va lokal tebranishlar orqali spektrda kichik farqlar hosil qilsa-da, umumiy kristallik va Si tarmog'ining strukturasi sezilarli ta'sir ko'rsatmaydi. Past va yuqori to'lqin sonlaridagi cho'qqilar yuzadagi oksid qatlamlari va nuqsonlar bilan izohlanadi. Natijalar erbiy qo'shilgan kremniy materialining elektronika va fotonik qurilmalarda qo'llanilishi uchun yuqori sifat va barqaror kristall tuzilishini namoyon etadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. Kh.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, O.A. Bozorova, and Sh.Kh. Daliev, "Joint effect of Ni and Gf impurity atoms on the silicon solar cell photosensitivity," Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika), 41(1), 80–81 (2005).
2. K.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, A. Khaitbaev, J.J. Khamdamov, Sh.B. Norkulov, and M.B. Bekmuratov, "Defective Structure of Silicon Doped with Dysprosium," East Eur. J. Phys. (2), 283 (2024). <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-30>
3. X. Kong, Z. Xi, L. Wang, Y. Zhou, Y. Liu, et al., "Recent Progress in Silicon–Based Materials for Performance Enhanced Lithium Ion Batteries," Molecules, 28(5), 2079 (2023). <https://doi.org/10.3390/molecules28052079>

KIMYOVIY MODIFIKATSIYA QILINGAN BIOMATERIALNING VOLT-AMPER XARAKTERISTIKASI VA FOTOOTKAZUVCHANLIK KINETIKASINI TADQIQ QILISH

**A.T. Mamadalimov, N.K. Xakimova, D.E. Xazratov, M.S. Ismatova,
N.A. Qushboqov, D.A. Azimova.**

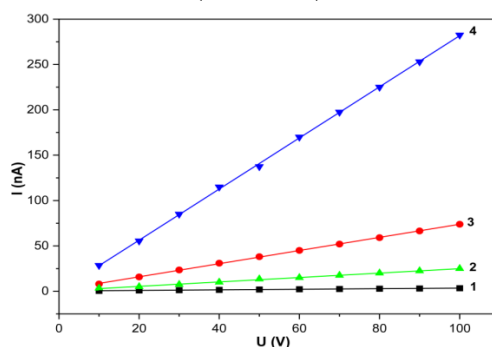
Mirzo Ulugʻbek nomidagi Oʻzbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimoʻtkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy - tadqiqod instituti
ismatovamoxida@gmail.com

Yarimoʻtkazgichlar sohasida biomateriallar asosidagi funksional materiallarga boʻlgan qiziqish sezilarli darajada ortib bormoqda. Biomateriallar ekologik xavfsizligi, arzonligi va qayta tiklanish xususiyatlari bilan ajralib turadi [1]. Ayniqsa, lignosellyuloza asosidagi biomateriallar (yongʻoq, oʻrik va pista qobiqlari, xurmo danagi, oʻsimlik tolalari va boshqalar) elektr va fizik-kimyoviy xossalari tufayli zamonaviy materialshunoslikda istiqbolli yoʻnalish sifatida qaralmoqda [2]. Shu bilan birga, biomateriallarning elektr va fotoelektr xossalarini oʻrganish zamonaviy sensor texnologiyalari hamda optoelektron qurilmalar yaratishda muhim ahamiyat kasb etadi [3]. Dastlabki holatda biomateriallarning elektroʻtkazuvchanligi past boʻlib, bu ularning amaliy qoʻllanilishini cheklaydi. Elektroʻtkazuvchanlikning pastligi asosan ularning keng taqiqlangan zona (Eg) qiymati va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi bilan izohlanadi [4]. Shu sababli, kimyoviy modifikatsiya va legirlash usullari orqali biomateriallarning energetik sathlarini oʻzgartirish, yaʼni nuqson sathlarini hosil qilish dolzarb ilmiy masalalardan biri hisoblanadi [5]. Turli ionli eritmalar (metall tuzlari, oksidlovchilar, galogenlar) bilan ishlov berish biomateriallarning elektr oʻtkazuvchanligi va fotooʻtkazuvchanligini sezilarli darajada oshirishi mumkinligi adabiyotlarda qayd etilgan [6]. Adabiyotlardan koʻrish mumkinki biomateriallarning elektr xossalari yetarli darajada oʻrganilmagan. Ushbu ishda yongʻoq qobigʻi asosidagi biomaterialni kimyoviy modifikatsiya qilish va uning elektr xossalarini yaʼni, volt-ampere xarakteristikasini, fotooʻtkazuvchanlik kinetikasini oʻrganish maqsad qilingan. Tadqiqotda legirlanmagan hamda ZnSO₄ 2% li eritmasi, yodning 5% li eritmasi va KMnO₄ 2% li eritmaları yordamida legirlangan namunalar tayyorlandi. Tayyor namunalardan omik kontaktlar olindi. Buning uchun mis sim va suyuq shisha bilan grafit kukunidan elektroʻtkazuvchi elim tayyorlandi. Bu yongʻoq qobigʻi asosidagi biomaterialdan yangi funksional yarimoʻtkazgich materiallar yaratish imkoniyatlarini namoyon etadi.

Ushbu tadqiqot ishida legirlanmagan hamda kimyoviy eritmaları bilan legirlangan yong‘oq qobig‘i namunalari tanlab olindi. Namunalar mexanik va termik ishlovlardan o‘tkazildi. Ya‘ni, yong‘oq qobig‘i 1mm qalinlikda $3 \times 4 \text{ mm}^2$ o‘lchamda tayyorlandi va distillangan suvda 30 min. davomida qaynatilib so‘ng, xona temperaturasida quritildi. Bu jarayon namunalar tarkibidagi ortiqcha organik va eruvchan moddalarni chiqarib tashlash maqsadida bajarildi.

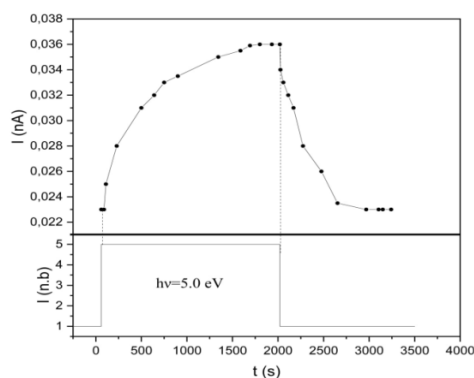
Qurilgan namunalar kimyoviy modifikatsiya qilish maqsadida ZnSO_4 2% li eritmasi, yodning 5% li eritmasi yoki KMnO_4 2% li eritmalariga, 30 daqiqa davomida shimdirildi. Shimdirilgan namunalar termik ishlov berish uchun termopechga joylashtirildi va 80°C haroratda 5 soat davomida diffuziya jarayoni amalga oshirildi. Termik diffuziya jarayonida legirlovchi moddalar biomaterial tarkibiga kirib borishi ta‘minlandi. Keyingi bosqichda namunalar yuzasida elektr o‘lchovlar olib borish uchun omik kontaktlar hosil qilindi. Buning uchun mis sim va suyuq shisha bilan grafit kukunidan foydalanildi. Dastlab suyuq shishaga grafit kukuni qo‘shib aralashtirilib elektro‘tkazuvchi yelim tayyorlandi va mis sim yordamida omik kontakt hosil qilindi. Tayyorlangan namunalar asosida volt-amper xarakteristikalarini va fotoo‘tkazuvchanlik xossalari o‘rganildi. Bunda tok kuchining kichik qiymatlari III-300 (nanoamperda) elektrometr orqali o‘lchandi. Tajribalar $293\text{--}360 \text{ K}$ haroratda va $1\text{--}100 \text{ V}$ kuchlanish oralig‘ida olib borildi. Ultrabinafsha nurlanish ta‘sirida namunaning solishtirma qarshiligi kamayishi kuzatildi. Kimyoviy birikmalar bilan legirlangan yong‘oq qobig‘ining molekulyar strukturasi o‘zgarishi natijasida ularning elektron holatini o‘zgartirish mumkin. Bu o‘z navbatida, yong‘oq qobig‘ida elektrofizik xossalarni o‘zgarishiga olib keladi.

Natija va muhokama. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, legirlanmagan hamda yodning 5% li, KMnO_4 2% li yoki ZnSO_4 2% li eritmaları bilan legirlangan yong‘oq qobig‘i namunasidan volt-amper xarakteristikalarini olindi. Legirlanmagan toza namunaga berilayotgan kuchlanish 0 dan 100 V ga yetganida, tok kuchi $I_{\text{max}}=3,4 \text{ nA}$ ni tashkil etdi (1-rasm,1). Shu kuchlanish ostida yodning 5% li eritmasidagi namunadan o‘tgan tok kuchi $I_{\text{max}}=25 \text{ nA}$ ni (1-rasm,2), KMnO_4 2%li eritmasidagi namunadan o‘tgan tok kuchi $I_{\text{max}}=73,9 \text{ nA}$ ni (1-rasm,3) va ZnSO_4 2% li eritmasidagi namunadan o‘tgan tok kuchi $I_{\text{max}}=282,5 \text{ nA}$ ni (1-rasm,4) tashkil etdi.

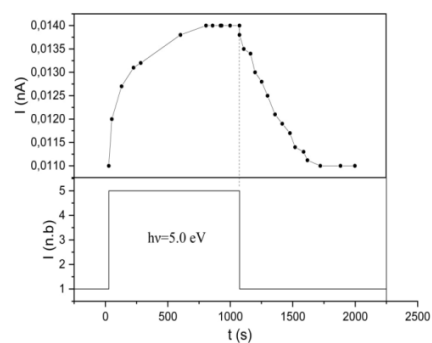


1-rasm Yong‘oq qobig‘ining legirlanmagan(1), Yod (2), KMnO_4 (3) yoki ZnSO_4 bilan legirlangan (4) namunalarning volt-amper xarakteristikasi. $T=300\text{K}$.

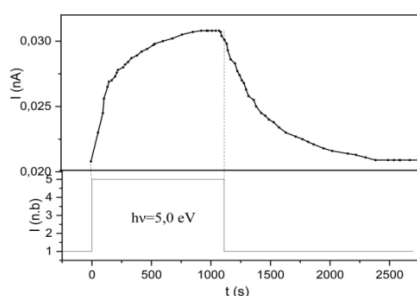
Volt-amper xarakteristikalarini (VAX) olish jarayonida legirlanmagan hamda, yodning 5% li, KMnO_4 2% li yoki ZnSO_4 2% li eritmaları bilan legirlangan yong‘oq qobig‘i namunalardan turlicha tok o‘tishini kuzatishimiz mumkin. Demak, tabiiy yong‘oq qobig‘iga kirishma kiritib, biz uning elektr o‘tkazuvchanligini boshqarishimiz mumkin. O‘lchashlar natijasida namunalarni VAX chiziqli ekanligi ma‘lum bo‘ldi. Takroran o‘lchanganida ham, VAX da o‘zgarishlar kuzatilmadi.



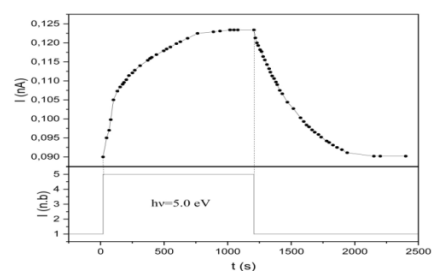
(a)



(b)



(c)



(d)

2-rasm Yong‘oq qobig‘ining legirlanmagan(a), Yod (b), KMnO_4 (c) yoki ZnSO_4 bilan legirlangan (d) namunalarning fotoo‘tkazuvchanlik kinetikasi. $U=50\text{V}$, $h\nu=5\text{eV}$.

Tajriba davomida legirlanmagan hamda turli kimyoviy modifikatorlar bilan ishlov berilgan namunalar uchun tok kuchining vaqtga bog‘liq o‘zgarishi qayd etildi. Legirlanmagan yong‘oq qobig‘i namunasiga 2020sek. vaqt davomida 5 eV UB nurlanish ta’sir ettirilganda tok kuchining 0,023 nA dan 0,036 nA gacha eksponensial ortib bordi va tok kuchi o‘chirilgandan so‘ng uzoq muddatli relaksatsiya kuzatildi (2a-rasm). Bu esa materialda fotogeneratsiyalangan zaryad tashuvchilarning hosil bo‘lishi va ularning o‘tkazuvchanlikka qo‘shgan hissasi bilan izohlanadi. Yod bilan legirlangan namunada 1075sek. vaqt davomida 5 eV UB nurlanish ta’sirida tok kuchi 0,011 nA dan 0,014 nA gacha o‘zgardi va tok kuchi o‘chirilgandan so‘ng uzoq muddatli relaksatsiya kuzatildi (2b-rasm). Bu esa yod atomlarining chuqur sathlar hosil qilishi natijasida zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ortganligini ko‘rsatadi. KMnO_4 ning 2% li eritmasi bilan legirlangan namunada 3138 sek. vaqt davomida 5 eV UB nur ta’sirida tok kuchi 0.021 nA dan 0,031 nA gacha o‘zgarishi kuzatildi va tok kuchi o‘chirilgandan so‘ng uzoq muddatli relaksatsiya kuzatildi (2c-rasm). Bu holat oksidlovchi muhit ta’sirida sirt holatlarining modifikatsiyalanishi va rekombinatsiya jarayonlarining kamayishi bilan bog‘liq. ZnSO_4 ning 2% li eritmasi bilan legirlangan namunada esa 5 eV UB nurlanish ta’sirida 1207 sek. vaqt davomida tok kuchi 0,09 nA dan 0,12 nA gacha oshdi va tok kuchi o‘chirilgandan so‘ng uzoq muddatli relaksatsiya kuzatildi (2d-rasm). Bu esa kirishma ionlarining material tuzilmasiga kiritilishi natijasida energetik sathlarning shakllanishi bilan izohlanadi va fotoo‘tkazuvchanlik namoyon bo‘lganligini bildiradi. Yuqorida oligan natijalardan shuni bilishimiz mumkinki, temperatura ta’sirida va nur ta’sirida tokning ortib borganligini kuzatishimiz mumkin. Bu esa yarimo‘tkazgichlarga xos xususiyatlarni namoyon qildi.

Adabiyotlar:

1. Klemm D., Heublein B., Fink H.P., Bohn A. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. Angewandte Chemie International Edition, 2005.
2. A.T. Mamadalimov, N. K. Hakimova, Sh. M. Norbekov, A.A.O'rolov "O'rik danagi po'stining elektrofizik xossalari tadqiq qilish" Физика ривожда фундаментал инновацион тадқиқотлар ваунинг истикволлари. Республика амалий конференцияси, УЗМУ, Ташкент, 2022 йил 14-октабр 68-71 бетлар.
3. Sze S.M., Ng K.K. Physics of Semiconductor Devices. Wiley, 2007.
4. Street R.A. Hydrogenated Amorphous Silicon. Cambridge University Press, 1991.
5. Heeger A.J. Semiconducting and metallic polymers: The fourth generation of polymeric materials. Journal of Physical Chemistry B, 2001.
6. Irimia-Vladu M. "Green" electronics: biodegradable and biocompatible materials and devices. Chemical Society Reviews, 2014.

