



**O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIIY TA’LIM,  
FAN VA INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI**



**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI  
YARIMO‘TKAZGICHLAR FIZIKASI VA MIKROELEKTRONIKA  
ILMIY-TADQIQOT INSTITUTI**

**TOSHKENT SHAHRIDAGI ““MEI” MILLIY TADQIQOT UNIVERSITETI” FEDERAL DAVLAT  
BYUDJETI OLIIY TA’LIM MUASSASASI FILIALI**

**ANDIJON DAVLAT UNIVERSITETI**

# **«QUYOSH ENERGETIKASI UCHUN YANGI ISTIQBOLLI MATERIALLAR»**

**XALQARO ILMIY KONFERENSIYA  
MATERIALLARI TO‘PLAMI**



**Toshkent, 2025**





O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi,  
O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi  
va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti,  
Toshkent shahridagi "“MEI” milliy tadqiqot universiteti” Federal davlat  
byudjeti oliy ta'lim muassasasi filiali,  
Andijon davlat universiteti  
hamkorligida 2025-yilning 24-25-dekabr kunlari fizika-matematika  
fanlari doktori, O'zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasi  
akademigi S.Zaynabidinov tavalludining  
80 yillik yubileyiga bag'ishlab o'tkazilgan

# «QUYOSH ENERGETIKASI UCHUN YANGI ISTIQBOLLI MATERIALLAR»

**mavzusidagi xalqaro ilmiy  
konferensiya**

## **MATERIALLARI TO'PLAMI**

**Toshkent, 24-25 dekabr 2025 y.**



## DASTURIY QO'MITA

### Rais:

**K.A.Sharipov**, O'zR OTFI vaziri

### Hamraislar:

**R.A.Muminov**, O'zR FA akademigi

**Sh.B.Utamuradova**, YaFM ITI direktori

### Dasturiy qo'mita a'zolari:

S.Z. Mirzayev, O'zR FA vitse-prezidenti

S.A.Baxramov, O'zR FA akademigi

S.M. Turabdjano, O'zR FA akademigi, TDTU

A.T. Mamadalimov, O'zR FA akademigi

S.Z.Zaynabidinov, O'zR FA akademigi

I.I. Sodikov O'zR FA akademigi

M.X. Ashurov, O'zR FA akademigi

O.O.Mamatkarimov, O'zR Oliy Majlisi senati

Yu.M.Kernasovskiy (Belarus, MNIIRM)

V.F.Gremenok (Belarus, BMFA M IAM)

A.Z. Raxmatov («FOTON» AJ)

X.B.Ashurov (O'zR FA IPLTI)

X.K.Olimov (O'zR FA FTI)

O.R.Parpiyev (O'zR FA MI)

B.N.Raximov (AKT AHI)

K.P. Abduraxmanov (TATU)

M.G.Dadamirzayev (NamDTU)

M.Yu.Tashmetov (O'zR FA YAFI)

E.M.Ibragimova (O'zR FA YAFI)

E.X.Bozorov (O'zR FA YAFI)

N.F.Zikrillayev (TDTU)

K.A.Ismaylov (QQDU)

G.Gulyamov (NamDTU)

N.X.Yuldashev (FarDU)

R.Ya.Rasulov (FarDU)

E.Z.Imamov (TATU)

U.O.Kutliyev (UrDU)

M.N.Tursunov (O'zR FA FTI)

A.M.Kasimaxunova (FarDTU)

S.M.Otajonov (FarDU)

K.E.Onarqulov (FarDU)

N.Sharibayev (NamDTU)

U.I.Erkaboyev (NamDTU)

## TASHKILIY QO'MITA

### Rais:

**Sh.A. Ayupov**, O'zR FA prezidenti

### Hamraislar:

**I.U.Madjidov**, O'zMU rektori

**X.S.Daliyev**, (