DESIGN AND OPTIMIZATION OF A CYLINDRICAL DBD PLASMA REACTOR FOR PLASMA-ASSISTED PREPARATION OF Ag/TiO₂ PHOTOCATALYST FOR WASTEWATER TREATMENT

N. Matyakubov, M. Karimov, J. Madrakhimova, D. Isayev

*Department of Physics, Urgench State University named after Abu Rayhan Biruni,
Urgench, Uzbekistan*

Email: nosirbek0726@gmail.com

In this study, a cylindrical dielectric barrier discharge (DBD) plasma reactor was designed, simulated, and experimentally optimized for the plasma-assisted synthesis of Ag/TiO₂ photocatalyst intended for wastewater treatment. The reactor consists of two parallel electrodes separated by a dielectric plate, and the entire assembly is enclosed within a cylindrical chamber. Argon gas was used as the working gas to generate a stable nonthermal plasma at atmospheric pressure and room temperature.

To enhance reactor performance, the complete geometry of the DBD system was modeled using COMSOL Multiphysics, where the internal gas flow distribution, velocity fields, and plasma region behavior were simulated. These simulations guided the optimization of electrode spacing, gas inlet geometry, and discharge region uniformity.

Silver nitrate (AgNO₃) was employed as the precursor for Ag deposition. During plasma treatment, AgNO₃ rapidly decomposed and was reduced to metallic Ag nanoparticles, achieving uniform loading on TiO₂ without thermal calcination. In experimental studies, key operational parameters—including gas flow rate, electrode gap distance, and discharge power—were systematically varied to achieve maximum plasma stability and effective precursor reduction.

In conclusion, this work demonstrates that the combined COMSOL-based design and experimental optimization of the DBD reactor provides an efficient, low-temperature, and environmentally friendly route for preparing high-performance Ag/TiO₂ photocatalysts suitable for scalable wastewater treatment applications.

Keywords: DBD plasma reactor, COMSOL simulation, Ag/TiO₂ photocatalyst, wastewater treatment, argon plasma, plasma-assisted synthesis.

Acknowledgements

The Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan through the fundamental grant No. FL-8824063312.

THE COBALTITE OF BARIUM AND STRONTIUM, SYNTHESIZED IN A SOLAR FURNACE

M.S. Paizullakhanov¹, E.Z. Nodirmatov¹, F.N. Ernazarov^{1,2}, M.M. Sulaymanov^{1,2}

¹*Materials sciences institute of the academy of sciences Republik of Uzbekistan
Chingiz Aytmatov street, 2-B, Tashkent city, Uzbekistan*

²*Tashkent State Transport University, Temiryo 'Ichilar Street, Mirobod District,
Tashkent, 100167 Uzbekistan*

Abstract. Perovskite cobaltites of strontium $\text{SrCoO}_{3-\delta}$ and barium $\text{BaCoO}_{3-\delta}$ have been studied. It is shown that the technological route, which includes melting a stoichiometric mixture of cobalt oxide with barium or strontium carbonates in a solar furnace, quenching the melt into water, grinding the casting and molding, followed by sintering at 1100°C , makes it possible to obtain a material based on hexagonal barium and strontium cobaltites with a developed fine microstructure and semiconductor properties. the nature of the electrical conductivity.

Keywords. Barium cobaltite, strontium, solar furnace, melting, hardening, sintering, ceramics.

Introduction.

It is known that perovskite cobaltites of strontium $\text{SrCoO}_{3-\delta}$ and barium $\text{BaCoO}_{3-\delta}$ exhibit a wide range of electronic and magnetic characteristics and are of great interest. A feature of such compounds is the possibility of influencing their transport properties by varying the concentration of anionic vacancies [1]. At the same time, synthesis at high pressures makes it possible to obtain an ideal oxygen stoichiometry ($\delta = 0$). For example, SrCoO_3 obtained at 6 GPa [2, 3] is a simple cubic perovskite structure. Recently, more and more attention has been paid to barium cobaltite oxide due to its semiconductor characteristics [4-6]. Materials based on $\text{BaCoO}_{3-\delta}$ doped with some other elements have low resistivity at low temperatures and can be used as thermistors.

Technological approaches.

In this work, we studied perovskite structures based on barium and strontium cobaltites obtained by melt synthesis in a solar furnace of the corresponding mixture of barium and/or strontium carbonates with cobalt oxide: $\text{BCO}_3 + \text{Co}_2\text{O}_3$; $\text{SrCO}_3 + \text{Co}_2\text{O}_3$. From the mixture after grinding (63 mkm) and molding by semi-dry pressing ($P = 1\text{t}$), samples were made in the form of a cylinder $\varnothing 20\text{ mm}$, which were installed on a water-cooled melting unit located on the focal plane of the solar furnace.

A concentrated flux of solar radiation with a density of the order of $Q = 450\text{ W/cm}^2$ was directed to the sample. Melt droplets fell into water and cooled at a rate of 10^3 deg/s . Such cooling conditions made it possible to fix the high-temperature structural states of the material.

Drops of the melt loaded into water cracked into small glassy particles of arbitrary shape. To study such a material, it was ground to a fineness of 60 mkm, dried at 400°C , and samples were

molded in the form of cylinders $\varnothing 8\text{mm}$ and 15mm high for firing at a temperature of 1000°C followed by arbitrary cooling.

Experimental results and their discussion.

Figure 1 shows X-ray patterns of barium and strontium perovskite cobaltites.

The analysis of X-ray patterns showed that for the case of BaCoO_3 the diffraction pattern is described by a hexagonal lattice of space group $P6_3/mmc$ with lattice parameters $a=5.652 \text{ \AA}$, $c=4.763 \text{ \AA}$. In the case of strontium cobaltite SrCoO_3 , a hexagonal structure is also observed with lattice parameters $a=9.511 \text{ \AA}$, $c=12.287 \text{ \AA}$.

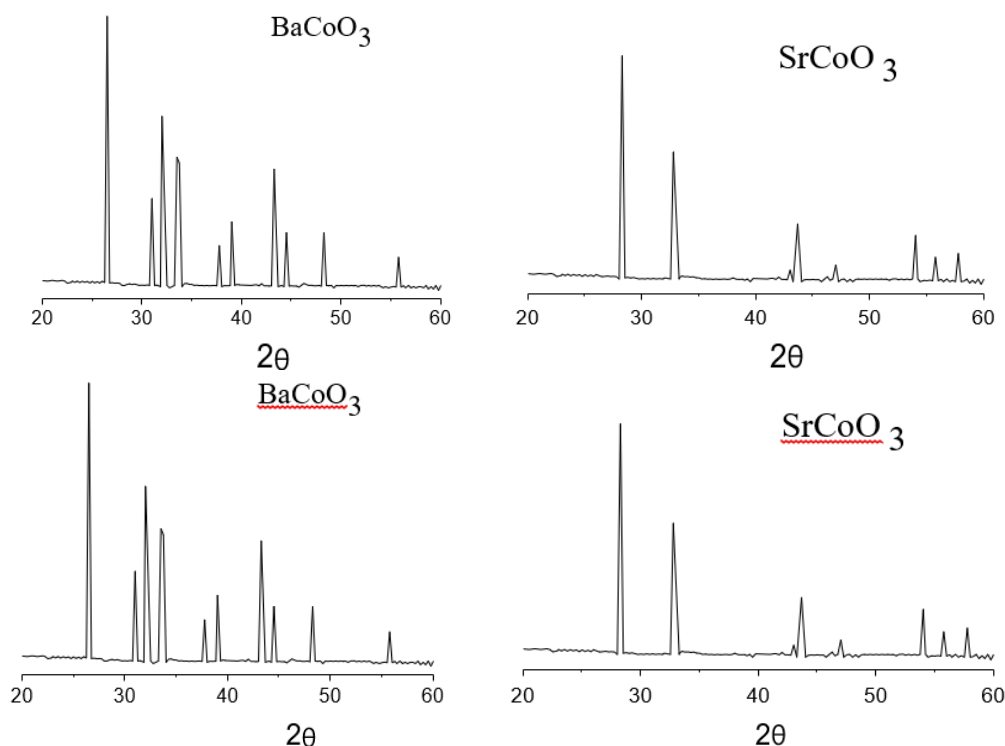


Fig.1. X-ray patterns of perovskite structures of barium cobaltites BaCoO_3 and strontium SrCoO_3 obtained from a melt in a solar furnace

The average ceramic grain size is $3 \mu\text{m}$. The relative density of the samples was 94%. The dense microstructure made it possible to obtain good reproducibility of the electrical characteristics of the ceramic. The analysis of the obtained results made it possible to determine the activation energy equal to 0.01 eV. The obtained results indicate that BaCoO_3 and CaCoO_3 cobaltites, demonstrating high electrical conductivity and low thermal expansion coefficient, can be used as a promising thermoelectric material.

The temperature coefficient of thermal expansion of the samples in the temperature range $25 - 950^{\circ}\text{C}$ was $\alpha = 11.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ for SrCoO_3 and $\alpha = 14.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ for BaCoO_3

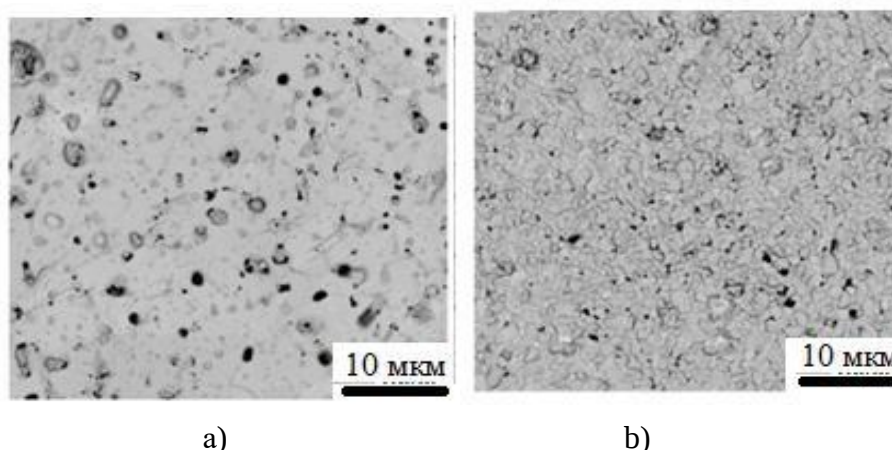


Fig.2. SEM micrographs of barium (a) and strontium (b) cobaltites obtained by melt quenching in a solar furnace.

Conclusion.

Thus, the technological route, which includes melting a stoichiometric mixture of cobalt oxide with barium or strontium carbonates in a solar furnace, quenching the melt into water, grinding the casting and molding, followed by sintering at 1100°C , makes it possible to obtain a material based on hexagonal barium and strontium cobaltites with a developed fine microstructure and semiconductor properties. The materials, exhibiting high values of electrical conductivity and low coefficient of thermal expansion, can be used as a promising thermoelectric material.

Literature:

1. J. G. Grenier, S. Ghodbane, G. Demazeau, M. Pouchard, P. Hagenmuller, ChemInform Abstract: Synthesis, Structural, Magnetic, and Electrical Study of $\text{BaSrCo}_2\text{O}_5$, a Highly Disordered Cubic Perovskite. Mat. Res. Bull.1979, 14,831.
2. X. L. Wang, H. Sakurai, E. Takayama-Muromachi, Synthesis, structures, and magnetic properties of novel Ruddlesden–Popper homologous series $\text{Sr}_{n+1}\text{Co}_n\text{O}_{3n+1}$ ($n=1,2,3,4$, and ∞) J. Appl. Phys.2005, 97, 10M519.
3. Z. Q. Deng, W. S. Yang, W. Liu, C. S. Chen, Oxygen-Vacancy-Related Structural Phase Transition of $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$. J. Solid State Chem.2006, 179, 362.
4. H. Watanabe, T. Takeda, Proc. Int. Conf. on Ferrites, Japan 1970, p. 598.
5. Wei Zhou, Ran Ran, Wanqin Jin. In situ templating synthesis of conic $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite at elevated temperature. 2009. Bulletin of Materials Science
6. J.C. Yao, J.H. Wang, Q. Zhao, A.M. Fabrication and thermosensitive characteristics of $\text{BaCoO}_{3-\delta}$ ceramics for low temperature negative temperature coefficient Thermistor //April 2017. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 28(8)

SiO₂ (001) SIRTIDAN PAST ENERGIYALI Ne⁺ VA Ar⁺ IONLARINING SOCHILISHIDA ENERGIYA SPEKTRINING SHAKLLANISH MEKANIZMLARI

**H.Sh. Atanazarova, N.A. Xudayshukurova, Sh.F. Bardiboyeva, D.S. Sapayev,
A.S. Ashirov**

Urganch davlat universiteti, Urganch

Zamonaviy sirt fizikasi va nanomaterialshunoslikda materiallarning eng yuqori atom qatlamlarini o'rganish muhim ahamiyat kasb etadi. Adsorbsiya, kataliz, korroziya va yupqa qatlamlar hosil bo'lishi kabi ko'plab fizik-kimyoviy jarayonlar aynan material sirtida kechadi. Shuning uchun sirt atomlarining tarkibi va fazoviy joylashuvini aniq aniqlash imkonini beruvchi yuqori sezgirlikka ega tahlil usullariga ehtiyoj katta.

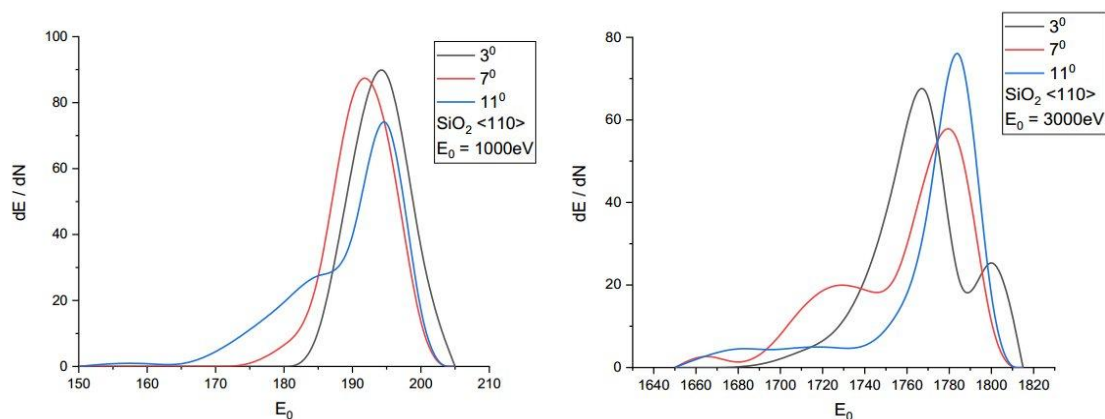
Past energiyali ionlar sochilish spektroskopiyasi (LEIS - Low Energy Ion Scattering) sirtning birinchi atom qatlamiga nisbatan o'ta yuqori sezgirlikka ega usullardan biridir [1,5]. Bu usulda energiyasi bir necha keV dan oshmaydigan ionlar sirtga yo'naltiriladi va qaytgan zarralarning energiyasi o'lchanadi. Odatda inert gaz ionlaridan foydalaniladi, chunki bu holda sochilish asosan sirt atomlari bilan yakka binar to'qnashuvlar natijasida yuzaga keladi [2].

Ion va sirt atomi orasidagi to'qnashuvni birinchi yaqinlashuvda markaziy kuchlar maydonida ikki zarraning elastik sochilishi sifatida qarash mumkin. Sochilgan ionning energiyasi zarralar massalari nisbati va sochilish burchagi θ ga bog'liq bo'ladi. Agar M_1 ion massasi, M_2 sirt atomi massasi va E_0 boshlang'ich energiya bo'lsa, sochilgandan keyingi energiya $E = K(\theta) \cdot E_0$ munosabat orqali aniqlanadi, bu yerda $K(\theta)$ - kinematik koeffitsient. Og'ir sirt atomlari bilan to'qnashganda ion kamroq energiya yo'qotadi, yengil atomlar bilan to'qnashuvda esa energiya yo'qotish katta bo'ladi.

Ammo real kristall sirtlarda vaziyat murakkabroq. Ion kristall panjarasi ichida harakatlanar ekan, u bir qator atomlar bilan ketma-ket to'qnashishi mumkin - bu kanallash effekti deb ataladi [3]. Kristall strukturasida atomlar ma'lum qatorlar va tekisliklar bo'ylab tartibli joylashgan va ular orasida nisbatan bo'sh yo'llar - kanallar mavjud. Sirt yaqinida esa to'liq kanallardan tashqari yarim kanallar ham bo'lib, ular ionning qisman kirishiga imkon beradi.

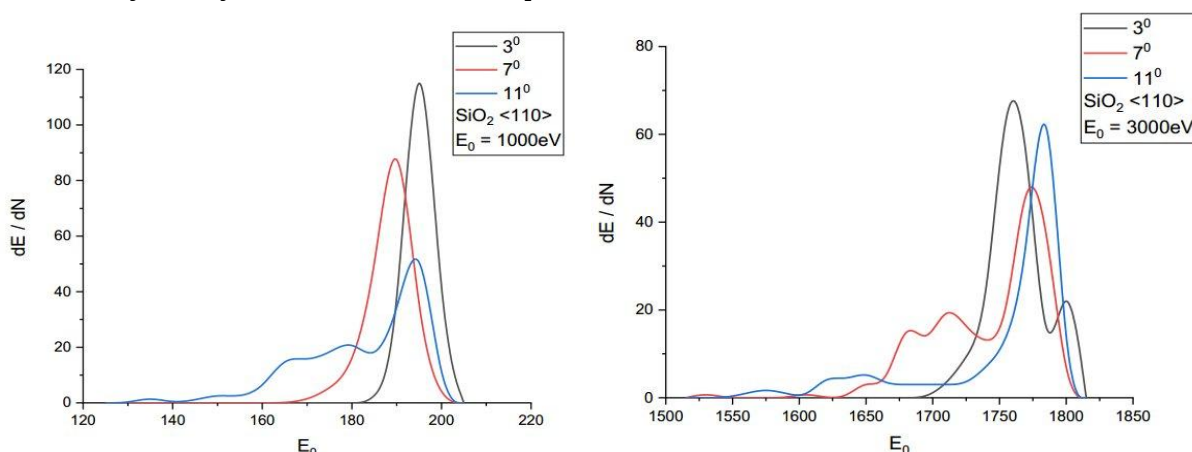
Ushbu ishda barcha hisob-kitoblari LEIS usullaridan biri, binar to'qnashuvlar yaqinlashuvi (BCA - Binary Collision Approximation) usuliga asoslangan simulyatsiya dasturi yordamida amalga oshirildi [4]. BCA modelida ionning kristalldagi harakati ketma-ket binar to'qnashuvlar sifatida tasvirlanadi. Simulyatsiyada SiO₂ ning (001) sirtidan $\langle 110 \rangle$ yo'nalishi bo'ylab sochilish o'rganildi. Bombardimon ionlari sifatida Ne⁺ va Ar⁺ tanlandi, boshlang'ich energiya $E_0 = 1, 3$ keV va sirpanish burchaklari $\psi = 3^\circ, 7^\circ, 11^\circ$ qilib olindi.

Simulyatsiya natijalari energiya spektri shaklining boshlang'ich energiya va sirpanish burchagiga sezilarli bog'liqligini ko'rsatdi. 1-rasmda Ne⁺ ionlari uchun olingan spektrlar keltirilgan. Past energiyada (1 keV) va kichik sirpanish burchaklarida ionlar asosan sirtning birinchi atom qatlamidan sochiladi va spektr bir cho'qqili shaklga ega bo'ladi. Burchak ortishi bilan ionlarning yarim kanallarga kirish ehtimoli oshadi va spektrda past energiya tomonida qo'shimcha cho'qqi paydo bo'ladi. Energiya 3 keV ga oshirilganda kanallash ehtimoli keskin ortadi va spektr aniq ikki cho'qqili ko'rinishga keladi.



1-rasm. Ne^+ ionlarining SiO_2 (001)<110> sirtidan sochilish spektrlari: a) $E_0=1$ keV; b) $E_0=3$ keV.

2-rasmda Ar^+ ionlari uchun olingan natijalar keltirilgan. Argon ionining massasi neon ioniga nisbatan katta bo'lgani sababli, uning trayektoriyasi sirt atomlari bilan to'qnashuvda kamroq og'adi. Bu esa sirt qatlamidan sochilish ehtimolini oshiradi. Past energiyalarda kanallash effekti faqat katta burchaklarda sezilarli bo'ladi. Energiya ortishi bilan asosiy cho'qqi intensivligi ortadi va atom zanjiri bo'ylab sochilish ustunlik qiladi.



2-rasm. Ar^+ ionlarining SiO_2 (001)<110> sirtidan sochilish spektrlari: a) $E_0=1$ keV; b) $E_0=3$ keV.

Olingan natijalar ion-sirt o'zaro ta'sirining ko'p omilli murakkab jarayon ekanini ko'rsatadi. Spektarning yakuniy shakli ion va nishon atomlari massalari nisbati, sirpanish burchagi, boshlang'ich energiya, kristall panjara geometriyasi hamda ko'p martalik to'qnashuvlar ehtimoli bilan belgilanadi.

Xulosa qilib aytganda, SiO_2 (001)<110> sirtidan past energiyali Ne^+ va Ar^+ ionlarining sochilishi BCA simulyatsiyasi yordamida nazariy o'rganildi. Energiya spektri shakli ionning boshlang'ich energiyasi va sirpanish burchagiga kuchli bog'liqligi aniqlandi. Kanallash effekti spektrda bir nechta cho'qqining paydo bo'lishiga sabab bo'lishi ko'rsatildi. Og'ir ionlar (Ar^+) uchun sirt atom zanjiridan sochilish ustunlik qilishi, yengil ionlar (Ne^+) uchun esa kanallash ta'siri kuchliroq ekanligi qayd etildi. Natijalar LEIS usulining sirt tuzilishini atom darajasida tahlil qilishda samarali vosita ekanini tasdiqlaydi.

Adabiyotlar:

1. Brongersma H.H., Draxler M., de Ridder M., Bauer P. Surface composition analysis by low-energy ion scattering // Surface Science Reports. – 2007. – Vol. 62. – P. 63–109.

2. Niehus H., Heiland W., Taglauer E. Low-energy ion scattering at surfaces // Surface Science Reports. – 1993. – Vol. 17. – P. 213–303.
3. Mashkova E.S., Molchanov V.A. Medium-energy ion reflection from solids. – Amsterdam: North-Holland, 1985. – 444 p.
4. Eckstein W. Computer Simulation of Ion-Solid Interactions. – Berlin: Springer-Verlag, 1991. – 296 p.
5. Průša S., Linford M.R., Vaničková E., Bábík P., Pinder J.W., Šikola T., Brongersma H.H. A practical guide to interpreting low energy ion scattering (LEIS) spectra // Applied Surface Science. – 2024. – Vol. 657. – P. 158793.

CsPbCl₃ DAN CsMnCl₃ GA O‘TISHDA ELEMENTLARNI ALMASHTIRISH ORQALI TAQIQLANGAN ZONA ENERGIYASINI O‘ZGARISHINI O‘RGANISH

K.R. YAKUBOV¹, D.SH. KURBANOV¹, N.M. NAZAROVA¹, XIA HAO²,

¹*Abu Rayxon Beruniy nomidagi Urganch davlat universiteti Fizika-matematika fakulteti 220100
Urganch sh.*

²*Institute of New Energy and Low-Carbon Technology & College of Materials Science and
Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China
e-mail: davronkurbanow@gmail.com*

So‘nggi yillarda qo‘rg‘oshinsiz perovskit materiallar ekologik xavfsizligi va barqarorligi sababli katta ilmiy qiziqish uyg‘otmoqda [1-3]. An‘anaviy CsPbCl₃ perovskiti yuqori optoelektron xossalarga ega bo‘lsada, tarkibidagi Pb elementi toksikligi sababli uni muqobil materiallar bilan almashtirish dolzarb masala hisoblanadi [1-6]. Shu nuqtai nazardan, CsMnCl₃ qo‘rg‘oshinsiz perovskit sifatida istiqbolli namunalardan biridir [7]. CsPbCl₃ dan CsMnCl₃ ga o‘tishda kristall tuzilma va elektron konfiguratsiyada sezilarli o‘zgarishlar yuz beradi. Pb²⁺ (6s²6p⁰) ionining o‘rnini Mn²⁺ (3d⁵) egallashi natijasida valent va o‘tkazuvchanlik zonalarining tabiati o‘zgaradi. Natijada CsMnCl₃ odatda keng taqiqlangan zonali material sifatida namoyon bo‘ladi [1], bu esa uning quyosh elementlari va keng spektrli optoelektron qurilmalarda qo‘llanishini cheklaydi [6]. Taqiqlangan zona energiyasini kichraytirish va materialning yorug‘lik yutish diapazonini kengaytirish maqsadida Mn o‘rnini qisman boshqa metall ionlari bilan almashtirish samarali strategiya hisoblanadi. Xususan:

Yb³⁺ kiritish: Yb ionlari 4f energetik sathlari orqali qo‘shimcha lokal energetik darajalar hosil qiladi [8]. Bu esa oraliq sathlar paydo bo‘lishiga va samarali yuqori energiyali nurlanish hosil bo‘lishi yoki infraqizil emissiya jarayonlariga olib kelishi mumkin [9]. Yb kiritish natijasida zonaviy tuzilishda torayish yoki oraliq holatlar shakllanishi kuzatiladi [8-9].

Zn²⁺ kiritish: Zn²⁺ (3d¹⁰) to‘liq to‘ldirilgan d-qobig‘iga ega bo‘lib, panjara deformatsiyasini kamaytirishi va kristall barqarorligini oshirishi mumkin. Zn qo‘shilishi natijasida Mn–Cl bog‘ uzunliklari o‘zgaradi va bu kristall maydon kuchini modifikatsiyalaydi. Natijada taqiqlangan zona energiyasi nazoratli ravishda kamayishi yoki optik o‘tishlar intensivligi ortishi mumkin [4].

Nazariy jihatdan, bunday modifikatsiyalarni zichlik funksional nazariyasi (DFT) yordamida tahlil qilish mumkin. Hisoblashlar orqali umumiy va qisman zichlik holatlari (DOS va

PDOS), zonaviy tuzilma (band structure), hamda zaryad taqsimoti (Bader charge analysis) o'rganilib, kirishma kiritishning elektron tuzilishga ta'siri aniqlanadi.

Xulosa qilib aytganda, CsPbCl₃ dan CsMnCl₃ ga o'tish ekologik xavfsiz alternativni taqdim etadi. Mn ionini Yb, Zn yoki boshqa metall ionlari bilan qisman almashtirish orqali taqiqlangan zona energiyasini samarali boshqarish, optik yutilishni kengaytirish va materialni quyosh elementlari hamda fotonika qurilmalari uchun moslashtirish mumkin. Ushbu yondashuv qo'rg'oshinsiz perovskitlarning amaliy qo'llanilish imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:

1. "All-Inorganic Manganese-Based CsMnCl₃ Nanocrystals for X-Ray Imaging" Lin-Quan Guan, Shuo Shi, Xiao-Wei Niu, Shi-Chen Guo, Jian Zhao, Tian-Meng Ji, Hao Dong, Feng-Yan Jia, Jia-Wen Xiao, Ling-Dong Sun, Chun-Hua Yan First published: 24 April 2022
<https://doi.org/10.1002/advs.202201354>
2. "Role of CsMnCl₃ Nanocrystal Structure on Its Luminescence Properties" Anastasia Matuhina, G. Krishnamurthy Grandhi, Fang Pan, Maning Liu ACS Applied Nano Materials Vol 6/Issue 2 Article article january 5, 2023
3. "Optical and conduction mechanism study of lead-free CsMnCl₃ perovskite" Moufida Krimi , Mehdi Akermi , Rym Hassani , Abdallah Ben Rhaïem Solid State Sciences Volume 155, September 2024, 107646
4. "Zn²⁺-Doped Lead-Free CsMnCl₃ Nanocrystals Enable Efficient Red Emission with a High Photoluminescence Quantum Yield" Xuerong Hao, Hongli Liu, Weigang Ding, Fei Zhang, Xianggao Li, Shirong Wang The Journal of Physical Chemistry Letters Vol 13/Issue 21 Physical Insights Into Materials And Molecular Properties May 23, 2022
5. Cesium manganese chloride: Stable lead-free perovskite from bulk to single layer Yigit Sozen, Sercan Ozen, Hasan Sahin Journal of Magnetism and Magnetic Materials Volume 531, 1 August 2021, 167845
6. Lead-Free CsMnCl₃ Nanoparticles with Tunable Dual Fluorescence for Light- Emitting Applications Ben Aizenshtein, Rivka Gartner, Ido Hadar October 15. 2025
7. "Mn²⁺-Mn²⁺ Magnetic Coupling Effect on Photoluminescence Revealed by Photomagnetism in CsMnCl₃" Xinglu Zhu, Suqian Meng, Yifei Zhao, Shuai Zhang and etc. The Journal of Physical Chemistry Letters physical insights into materials and molecular properties vol 11/Issue 22 October 29, 2020
8. Highly Efficient Near-Infrared Luminescence in Bi³⁺-Yb³⁺ Co-Doped CsMnCl₃ Perovskite Single Crystals for Versatile Photonic Applications Yajun Jia, Chenyang Zhao, Jiawei Qiang, Jiachen Wang, Fengqin Hu, Yong Sheng Zhao First published: 02 April 2025
9. New photon upconversion processes in Yb³⁺ doped CsMnCl₃ and RbMnCl₃ Author links open overlay panel Rafael Valiente, Oliver Wenger, Hans U. Güdel Department of Chemistry and Biochemistry, University of Bern, Freiestrasse 3, CH-3000 Bern 9, Switzerland Received 4 February 2000, Available online 12 April 2000

Si<Er> VA Si<Eu> MATERIALLARIDA FAZAVIY O'ZGARISHLAR VA NUQSONLI STRUKTURA

Sh.B.Utamuradova, X.S.Daliyev, J.J.Hamdamov, A.G'.Mardonqulova, M.N.Marseva

O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, Toshkent, O'zbekiston

E-mail: jonibek.uzmu@gmail.com

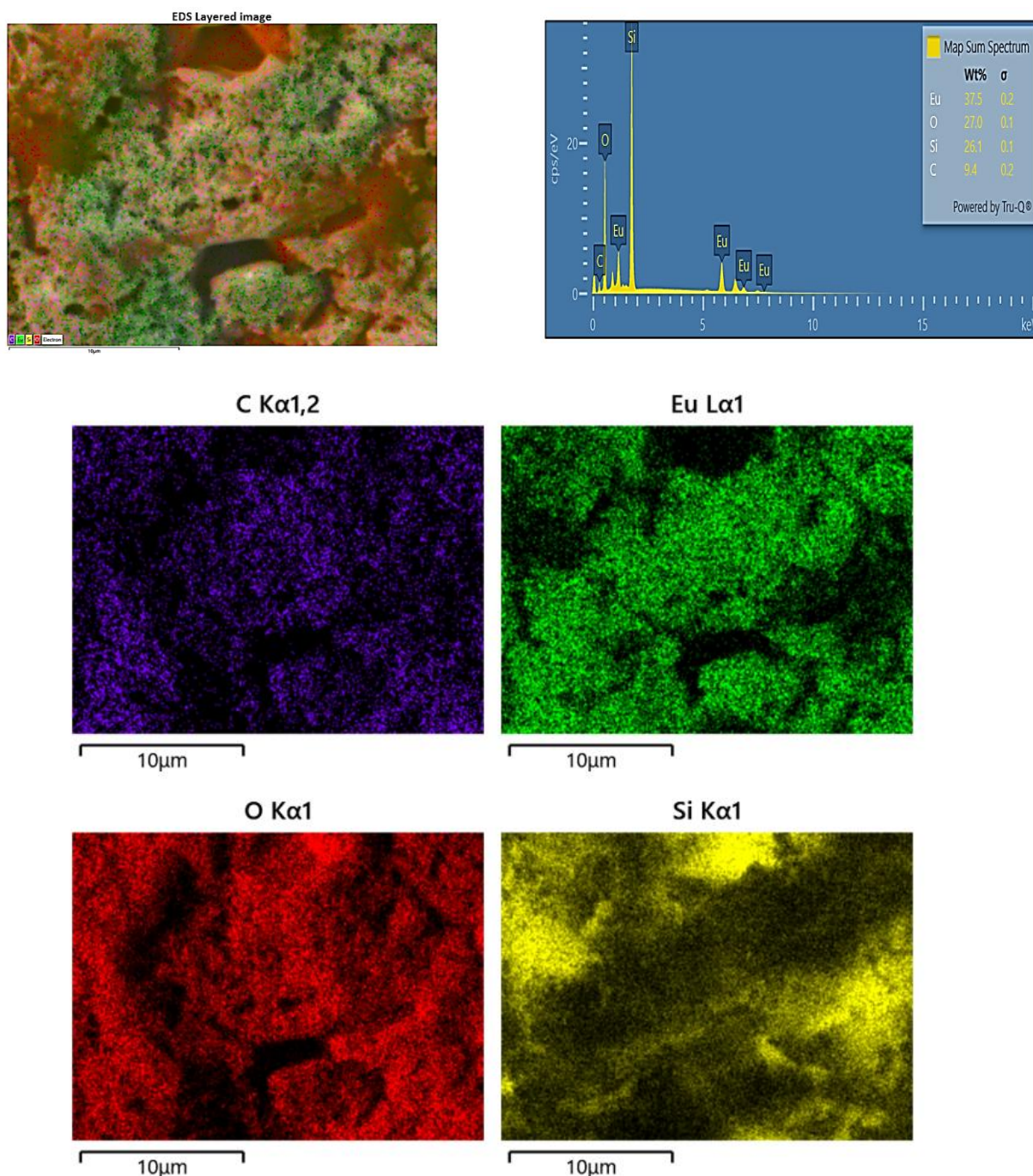
Kremniy (Si) planar strukturalar texnologiyasining rivojlanishi va nisbatan arzonligi tufayli yarimo'tkazgichlar sanoatida asosiy material hisoblanadi. Biroq, uning bilvosita zonali tuzilishi sababli fotogeneratsiya va yorug'lik nurlanishi jarayonlaridagi kvant samaradorligi cheklangan [1-4]. So'nggi o'n yillikda kremniyning optik xossalarini modifikatsiyalash usullari, xususan, nodir yer elementlarini (NYE) kiritish orqali faol o'rganilmoqda. Ular orasida erbiyga (Er) va evropiy (Eu) alohida e'tibor qaratilmoqda, misol uchun Er^{3+} ionlari $\sim 1,54$ mkm sohada nurlanadi va bu optik tolali tarmoqlarga mos keladi. Kremniyga Er kiritilganda Er – O komplekslar, shuningdek, Er_2O_3 , $ErSi_2$ va b. oksid va silitsid fazalar hosil bo'lishi mumkin [2-6].

Kompleks tadqiqot doirasida erbiy va yevropiy atomlari bilan legirlangan kremniy namunalari yuzasining qiyosiy SEM tadqiqotlari o'tkazildi. Olingan tasvirlar ishlatilgan nodir yer elementlariga qarab sirt morfologiyasida sezilarli farqlarni aniqladi. Erbiy bilan legirlangan namunalar uchun orolchali strukturalar namoyon bo'lishi va $ErSi_{2-x}$ tipidagi birikmalar hosil bo'lishi mumkin bo'lgan shakllanayotgan teksturalangan yuza xosdir. Yuqori kontrastli sohalar kuzatiladi, bu erbiyning mahalliy to'planishi va nuqsonli komplekslarning shakllanishini ko'rsatishi mumkin. Yevropiy bilan legirlangan holatda sirt morfologiyasi nanorelefning kamroq ifodalanganligi bilan ajralib turadi, ammo fazaviy tabaqalanish va tartibli tuzilmalarning shakllanishi belgilari mavjud bo'lib, bu yevropiyning kremniy panjarasi bilan o'zaro ta'sirining boshqa mexanizmlarini ko'rsatadi.

IQ-spektroskopiya ma'lumotlariga ko'ra, kislorod va Er o'zaro ta'sirlashib, sirt yaqini qatlamida qalinligi 0,2–0,8 mkm alohida yoki kirishma oksidli fazalarni hosil qiladi. Oksid qatlamining qalinligi 5–15 nm dan ortiq bo'lgan barcha namunalarda $1080 - 1100 \text{ cm}^{-1}$ sohada Si–O–Si bog'ining asimmetrik tebranishlariga mos keluvchi intensiv yutilish polosasini kuzatish mumkin. Ushbu polosaning joylashuvi va yarim kengligi oksidlanish darajasiga hamda kremniy oksidining ehtimoliy nostexiometriyasiga (SiO_x , $1 \leq x \leq 2$) bog'liq. Bizning tajribalarimizda toblash harorati ortishi bilan bu polosa $1100 - 1110 \text{ cm}^{-1}$ sohasiga siljigan, bu esa oksidning zichlashganini va uning stexiometriyasi ortganini ko'rsatadi. Tajriba ma'lumotlari shuni ko'rsatadiki, qalin oksid pardali ~ 150 nm va oksidi qisman olib tashlangan ikkita kremniy namunasining IQ-spektrlari $380 - 1700 \text{ cm}^{-1}$ diapazonda o'ziga xos xususiyatlarni namoyon etadi. $\sim 1100 \text{ cm}^{-1}$ dagi intensiv polosa Si–O–Si bog'ining asimmetrik valent tebranishlariga mos keladi va oksid qatlami olib tashlanganda uning amplitudasi kamayadi. $450 - 470 \text{ cm}^{-1}$ sohada Si–O–Si bog'ining mayatniksimon tebranishi kuzatiladi. 605 va 621 cm^{-1} dagi cho'qqilar uglerod (C) va bor (B) aralashmalari mavjudligidan dalolat beradi, bu dastlabki kremniyning xususiyatlari yoki uning o'stirilish sharoitlari bilan bog'liq bo'lishi mumkin. Dastlabki namunaga nisbatan erbiy bilan legirlash $1090 - 1110 \text{ cm}^{-1}$ oralig'ida polosa amplitudasining sezilarli pasayishiga olib keladi. Ushbu chiziq maydonini miqdoriy baholash optik faol kislorod Si - O - Si miqdorining 35-47% ga kamayishini ko'rsatdi. Bu holat Er ning O bilan o'zaro ta'siri natijasida yuzaga keladi. Bu

jarayonda Er Si—O—Si bog‘lanishlaridagi O ning bir qismini almashtirib, Er—O bog‘lanishlarini hosil qiladi.

Namunalar Er ishtirokida toblanganda SiO₂ tarkibidagi kislorod qisman qayta taqsimlanib, Er—O bog‘lanishlarini hosil qiladi. Natijada mavjud Si—O—Si guruhlarini soni kamayadi va bu kremniy matritsasidagi kislorodning optik faolligini pasaytiradi. Shuningdek, Er—Si—O silikatlarini yoki Er₂O₃ nanodispers kiritmalari shakllanishi ham mumkin [].



1-Rasm. Yevropiy oksidi Eu₂O₃-Si qatlamining diffuziyasi natijasida hosil bo‘lgan kremniy strukturasi tasviri.

Si oksidlanish qatlamiga ega namunalarda qo‘shimcha piklar kuzatildi. Piklar 457 sm⁻¹, 605 sm⁻¹, 621 sm⁻¹, 1090 sm⁻¹ va 1107 sm⁻¹ da joylashgan. 457 sm⁻¹ da sirtida Si-O bog‘lanishining

deformatsiyasi, 842 см^{-1} da Si-O bogʻlanishining egilishi, 1107 см^{-1} da esa Si-O-Si bogʻlanishining choʻzilishi kuzatiladi. 605 см^{-1} dagi pik Si-C bogʻlanishiga mos keladi.

Shuningdek Si<Er> da Er-O bogʻlanishiga mos keluvchi 495 см^{-1} va 848 см^{-1} da joylashgan ikkita qoʻshimcha pikni kuzatish mumkin. Bu piklar faqat erbiy bilan legirlangan namunalarda paydo boʻlib, nazorat namunalarida mavjud emas.

SEM-tasvirlar tahlili termik ishlov berish va nodir yer elementlari oksidlari diffuziyasidan soʻng kremniy sirti morfologiyasida sezilarli oʻzgarishlar yuz berganini koʻrsatadi. Dastlabki tuzilmalarda, ehtimol, koʻp bosqichli ishlov berish natijasida shakllangan, bir necha mikron oʻlchamdagi qismlarga ega “dagʻal gʻovaksimon” yoki “tolasimon” relyef kuzatiladi. Taxminan $\times 1100$ marta kattalashtirilganda sirt toʻrsimon tuzilishga ega boʻladi, bu qatlamning qisman “yemirilishi”, diffuzion jarayonlar yoki oksid kirishmalarining hosil boʻlishidan dalolat berdi. Eu_2O_3 –Si qatlamining diffuziyasidan soʻng relyef yanada notekis boʻlib, unda oksid plyonkalarining pishib yopishishi va darz ketishi, shuningdek, silikat fazalarining shakllanishini koʻrsatishi mumkin boʻlgan mahalliy orolchalar va pufaksimon tuzilmalar paydo boʻladi. Umuman olganda, termik ishlov berish gʻadir-budurlikning ortishiga, mikroyoriqlar va murakkab sirt hosilalarining yuzaga kelishiga olib boradi, bu esa kremniydagi jiddiy strukturaviy oʻzgarishlardan dalolat beradi. Eu_2O_3 –Si tuzilmalarida yuqori haroratli ishlov berishgacha metallning toʻliq oksidlanmaganligi sababli kremniy bilan chegarada Eu konsentratsiyasi ortishi aniqlangan. $1200\text{ }^\circ\text{C}$ haroratda ishlov berilgandan soʻng, Eu ionlari kremniy taglikka diffuziyalanib, sirtoldi sohalarida Eu konsentratsiyasi $3,7 \cdot 10^{20}\text{ см}^{-3}$ dan yuqori boʻlgan sirt qatlamini hosil qiladi, bu esa standart diffuzion legirlashga xos qiymatlardan ancha yuqoridir.

Adabiyotlar:

1. Соболев Н. А. Кремний, легированный эрбием, новый полупроводниковый материал для оптоэлектроники // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева, 2001, т. XLV, № 5-6. С. 95-101.
2. Lourenço M. A., Milošević M. M., Gorin A., Gwilliam R. M. & Homewood K. P. Super-enhancement of $1.54\text{ }\mu\text{m}$ emission from erbium codoped with oxygen in silicon-on-insulator // Scientific Reports. 2016, vol. 6, p. 37501. DOI: 10.1038/srep37501.
3. Wang B., Zhou P., Wang X. Recent Progress in On-Chip Erbium-Based Light Sources // Appl. Sci. 2022, vol. 12, p. 11712. <https://doi.org/10.3390/app122211712>.
4. Aleksandrov O. V., Zakhar'in A. O., Sobolev N. A., Nikolaev Yu. A. Electrical Properties of Silicon Layers Implanted with Erbium and Oxygen Ions in a Wide Dose Range and Thermally Treated in Different Temperature Conditions // Semiconductors. 2002, vol. 36, No. 3, pp. 358–361.
5. Гурьянов А.М., Пашин А.В., Латухина Н.В., Лебедев В.М. Распределение компонентов в кремниевых мдп-структурах с диэлектрическими пленками из оксидов редкоземельных элементов // Вестник СамГУ — Естественнонаучная серия. 2006. №2(42)., с. 147-154.
6. Wang Q., Bu R., Xu C., Zhao F., Yin H. Luminescent properties of Er^{3+} - Eu^{3+} co-doped tellurite glass for white light LEDs // Applied Physics A. 2025, vol. 131, p. 498. <https://doi.org/10.1007/s00339-025-08629-1>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ НАНОПЛЕНОК GaInP/GaP

С.Б. Донаев, Г.М. Ширинов, Р.С. Мирзаева

¹Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова
e-mail: ruhsoramirzayeva7@gmail.com

Бинарные полупроводниковые соединения типа A^3B^5 , а также многокомпонентные гетероструктуры на их основе занимают ключевое место в современной опто-, микро- и наноэлектронике. Их широкое применение обусловлено возможностью целенаправленного управления электронно-зонной структурой, концентрацией носителей заряда и спектральными характеристиками излучения. Особый научный и практический интерес представляет формирование тройных твёрдых растворов типа $Ga_{1-x}Al_xAs$ и $Ga_xIn_{1-x}P$, для которых характерна регулируемая ширина запрещённой зоны, зависящая от компонентного состава [1]. Это позволяет варьировать энергетическое положение зон и адаптировать материал под конкретные приборные задачи. К настоящему времени детально исследованы состав, кристаллическая структура, а также оптические и электронные свойства многослойных гетероструктур $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$, сформированных различными методами эпитаксиального роста. Широкое внедрение этих систем в приборы микро- и оптоэлектроники связано с их высокой структурной совершенностью, возможностью получения резких гетерограниц и стабильными параметрами зонной структуры [2]. Твёрдые растворы $Ga_xIn_{1-x}P$ с увеличенной шириной запрещённой зоны представляют особый интерес для применения в качестве верхнего p-n-перехода в tandemных солнечных элементах, а также в жёлто-зелёных светоизлучающих диодах. Однако исследование их оптических свойств, особенно в области пересечения прямой и непервой запрещённых зон, сопряжено с определёнными трудностями. Вблизи перехода от прямозонного к непрямоzonному характеру спектры люминесценции отличаются пониженной интенсивностью, что усложняет анализ механизмов рекомбинации и энергетической структуры [3]. Дополнительные сложности обусловлены отсутствием подложек с идеально согласованным параметром решётки, а также возможными эффектами упорядочения атомов в кристаллической решётке, влияющими на зонную структуру и оптические характеристики материала. В работах [4] представлены систематические исследования электронной структуры твёрдых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$ в широком интервале концентраций ($0 \leq x \leq 1$), что позволило получить детальную информацию о зависимости зонных параметров от состава и степени структурного упорядочения.

Экспериментальные исследования [5] показали, что квантовая эффективность люминесценции светодиодов на основе твёрдых растворов $Ga_xIn_{1-x}P$ существенно снижается при уменьшении длины волны излучения ниже 590 нм (что соответствует энергии фотона $> 2,1$ эВ). Данный эффект связан с изменением зонной структуры материала и перераспределением вероятностей радиационной и нерадиационной рекомбинации носителей заряда. Несмотря на существующие проблемы ограничения носителей в сплавах $Ga_xIn_{1-x}P$ с увеличенной шириной запрещённой зоны, был предложен упрощённый теоретический подход для моделирования деградации интенсивности люминесценции в зависимости от энергетического расщепления между прямой и непервой зонами [6]. Такой подход позволил количественно описать влияние зонной перестройки на оптические характеристики материала. В работе [7] плёнки $Ga_xIn_{1-x}P$ подвергались легированию ионами Te в диапазоне концентраций от $7 \cdot 10^{16}$ до $2 \cdot 10^{18}$ см⁻². Анализ спектров

фотолуминесценции показал, что переход от непрямозонного к прямозонному характеру излучения наблюдается в температурном интервале 40-100 К. При этом при комнатной температуре в спектрах фотолуминесценции доминирует излучение, обусловленное прямыми межзонными переходами, что свидетельствует о существенном изменении механизма рекомбинации носителей заряда. В последние годы для формирования наноплёнок на поверхности полупроводников и диэлектриков широкое распространение получил метод низкоэнергетической ионной имплантации в сочетании с последующей термической обработкой. Установлено, что при бомбардировке поверхности ионами Ag^+ при высоких дозах происходит обогащение приповерхностного слоя атомами Ga, тогда как при имплантации ионов металлов (например, Ba и Na) наблюдается накопление как атомов Ga, так и имплантируемого металла вблизи поверхности. Однако аналогичные систематические исследования для случая GaP, имплантированного низкоэнергетическими ионами In^+ , практически отсутствуют. Настоящая работа посвящена формированию наноплёнок GaInP/GaP(111) методом ионной имплантации In^+ в подложки GaP с последующим отжигом и исследованию их структурных и оптических свойств. Тонкие плёнки GaInP толщиной $d \approx 30\text{-}50 \text{ \AA}$ были получены имплантацией ионов In^+ в кристаллы GaP(111) с последующей термической обработкой при температуре $T \approx 950 \text{ K}$. На рис.1 представлены спектры оптического поглощения (зависимости относительной интенсивности I света, прошедшего через образец, от энергии фотона $h\nu$) для исходного GaP(111) и для GaP(111), содержащего плёнку $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ толщиной $d \approx 50 \text{ \AA}$.

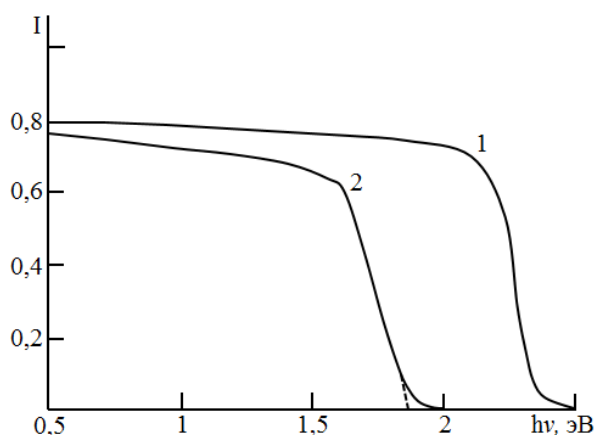


Рис.1. Спектры поглощения света GaP(111) (кривая 1), GaP(111) с нанопленкой $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ (2).

Из анализа данных, представленных на рис.1, следует, что на зависимостях $I(h\nu)$ с увеличением энергии фотона $h\nu$ значение относительной интенсивности прошедшего излучения I на начальном участке практически не изменяется, после чего наблюдается резкое уменьшение I с последующим стремлением к нулю. Для исходного GaP(111) снижение интенсивности начинается при $h\nu \approx 2,2 \text{ эВ}$, тогда как для структуры GaInP/GaP - при $h\nu \approx 1,7 \text{ эВ}$. Экстраполяция линейного участка резкого спада кривых к оси энергии фотона $h\nu$ позволяет определить ширину запрещённой зоны E_g соответствующего материала. Установлено, что значение E_g для монокристалла GaP(111) составляет приблизительно 2,36 эВ, тогда как для наноплёнки $\text{Ga}_{0,6}\text{In}_{0,4}\text{P}$ оно равно $\sim 1,85 \text{ эВ}$, что свидетельствует о существенном сужении запрещённой зоны по сравнению с подложкой.

Таким образом, в работе показано, что ширина запрещённой зоны наноплёнки GaInP ($\sim 1,85 \text{ эВ}$) значительно меньше, чем у GaP ($E_g \approx 2,36 \text{ эВ}$), что обусловлено изменением

компонентного состава и модификацией зонной структуры твёрдого раствора. Установлено также, что формирование плёнки сопровождается строгим эпитаксиальным ростом, при котором кристаллографические ориентации GaInP и GaP на границе раздела полностью совпадают, что свидетельствует о высокой структурной согласованности гетероинтерфейса.

Литература:

1. Fedorchenko I.V., Kushkov A.R., Gaev D.S., Rabinovich O.I., Marenkin S.F., Didenko S.I., Legotin S.A., Orlova M.N., Krasnov A.A. Growth method for $A^{III}B^V$ and $A^{IV}B^{VI}$ heterostructures. // Journal of Crystal Growth 483 2018, pp. 245-250.
2. Ж.И. Алферов, Ю.В. Шмарцева. Эпитаксия и гетероструктуры. / Пер. с англ. Под ред. М.: Мир, 1989. 582 с.
3. Laref S., Мес-abih S., Abbar B., Bouhafs B., Laref A. // Physica. B. 2007. Vol. 396. P. 169.
4. Красильникова Л.М., Ивонин И.В., Якубеня М.П., Максимова И.К., Арбузова Г.К. Процессы Твердотельной перекристаллизации в структурах Ni GaAs, Pd-GaAs. // Изв. вузов. Физика, Том 32, № 3, (1989). С.60-65.
5. G. Oelgart, R. Schwabe, M. Heider, and B. Jacobs, "Photoluminescence of $Al_xGa_{1-x}As$ " near the Γ -X crossover," Semicond. Sci. Technol 1997. 2, 468-474.
6. Cong Wang., Bing Wang., Riko I. Made., Soon-Fatt Yoon., and Jurgen Michel. "Direct bandgap photoluminescence from n-tupe indirect GaInP alloys." Vol. 5. No. 3 / June 2017 / Photonics Research 239-244.
7. B. E. Umirzakov., D.A. Tashmukhamedova., D. M. Muradkabilov, K. K. Boltaev. Electron spectroscopy of the nanostructures created in Si, GaAs, and CaF2 surface layers using low-energy ion implantation. Technical Physics, 2013. 58 (6), pp. 841-844.

QAUNTUM TRANSPORT AND PARTICLE STATISTICS

I.A. Muminov, A.M. Axmadjonov, A.B. Qurbonov, G.R. Madaminova

Department of Physics, Fergana State University,

E-mail: islomjonmuminov@gmail.com

As a transport phenomenon in a semiconductor, the transport of electrons (charge and spin) is often considered, but some quasiparticles baring transport behave differently from electrons. We will have a look how we apply the quantum transport theory (or not apply).

In the previous section, we have introduced the Landauer formula to treat the electric conduction in semiconductor quantum structures. In the discussion, we assumed the transport of electrons and used the unit charge and the Fermi distribution in the derivation. And the conductance quantization is derived from the anti-bunching of fermions on quantum wires. On the other hand, in order to calculate the transmission coefficient T_{ij} , we have introduced T -matrices and S matrices scheme.

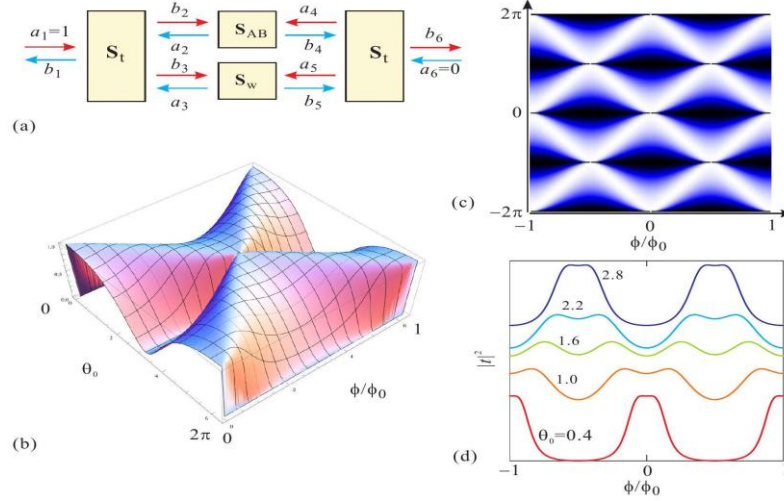


Fig. 1 (a) S-matrix modeling of an AB ring. (b) The transmission coefficient of the AB ring $|t|^2$ is plotted (surface plot) as a function of the phase shift from the path difference (θ_0) and the magnetic flux piercing the ring ϕ/ϕ_0 . (c) Color plot of the same calculation over a bit wider region. (d) The same transmission coefficient as a function of ϕ/ϕ_0 with θ_0 as a parameter. The AB oscillation of period ϕ_0 once disappears around $\theta_0 = 1.6$ and then the reverted oscillation, that is, with π -shift in the phase appears.

These are only to calculate the transmission and reflection of waves without the relation to the particle statistics. Hence the method should be applicable regardless of particle statistics. Let us have a look on bunching and anti-bunching properties. The wavefunction for identical two particles is in real coordinate representation as

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} [\phi_1(\mathbf{r}_1)\phi_2(\mathbf{r}_2) \pm \phi_1(\mathbf{r}_2)\phi_2(\mathbf{r}_1)]. \quad (1)$$

In the double sign, + corresponds to bosons, and - to fermions.

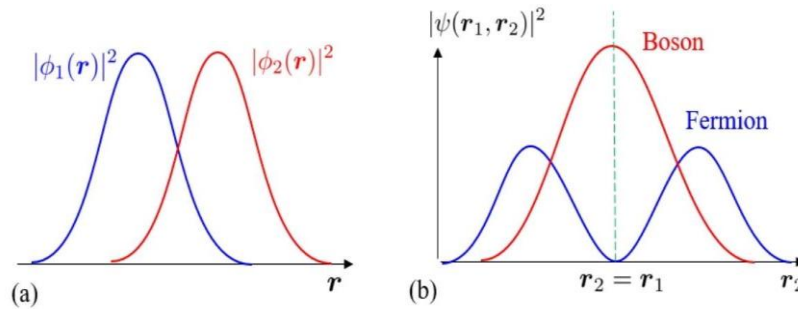


Fig. 2 (a) Schematic probability densities in coordinate representation $|\phi_1(\mathbf{r})|^2, |\phi_2(\mathbf{r})|^2$ of one-particle wavefunctions. The two wavefunctions have a partial overlap. (b) In the case of (a), the spatial probability density of particle 2 is plotted as a function of coordinate $\mathbf{r}_2$ with taking the position of the particle 1 $\mathbf{r}_1$ as the origin in the two-particle wavefunction ψ in.

As shown in Fig. 2(a), we consider gaussian shaped wavefunctions $\phi_{1,2}(\mathbf{r})$ with partial overlap. Figure 2(b) shows the probability density of the two-particle wavefunction versus the relative position. As we can easily see by putting $\mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_1$, the probability densities are

$$|\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1)|^2 = \begin{cases} 2|\phi_1(\mathbf{r}_1)|^2|\phi_2(\mathbf{r}_1)|^2 & (\text{boson}), \\ 0 & (\text{fermion}). \end{cases} \quad (2)$$

That is, in the case of bosons, the probability density is twice the case of single particle while in the case of fermions the density is zero. This means that the bunching occurs for bosons while the anti-bunching occurs for fermions. The discussion of (1)~(3), which leads to the Landauer

formula can be understood in this context of anti-bunching. That is, the difference in the chemical potentials of two electron reservoirs, eV is the energy window to be used to form the wave packets of electrons i.e., $\Delta E \sim eV$. The time for such a wave packet to go through a point in the real space is, from the uncertainty relation, $\Delta t = h/\Delta E = h/eV$. From the anti-bunching property or Fermi statistics, a single wave packet can accommodate a single electron (if the spin degree of freedom is taken into account, two electrons). Then the current flowing through the one-dimensional system is $J = e/\Delta t = (e^2/h)V$ (with spin freedom, $(2e^2/h)V$), which results in the same conclusion in the previous section. The above discussion is the same calculation of that done in the k -space though it gives an important insight of the flow of electrons on quantum wires. When the conductance is quantized in such a quantum wire, the electrons flow with the time interval of h/eV . As is described in the shot noise section of 2, the current flow is approximated as a periodic series of delta-functions and the shot noise disappears. In the Landauer's discussion, the conductance quantization is the consequence of the fermion's anti-bunching property and the above consideration means that can be experimentally confirmed through shot noise measurement.

We expand the above to quantum wires with transmission coefficients $\mathcal{T}$ less than 1 to get $G = \mathcal{T}G_q$. In this case, there appear free spaces between the wave packet due to the electron reflection and the packing of electrons becomes stochastic to some degree. This state can be viewed as follows. A perfectly ordered series of wave packets are occupied by electrons with probability $\mathcal{T}$, by holes with probability $1 - \mathcal{T}$. Identical electrons (also holes) cannot be distinguished and the number of cases for vacancies, i.e. the degree of randomness is proportional to $\mathcal{T}(1 - \mathcal{T})$. In the limit $\mathcal{T} \rightarrow 0$, this goes to Eq. (2) and with using the relation $J = 2\mathcal{T}G_q V$ for voltage V , the noise power spectrum is given as.

$$S \equiv \frac{\langle (\delta J)^2 \rangle}{\Delta f} = 2e \frac{2e^2}{h} V \mathcal{T}(1 - \mathcal{T}). \quad (3)$$

The above S is suppressed from S_{Poisson} in Eq. (3) by factor $1 - \mathcal{T}$. Generally, we refer to Fano factor as the ratio of variance to the average. In the present case that corresponds to the ratio of the shot noise to the Poisson noise and is $1 - \mathcal{T}$.

References:

1. Datta, S. (1995). *Electronic Transport in Mesoscopic Systems*. Cambridge University Press.
2. Datta, S. (2005). *Quantum Transport: Atom to Transistor*. Cambridge University Press.
3. Imry, Y. (2002). *Introduction to Mesoscopic Physics* (2nd ed.). Oxford University Press.
4. Nazarov, Y. V., & Blanter, Y. M. (2009). *Quantum Transport: Introduction to Nanoscience*. Cambridge University Press.
5. Ferry, D. K., Goodnick, S. M., & Bird, J. (2009). *Transport in Nanostructures* (2nd ed.). Cambridge University Press.
6. Beenakker, C. W. J., & van Houten, H. (1991). Quantum transport in semiconductor nanostructures. In *Solid State Physics* (Vol. 44, pp. 1–228). Academic Press.
7. Landauer, R. (1957). Spatial variation of currents and fields due to localized scatterers in metallic conduction. *IBM Journal of Research and Development*, 1(3), 223–231.
8. Landauer, R. (1970). Electrical resistance of disordered one-dimensional lattices. *Philosophical Magazine*, 21(172), 863–867.

**OLTINGUGURT VA RUX BILAN KETMA-KET LEGIRLANGAN
MONOKRISTALL KREMNIYNING ELEKTROFIZIK XOSSALARI VA Si–ZnS
KLASTERLARINING HOSIL BO‘LISH MEXANIZMI**

G.O. Abdurazzoqova

*O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika
ilmiy-tadqiqot instituti*

So‘nggi yillarda yarimo‘tkazgichlar fizikasida asosiy yo‘nalishlardan biri - kremniy kristall panjarasida nanoo‘lchamli klasterlarni shakllantirish va ular orqali material xossalarini boshqarish hisoblanadi. Ayniqsa, turli valentlikka ega bo‘lgan kirishma atomlarning o‘zaro ta’siri natijasida yangi lokal bog‘lanish markazlari hosil bo‘lishi kremniyning elektrofizik va optik xossalarini maqsadli o‘zgartirish imkonini beradi. Zn va S atomlari kremniyda mos ravishda akseptor va donor sathlar hosil qilishi sababli, ularning bir kristall panjarada bir vaqtda mavjud bo‘lishi elektrostatik tortishuv orqali murakkab nuqson-komplekslar va ZnS tipidagi bog‘langan klasterlar hosil bo‘lishiga olib kelishi mumkin [1]. Ushbu ishda aynan shu jarayonning elektrofizik jihatlarini o‘rganildi.

Tadqiqotlar uchun boshlang‘ich material sifatida fosfor bilan legirlangan, n -tipli o‘tkazuvchanlikka ega monokristall kremniy (Si–100) tanlandi. 1-bosqichda oltingugurt diffuziyasi amalga oshirildi. Namunalar oltingugurt bilan birga vakuumlangan kvarts ampulalarga joylashtirildi ($P = 10^{-5}$ – 10^{-6} mm.sim.ust.) va bosqichma-bosqich xarorat ko‘tarildi: 550°C gacha sekin ko‘tarildi va ma’lum vaqt ushlab turildi. So‘ng 1250°C gacha qizdirilib, diffuziya amalga oshirildi. Bu bosqichda S atomlari kremniy panjarasiga kirib, chuqur donor sathlar hosil qildi. 2-bosqichda rux diffuziyasi amalga oshirildi. Bu bosqichda S bilan legirlangan namunalar rux bilan birga yana vakuumlangan ampulalarga joylashtirildi va 1200°C da diffuziya qilindi. Natijada kremniy panjarasida donor (S) va akseptor (Zn) kirishmalar bir vaqtning o‘zida mavjud bo‘ldi.

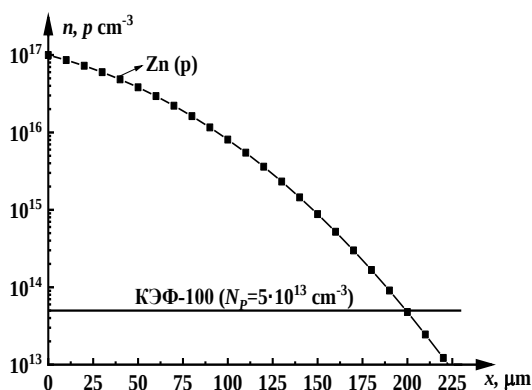
Qatlamma-qatlam yemirish usuli yordamida o‘tkazilgan tahlillar shuni ko‘rsatdiki, ketma-ket diffuziyadan so‘ng kremniy hajmida Zn va S atomlarining notekis taqsimoti yuzaga keladi. Ma’lum chuqurliklarda ularning konsentratsiyasi kesishadigan sohalarda Si_2ZnS tipidagi klaster tuzilmalar hosil bo‘lishi ehtimoli yuqori. Bu jarayonni quyidagicha tushuntirish mumkin: S kremniyda donor bo‘lib, ionlashganda musbat zaryadlangan markaz hosil qiladi. Zn esa akseptor bo‘lib, manfiy zaryadlangan markaz hosil qiladi. Qarama-qarshi zaryadlangan bu markazlar o‘zaro tortishadi. Yuqori haroratda diffuziya kuchayib, ular energetik jihatdan barqaror Zn–S bog‘langan komplekslar hosil qiladi. Bu komplekslar oddiy nuqson emas, balki lokal ravishda panjara potensialini o‘zgartiruvchi klaster tuzilmalardir.

Diffuziya jarayonidan so‘ng rux aralashmalari atomlarining kremniy monokristaliga kirib borish chuqurligining konsentratsiyaga bog‘liqligi 1-rasmda ko‘rsatilgan.

850°C da 1 soat davomida olib borilgan qo‘shimcha issiqlik ishlovi klaster hosil bo‘lish jarayonini sezilarli kuchaytirdi. Termik faollashuv natijasida:

- Zn va S ionlarining migratsiyasi ortadi. Ularning o‘zaro uchrashish ehtimoli ko‘payadi.
- Hosil bo‘lgan komplekslar yanada barqarorlashadi

Tajriba natijalari shuni ko‘rsatdiki, qo‘shimcha issiqlik ishlovidan so‘ng ZnS tipidagi bog‘lanishlar hosil bo‘lgan qatlamning chuqurligi deyarli ikki baravar ortgan. Bu esa klasterlar hajm bo‘ylab ko‘proq shakllanganini bildiradi.



1-rasm. Rux kirishma atomlarining monokristalli kremniy namunasiga kirish chuqurligiga nisbatan konsentratsiya

Elektrofizik xossalardagi o'zgarishlar

Hall o'lchovlari natijalari shuni ko'rsatdiki, ketma-ket diffuziyadan so'ng:

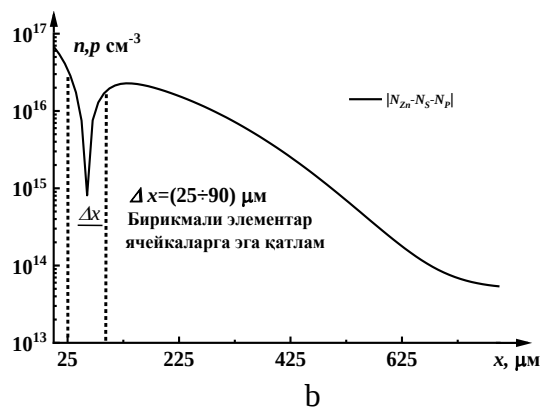
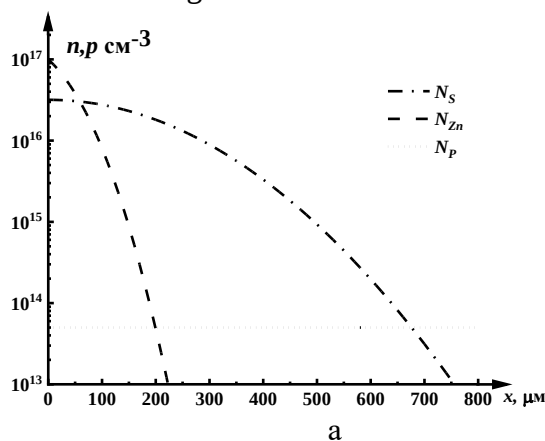
Tashuvchilar konsentratsiyasi o'zgaradi

Harakatchanlik kamayadi

Ba'zi sohalarda o'tkazuvchanlik turi almashishi mumkin

Harakatchanlikning kamayishi ZnS tipidagi klasterlarning zaryad tashuvchilar uchun qo'shimcha sochilish markazlari vazifasini bajarishi bilan tushuntiriladi. Bu klasterlar lokal elektr maydonlarini hosil qilib, zaryad tashuvchilarning erkin harakatini cheklaydi.

2a va 2b rasmda oltingugurt va rux aralashmalari atomlarining ketma-ket diffuziyadan so'ng bir kristalli kremniyda taqsimlanishi, shuningdek, Si_2ZnS tuzilishli binar birikmalarning hosil bo'lishi ko'rsatilgan.



a) Monokristalli kremniyda Si_2ZnS tuzilmali binar birikmalarning bir-biriga ko'p taqsimlanishi.

b) Monokristall kremniy ustida Si_2ZnS strukturali binar birikmalar qatlamining hosil bo'lishi

850–875°C da olib borilgan ishlov kristall panjarada lokal qayta tuzilish jarayonlarini yuzaga keltirishi mumkin. Bu esa oddiy nuqsonlar emas, balki yangi turdagi bog'langan mikrosohalar shakllanishini anglatadi. Bunday o'zgarishlarni tasdiqlash uchun rentgen difraktsiya (XRD) va Raman spektroskopiya tadqiqotlari maqsadga muvofiqdir.

Oltingugurt va rux atomlarini ketma-ket diffuziya qilish natijasida kremniy kristall panjarasida o'zaro bog'langan Zn–S tipidagi klasterlar hosil bo'lishi aniqlandi. Ushbu klasterlar:

- qo'shimcha issiqlik ishlovi ta'sirida shakllanishini kuchaytiradi
- zaryad tashuvchilar harakatchanligini kamaytiradi
- kremniyning elektrofizik xossalarini sezilarli darajada o'zgartiradi

Bu natijalar kremniy asosidagi yangi funksional materiallar yaratishda kirishma klasterlar orqali xossalarni boshqarish mumkinligini ko'rsatadi.

Adabiyotlar:

1. M.K. Khakkulov, A.Sh. Mavlyanov, O.E. Sattarov, N.A. Akbarova, and Kh.K. Kamalova. Formation of Binary Compounds of Impurity Atoms of Sulfur and Zinc in Silicon/Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2024, Vol. 60, No. 6, pp. 826–830. © Allerton Press, Inc., 2024.

Si SUBSTRATLARDA Ge ORALIQ QATLAMI ASOSIDA (Ge)_{1-x-y}(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_x(ZnSe)_y QATTIQ ERITMALARINI SUYUQ FAZALI EPITAKSIYA USULIDA O'STIRISH TEXNOLOGIYASI

A.Y. Boboyev, U.R. Karimberdiyev, M.M. Arabboyeva, G.I. Numonjonova.

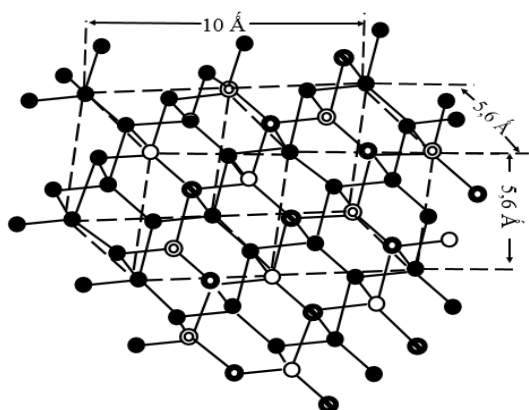
Andijon davlat universiteti

So'nggi yillarda kremniy asosidagi mikroelektronika va fotonika tizimlarini rivojlantirishda III–V hamda II–VI guruh yarimo'tkazgich birikmalarini Si substratlar bilan integratsiyalash muhim ilmiy-amaliy masalalardan biri bo'lib qolmoqda. GaAs va ZnSe kabi materiallar to'g'ridan-to'g'ri zonali tuzilishga ega bo'lgani sababli optoelektron qurilmalar, yorug'lik chiqaruvchi elementlar va fotoqabul qilgichlar yaratishda katta ahamiyatga ega. Biroq ularni Si substratlarda bevosita o'stirish jarayonida kristall panjara parametrlarining mos kelmasligi, issiqlik kengayish koeffitsiyentlarining farqi va strukturaviy nuqsonlarning paydo bo'lishi asosiy muammolardan hisoblanadi[1].

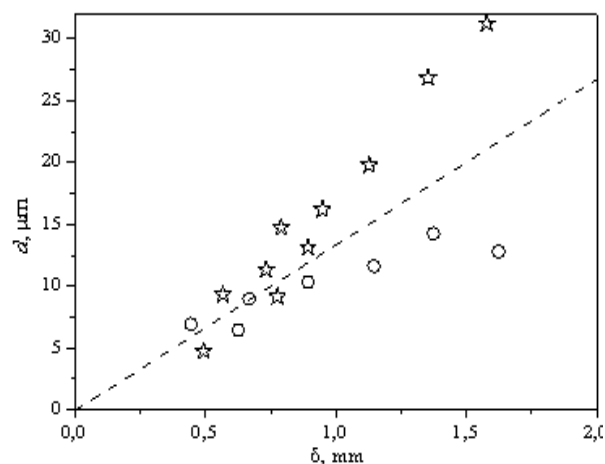
Mazkur muammolarni kamaytirish uchun Ge oraliq qatlamidan foydalanish samarali yondashuvlardan biri hisoblanadi. Ge oraliq qatlami Si substrat bilan GaAs va ZnSe asosidagi epitaksial qatlamlar orasida o'tish sohasi vazifasini bajaradi hamda kristall panjaradagi nomuvofiqlikni qisman kamaytirishga xizmat qiladi[2]. Qattiq eritmalar Si substratlarda Ge oraliq qatlami ishtirokida suyuq fazali epitaksiya usuli orqali o'stirildi. Eritma-qotishma sifatida Bi asosidagi eritmadan foydalanildi. Epitaksial o'sish jarayoni palladiy orqali tozalangan vodorod atmosferasida amalga oshirildi. Kristallanish jarayoni 750–650 °C harorat oralig'ida, majburiy sovitish sharoitida olib borildi. Sovitish tezligi taxminan 1 °C/min etib tanlandi.

Tajribalarda substratlar orasidagi masofa, eritma tarkibi, boshlang'ich epitaksiya harorati va sovitish tezligining qatlam hosil bo'lishiga ta'siri o'rganildi. Ayniqsa, substratlar orasidagi bo'shliqning epitaksial qatlam qalinligi va strukturaviy sifatiga ta'siri alohida tahlil qilindi.

Tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki, epitaksial qatlamlarning o'sishi substratlar orasidagi masofaga kuchli bog'liq. Optimal sharoitda substratlar orasidagi masofa taxminan 0,8 mm bo'lganda qatlam o'sishi barqaror kechadi. Bunday holatda massa ko'chishi asosan molekulyar diffuziya hisobiga yuz beradi va kristall qatlamning bir jinsliliigi yaxshilanadi.



**1-rasm. Qattiq eritma
molekularidagi tetraedrik
bogʻlarning fazoviy konfiguratsiyasi**



**2-rasm. $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}\delta)_x(\text{ZnSe})_y$
qattiq eritmaları epitaksial qatlamlari
qalinligining substratlar orasidagi masofaga
bogʻliqligi.**

Substratlar orasidagi masofa 0,8 mm dan ortganda eritmada tabiiy konveksiya jarayonlari kuchayadi. Bu esa massa koʻchishining notekis boʻlishiga, yuqori va pastki substratlarda hosil boʻladigan qatlamlarning qalinligi hamda sifatida farq paydo boʻlishiga olib keladi. Natijada kristall strukturaning mukammalligi pasayishi mumkin[3]. Tadqiqotda Bi eritmasida Ge_2 , GaAs va ZnSe komponentlari molekulyar komplekslar holida mavjud boʻlishi va kristallanish jarayonida molekulyar almashinish turidagi qattiq eritma hosil qilishi koʻrsatildi. Bu holat Ge_2 , GaAs va ZnSe birikmalarining uzluksiz qattiq eritma hosil qilish imkoniyatini tasdiqlaydi.

Si substratlarda Ge oraliq qatlami yordamida $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}\delta)_x(\text{ZnSe})_y$ qattiq eritmalarini suyuq fazali epitaksiya usulida oʻstirish mumkinligi aniqlandi. Yuqori sifatli epitaksial qatlam olish uchun 750–650 °C harorat oraligʻi, 1 °C/min sovitish tezligi va 0,8 mm atrofidagi substratlararo masofa eng maqbul sharoit hisoblanadi. Ge oraliq qatlamidan foydalanish Si asosidagi optoelektron va mikroelektron qurilmalar uchun yangi koʻp komponentli yarimoʻtkazgich tuzilmalarni yaratishda istiqbolli texnologik yechim boʻlib xizmat qiladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. D.S. Abramkin, M.O. Petrushkov, M.A. Putyato et al., Semiconductors, 53, 1143–1147 (2019); <https://doi.org/10.1134/S1063782619090021>
2. P.V. Seredin, D.L. Goloshchapov, I.N. Arsenyev et al., Semiconductors, 55, 44–50 (2021); <https://doi.org/10.1134/S1063782621010139>
3. N.Y. Yunusaliyev, Eur. J. Phys. 4, 439 (2024); <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-4-52>

CONDENSATION OF EXCITON-POLARITON

U.Q. Omonova, F.R. Muxamadiyeva, D.B. Ahmadjonova, A.A. Mashrabboyev

Master's Students of the Department of Physics, Fergana State University

E-mail: islomjonmuminov@gmail.com

While electrons are the representative of fermions flowing through quantum circuits, as we have seen above, E-Ps in microcavities is a system, with which we can explore the boson flow through quantum circuits experimentally. The consequence of Fermi statistics on fermion flow in quantum circuits is the conductance quantization and the reduction of shot noise. On the other hand, bunching of the identical particles is the characteristics of the Bose statistics. As a result, Bose-Einstein condensation (BEC) or similar phenomenon with condensation occurs. The stimulated emission is also a phenomenon similar to the boson bunching, and photons in a cavity of a laser can be viewed as a kind of condensation though the lasing occurs in non-equilibrium open systems while BEC is a phenomenon in equilibrium. There is thus a clear difference [1,2]. Figure 1 shows the diagram of refractive index in the cavity prepared for the observation of BEC. This figure also shows the energy density of electric field along z-axis in the mode localized at the center of cavity, which is calculated with T-matrix method. T-matrice and S-matrices are thus used to calculate various quantities related to wave propagations.

A short summary on BEC of three-dimensional ideal boson gas is given in conclusion. As the expression of the critical temperature T_c in Eq. (1), the lighter the effective mass is, and also the higher the particle density is, the higher T_c becomes. Conversely, when the mass and the temperature are given, the critical particle density for BEC to appear is defined. Figure 1(a) illustrates the process of creation of a BEC with laser light irradiation on the cavity system. In the beginning of the process, many E-Ps with high energies are excited with the lase pulse. They emit energies as phonons to the crystal and are cooled down. If the laser power is higher than the critical value P_{th} , as cooling, a BEC is created and a macroscopic number of E-Ps fall into the lowest energy state. In Fig. 1(b), the wavenumber-energy distributions of E-Ps measured from light leakage, are given around the BEC critical power.

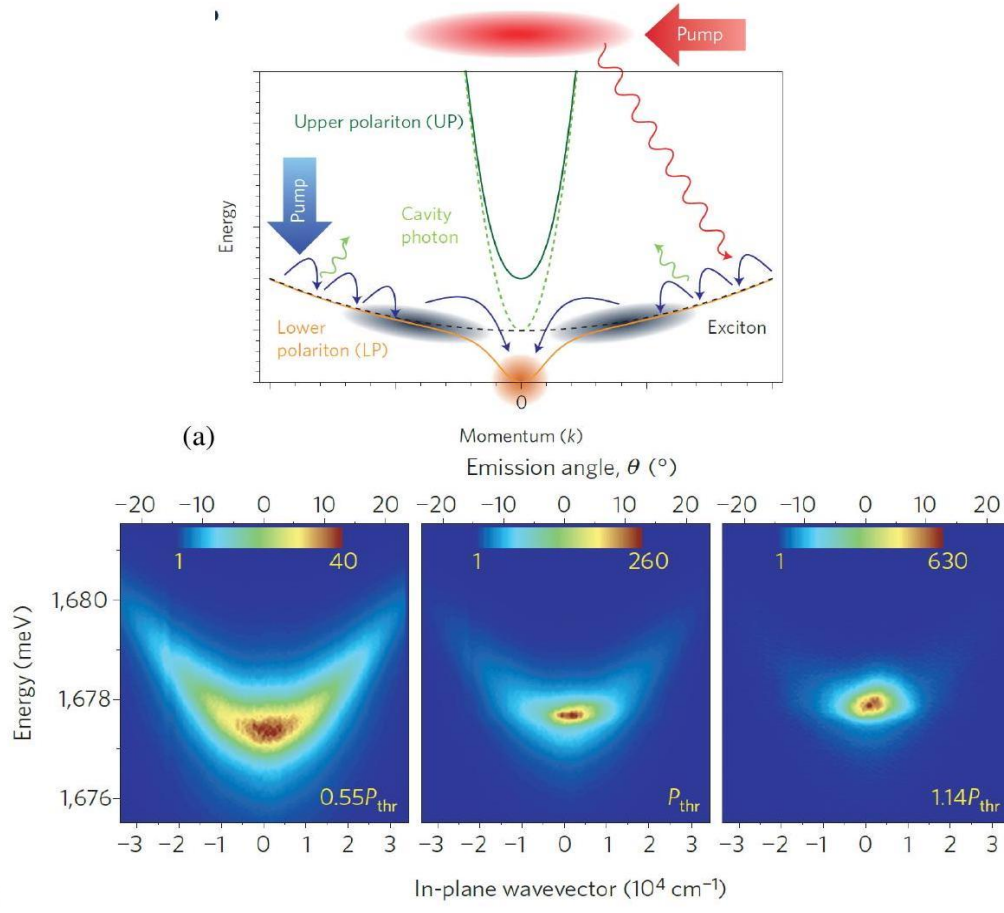


Fig. 1 (a) Conceptual diagram illustrating the "cooling" process for micro-cavity E-P to cause BEC. (b) Distribution of E-Ps in the space of wavenumber and the energy measured from the optical emission. P_{thr} is the critical excitation power to create E-Ps with the critical particle density for BEC. from.

Here we need to be careful about the meaning of "BEC." The present E-P system is composed of modes confined to a 2-dimensional plane and 3-dimensional BEC in eq.2 cannot be directly applied. In the space with dimension lower than or equal to 2, no infinitely long range order does not exist as mentioned in Mermin-Wagner theorem [3]. Instead, Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) transition occurs and the order decays with some power of the distance[2]. Actually, the existence of BKT transition was evidenced in detailed analysis of experiments. And the observation of vortexpair is announced. There are so many reports on the BEC of E-P systems and the research is active both in theory and experiment.

Here a short supplement on the structure of waveguide for laser diode (LD) is given. Let us consider the Fabry-Pérot type LD with waveguide (cavity) length L . Let m_j , $\bar{n}$ and λ be an integer, the refractive index, and the wavelength in the vacuum respectively, then the condition of resonance is

$$m_j \frac{\lambda}{\bar{n}} = 2L. \quad (1)$$

Therefore the interval in the resonant wavelengths and that in the resonant frequencies are

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L\bar{n}}, \Delta\nu = \frac{c}{2L\bar{n}}, \quad (2)$$

respectively. In usual systems, $\lambda \ll L$. When the amount of carrier injection is large and the luminescence is broad in wavelength, precise determination of l is not required mostly and multi-

mode oscillation around a center wavelenth is observed. In the above, we write the light intensity simply as $I_0 \exp(-\alpha'z)$. Then α' can be expanded as $I(z) = I_0 \exp((g - \alpha)z)$, where g is the optical gain, α is the material specific absorption coefficient. Let us write the reflection ratio of the two mirrors as R_1 and R_2 respectively, then the condition for the amplification to occur is

$$R_1 R_2 \exp[(g - \alpha)2L] > 1.$$

Thus the threshold optical gain g_{th} for the total amplification is

$$g_{th} = \alpha + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right). \quad (3)$$

The refractive index $\bar{n}_1$ is common for both sides of the homo pn-junction, while the refractive index in the active layer $\bar{n}_2$ is larger than $\bar{n}_1$. z -axis is taken as in the figure and we consider the electromagnetic wave propagate along the z -axis. The propagation mode is transverse electric (TE), i.e., the electric field along z axis is absent ($\mathcal{E}_z = 0$). Also the mode is assumed to be uniform in y direction. Thus we only need to consider the electric field in y direction, which is determined from

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \mathcal{E}_y = 0. \quad (4)$$

The change of magnetic permeability in semiconductors from the vacuum is little then we use μ_0 here.

We treat the system as a waveguide and look for a solution of standing wave on x and propagating wave on z . Then we find a solution inside the active layer ($|x| \leq d/2$) as

$$\mathcal{E}_y(x, z, t) = A \cos(\kappa x) \exp[i(\omega t - \beta z)],$$

where

$$\kappa^2 = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 - \beta^2 = \bar{n}_2^2 k_0^2 - \beta^2, k_0 = \frac{\omega}{c^* \bar{n}_2}. \quad (5)$$

And outside the active layer ($|x| > d/2$), the solution should decay with $|x| \rightarrow \infty$. The condition of connection at $x = \pm d/2$, $\mathcal{E}_y$ restricts the solution to

$$\mathcal{E}_y(x, z, t) = A \cos\left(\frac{\kappa d}{2}\right) \exp\left[-\gamma\left(|x| - \frac{d}{2}\right)\right] \exp[i(\omega t - \beta z)]. \quad (6)$$

Equation (4) requires

$$\gamma^2 = \beta^2 - \bar{n}_1^2 k_0^2. \quad (7)$$

From Maxwell equation, the continuity in z -component of magnetic field at $x = \pm d/2$ requires

$$\tan\left(\frac{\kappa d}{2}\right) = \frac{\gamma}{\kappa} = \frac{\sqrt{\beta^2 - \bar{n}_1^2 k_0^2}}{\sqrt{\bar{n}_2^2 k_0^2 - \beta^2}}. \quad (8)$$

The values of κ , γ and β are determined from the above equations. Because tangent is a π -periodic function, there are multiple solutions, each of which forms a discrete mode.

References:

1. Kasprzak, J., Richard, M., Kundermann, S., Baas, A., Jeambrun, P., Keeling, J. M. J., Marchetti, F. M., Szymanska, M. H., Andre, R., Staehli, J. L., Savona, V., Littlewood, P. B., Deveaud, B., & Dang, L. S. (2006). Bose-Einstein condensation of exciton polaritons. *Nature*, 443, 409–414. <https://doi.org/10.1038/nature05131>

2. Deng, H., Weihs, G., Santori, C., Bloch, J., & Yamamoto, Y. (2002). Condensation of semiconductor microcavity exciton polaritons. *Science*, 298(5591), 199–202. <https://doi.org/10.1126/science.1074464>
3. Balili, R., Hartwell, V., Snoke, D., Pfeiffer, L., & West, K. (2007). Bose–Einstein condensation of microcavity polaritons in a trap. *Science*, 316(5827), 1007–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1140990>
4. Carusotto, I., & Ciuti, C. (2013). Quantum fluids of light. *Reviews of Modern Physics*, 85, 299–366. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.299>
5. Byrnes, T., Kim, N. Y., & Yamamoto, Y. (2014). Exciton–polariton condensates. *Nature Physics*, 10, 803–813. <https://doi.org/10.1038/nphys3143>

(Ge₂)_{1-x-y}(GaAs_{1-δ}Bi_δ)_x(ZnSe)_y EPITAKSIAL QATLAMLARINING STRUKTURAVIY VA ELEKTROFIZIK XUSUSIYATLARI

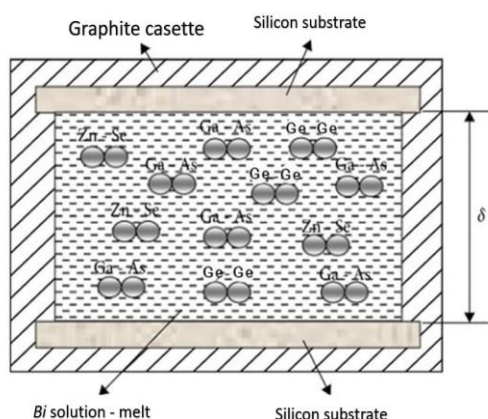
A.Y. Boboyev, U.R. Karimberdiyev, F.A. Abdulkhayev, M.M. Arabboyeva.

Andijon davlat universiteti

Yarimoʻtkazgich materiallarning strukturaviy va elektrofizik xususiyatlarini boshqarish zamonaviy optoelektronika, fotonika va nanoelektronika qurilmalarini yaratishda muhim ahamiyatga ega. Si asosidagi qurilmalar keng qoʻllanilishiga qaramay, kremniyning bilvosita zonali yarimoʻtkazgich ekanligi uning optik xususiyatlarini cheklaydi. Shu sababli GaAs va ZnSe kabi toʻgʻridan-toʻgʻri zonali materiallarni Si texnologiyalari bilan integratsiyalash dolzarb masala hisoblanadi. Ge, GaAs va ZnSe komponentlari asosidagi qattiq eritmalar Si asosidagi optoelektron qurilmalar uchun istiqbolli materiallar qatoriga kiradi. Bunday qatlamlarning sifati ularning tarkibi, kristallanish sharoiti, massa koʻchish mexanizmi va texnologik parametrlariga bevosita bogʻliq[1]. Epitaksial qatlamlar Bi tarkibli eritma-qotishmadan suyuq fazali epitaksiya usuli yordamida oʻstirildi. Jarayon 750–650 °C harorat oraligʻida va 1 °C/min sovitish tezligida olib borildi. Qatlamlarning oʻsishida Ge₂, GaAs va ZnSe komponentlarining Bi eritmasidagi eruvchanligi hamda kristallanish chegarasida molekulyar komplekslar hosil qilishi hisobga olindi.

Qatlamlarning strukturaviy sifati substratlar orasidagi masofa, boshlangʻich epitaksiya harorati va sovitish tezligiga bogʻliq holda baholandi. Shuningdek, olingan qatlamlarning qalinligi, oʻtkazuvchanlik turi, solishtirma qarshiligi va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi tahlil qilindi.

Tadqiqot natijalariga koʻra, olingan epitaksial qatlamlarning qalinligi 10 mkm gacha yetishi mumkinligi aniqlandi. Hosil qilingan qatlamlar p-tip oʻtkazuvchanlikka ega boʻlib, ularning solishtirma qarshiligi taxminan 10 Ω·cm, zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi esa 1,5·10¹⁶ cm⁻³ atrofida boʻlgan[2]. Epitaksial qatlamlarning tarkibi chuqurlik boʻyicha gradient xususiyatga ega ekanligi kuzatildi. Maqolada keltirilgan maʼlumotlarga koʻra, 1 mkm chuqurlikda GaAs miqdori 15 % dan, ZnSe miqdori esa 12 % dan oshmagan. Bu holat qatlam tarkibining kristallanish jarayonida bosqichma-bosqich oʻzgarishini koʻrsatadi. 750 °C haroratda ayrim hollarda nanoklasterlar hosil boʻlishi kuzatilgan.



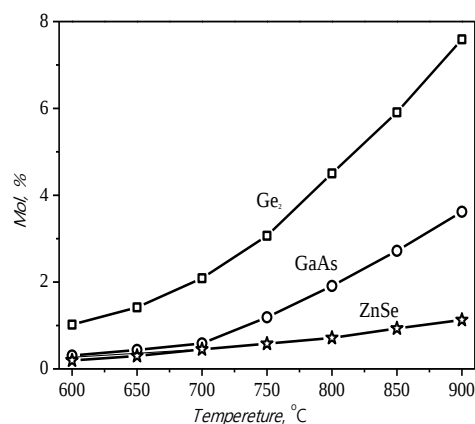
1-rasm. Kristallanish jarayonida $\delta > 0,8$ mm bo'lganda substratlar orasidagi eritma-qotishmada komponentlarning taqsimlanish diagrammasi.

Bu hodisa komponentlarning kristall panjara parametrlaridagi farq va issiqlik kengayish koeffitsiyentlarining nomuvofiqligi bilan izohlanadi. Bunday nuqsonlar qatlamning elektrofizik xususiyatlariga ta'sir qilishi mumkin. Shu sababli epitaksial o'sish sharoitlarini aniq nazorat qilish zarur[3].

Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, sovitish tezligining ortishi strukturaviy nuqsonlar hosil bo'lish ehtimolini oshiradi. Past sovitish tezligi esa atomlarning kristall panjarada tartibli joylashishiga yordam beradi. Shuningdek, 0,8 mm atrofidagi substratlararo masofa diffuzion o'sish rejimini ta'minlab, qatlamning bir jinsli va nisbatan mukammal hosil bo'lishiga xizmat qiladi. $(\text{Ge}_2)_{1-x-y}(\text{GaAs}_{1-\delta}\text{Bi}\delta)_x(\text{ZnSe})_y$ epitaksial qatlamlari Si substratlarda Ge bufer qatlami yordamida yuqori sifatda o'stirilishi mumkin. Olingan qatlamlarning p-tip o'tkazuvchanlikka ega bo'lishi, solishtirma qarshiligi va zaryad tashuvchilar konsentratsiyasi ularning optoelektron qurilmalarda qo'llash uchun istiqbolli ekanligini ko'rsatadi. Qatlam sifatini yaxshilashda sovitish tezligi, substratlararo masofa va boshlang'ich epitaksiya harorati asosiy boshqariluvchi texnologik parametrlar hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar.

1. O. Nakatsuka, S. Zaima, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 1301–1318 (2015); <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63304-0.00032-9>
2. Y. Du, B. Xu, G. Wang et al., Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 32, 6425–6437 (2021); <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05360-4>
3. G. Calbi, M. O. Fernando, E. W. et al., RSC Advances, 14, 1250–1257 (2024); <https://doi.org/10.1039/D3RA06774B>



2-rasm. Ge₂, GaAs va ZnSe ning Bi dagi eruvchanligining haroratga bog'liqligi.

BOSE-EINSTEIN CONDENSATION OF IDEAL GAS

G.U. To‘xtarova, A.R. Maxmudov, Sh.E. Xomidjonov, O.Yu. Nazirova

Master’s Students of the Department of Physics, Fergana State University

E-mail: islomjonmuminov@gmail.com,

Bose–Einstein condensation (BEC) is one of the most remarkable quantum phenomena predicted by quantum statistical mechanics. It occurs when a dilute gas of bosonic particles is cooled to extremely low temperatures, near absolute zero. Under such conditions, a large fraction of the particles occupy the lowest quantum state, leading to the emergence of macroscopic quantum behavior. Unlike classical gases, where particles behave independently, a Bose gas at sufficiently low temperature exhibits collective quantum properties governed by Bose–Einstein statistics.

The theoretical foundation of Bose–Einstein condensation was established in 1924–1925 through the work of Satyendra Nath Bose and Albert Einstein. Einstein extended Bose’s statistical treatment of photons to massive particles and predicted that below a critical temperature T_c , the occupation number of the ground state would increase dramatically.

Let us consider spin 0 ideal Bose gas. For the Bose distribution

$$f(\epsilon) = \frac{1}{e^{(\epsilon-\mu)\beta} - 1} \quad (\beta \equiv (k_B T)^{-1}), \quad (1)$$

we define the point of $\mu = 0$ as follows. At $T = 0$, from (1) all the particles fall into the ground state, there we define

$$\mu(T = 0) = 0. \quad (2)$$

At finite temperatures, let N be the number of particles in the system:

$$N = \sum_i f(\epsilon_i)$$

In the usual case we can write

$$N \rightarrow \int f(\epsilon) \mathcal{D}(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

Here the number of particle at the ground state N_0 should be

$$N_0 = \frac{1}{e^{-\mu\beta} - 1} \sim \frac{1}{-\mu\beta} = -\frac{k_B T}{\mu} \rightarrow \mu \sim -\frac{k_B T}{N_0}. \quad (4)$$

If we calculate the particle distribution on this line, for three dimensional ideal gas

$$\epsilon(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \text{ then } \mathcal{D}(\epsilon) = \frac{m^{3/2} V}{\sqrt{2\pi^2 \hbar^3}} \sqrt{\epsilon} \quad (5)$$

Therefore

$$N = \frac{V m^{3/2}}{\sqrt{2\pi^2 \hbar^3}} \int_0^\infty \frac{\sqrt{\epsilon}}{e^{(\epsilon-\mu)\beta} - 1} d\epsilon = \frac{(m k_B T)^{3/2}}{\sqrt{2\pi^2 \hbar^3}} V \int_0^\infty \frac{\sqrt{x}}{e^{x-\alpha} - 1} dx \quad (6)$$

where $x \equiv \epsilon\beta$ and $\alpha \equiv \mu\beta$. We write the definite integral term as $I(\alpha)$, then I is

$$I(0) = \int_0^\infty \frac{\sqrt{x}}{e^x - 1} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \zeta\left(\frac{3}{2}\right) \sim 2.6 \quad (7)$$

which decreases with increasing of the absolute value of $\alpha < 0$. Then, in this logic, with $T \rightarrow 0$ the maximum number of N determined from (6) goes to zero. It is apparent that we

have dropped something from the counting. That is, of course, the macroscopic number of particles fall into the ground state. From Eq. (7)

$$I(\alpha) = \frac{\sqrt{2}\pi^2\hbar^3}{(mk_B T)^{3/2}} \frac{N}{V}$$

When this exceeds (7) at low temperatures the anomaly (increase in the particle number at the ground state.) occurs. This critical temperature T_c is

$$T < T_c \equiv \frac{2\pi\hbar^2}{mk_B} \left[\frac{N}{\zeta(3/2)V} \right]^{2/3} \quad (8)$$

Here $l \equiv (V/N)^{1/3}$ is the average distance between the particles and Eq. (8) is interpreted as

$$l = \frac{h}{\zeta(3/2)\sqrt{2\pi mk_B T_c}} \sim \lambda(T = T_c). \quad (9)$$

This confirms the statement that the BEC takes place when the average de Broglie wavelength is comparable with the average particle distance. Below T_c , we add the number of ground state particles N_0 to Eq. (8) :

$$N = \frac{Vm^{3/2}}{\sqrt{2}\pi^2\hbar^3} \int_0^\infty \frac{\sqrt{\epsilon}}{e^{(\epsilon-\mu)\beta} - 1} d\epsilon + N_0 \quad (10)$$

From Eq. (9), N_0 becomes a macroscopic number for $T < T_c$, then $\mu = 0$. Therefore

$$N_0 = N - \frac{Vm^{3/2}}{\sqrt{2}\pi^2\hbar^3} \int_0^\infty \frac{\sqrt{\epsilon}}{e^{\epsilon\beta} - 1} d\epsilon = N \left[1 - \frac{V(mk_B T)^{3/2}}{N\sqrt{2}\pi^2\hbar^3} I(0) \right] = N \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^{3/2} \right] \quad (11)$$

This is just like a spontaneous magnetization rapidly grows to finite values below the critical temperature in the ferro— magnetic transition. The total energy of the system for $T < T_c$ is calculated as

$$E = \frac{Vm^{3/2}}{\sqrt{2}\pi^2\hbar^3} \int_0^\infty \frac{\epsilon^{3/2}}{e^{\beta\epsilon} - 1} d\epsilon$$

$$T < T_c, \int_0^\infty \frac{x^{3/2}}{e^x - 1} dx = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \zeta\left(\frac{5}{2}\right) \quad (12)$$

$$E = \frac{3}{2} \zeta\left(\frac{5}{2}\right) \left(\frac{m}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} V (k_B T)^{5/2}. \quad (13)$$

Then the heat capacity at constant volume is calculated as

$$C_v = \frac{15}{4} \zeta\left(\frac{5}{2}\right) \left(\frac{m}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} V k_B^{5/2} T^{3/2} \quad (14)$$

C_v shows a cusp at T_c indicating that this is the phase transition. Here we have a look at bosonic stimulation for N particles, which is, though, essentially the same as what has been mentioned on the case of two particles in Sed. 1. As we have seen, the bosonic stimulation works as if it is a driving force in BEC or laser oscillation. Let us consider a identical boson system the case a particle in state φ_{ini} gets perturbation and transitions to other single particle state φ_{fin} . Now the problem is the difference in the transition probabilities to the state occupied with N particles and to the empty state.

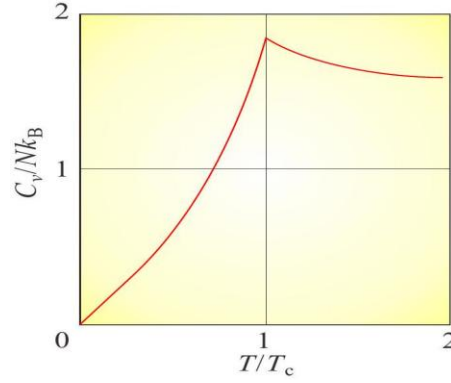


Fig.1 Specific heat at constant volume of three di— mensional ideal Bose gas as a function of temperature. T_c is the critical temperature of the BEC.

We write the initial state as

$$\psi_+^{(i)}(\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_{N+1}) = \frac{1}{\sqrt{(N+1)N! \prod_l n_l!}} \prod_{m=1}^N \hat{R}_{m,N+1} \det^{(+)}\{\varphi_i(\mathbf{r}_j)\} \varphi_{\text{ini}}(\mathbf{r}_{N+1}). \quad (15)$$

The symbol $\det^{(+)}$ represents permanent, which is obtained by making the signs of all the terms into +. The final state $\psi_+^{(f)}$ is obtained by exchanging φ_{ini} with φ_{fin} . Let the matrix elements of perturbation Hamiltonian be a , i. e. $\langle \varphi_{\text{fin}} | \hat{H}_1 | \varphi_{\text{ini}} \rangle = a$. Assuming that $\varphi_i (i \leq N)$ is orthogonal to φ_{fin} , among $\langle \psi_+^{(f)} | \hat{H}_1 | \psi_+^{(i)} \rangle$, number of terms that give non—zero a is $(N+1)N! \prod_l n_l!$. This is equal to the square of the denominator in normalization constant. Then finally $\langle \psi_+^{(f)} | \hat{H}_1 | \psi_+^{(i)} \rangle = a$. On the other hand, assuming all of $\varphi_i (i \leq N)$ are φ_{fin} , we can write

$$\psi_+^{(i)} = \frac{1}{\sqrt{(N+1)}} \prod_{m=1}^N \hat{R}_{m,N+1} \varphi_{\text{fin}}(\mathbf{r}_1) \cdots \varphi_{\text{fin}}(\mathbf{r}_N) \varphi_{\text{ini}}(\mathbf{r}_{N+1}). \quad (16)$$

All of the $N!$ terms in $\det^{(+)}$ are $\varphi_{\text{fin}}(\mathbf{r}_1) \cdots \varphi_{\text{fin}}(\mathbf{r}_N)$ and divided by $N!$ in the denominator of normalization constant to 1. However the final state is

$$\psi_+^{(f)} = \varphi_{\text{fin}}(\mathbf{r}_1) \cdots \varphi_{\text{fin}}(\mathbf{r}_N) \varphi_{\text{fin}}(\mathbf{r}_{N+1}). \quad (17)$$

Then we get $\langle \varphi_{\text{fin}} | \hat{H}_1 | \varphi_{\text{ini}} \rangle = a\sqrt{N+1}$, and from the Fermi's golden rule, the transition probability should be $N+1$ times larger.

References:

1. Pathria, R. K., & Beale, P. D. (2011). *Statistical Mechanics* (3rd ed.). Academic Press.
2. Pitaevskii, L., & Stringari, S. (2016). *Bose–Einstein Condensation and Superfluidity*. Oxford University Press.
3. Dalfovo, F., Giorgini, S., Pitaevskii, L. P., & Stringari, S. (1999). Theory of Bose–Einstein condensation in trapped gases. *Reviews of Modern Physics*, 71, 463–512. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.463>
4. Anderson, M. H., Ensher, J. R., Matthews, M. R., Wieman, C. E., & Cornell, E. A. (1995). Observation of Bose–Einstein condensation in a dilute atomic vapor. *Science*, 269(5221), 198–201. <https://doi.org/10.1126/science.269.5221.198>

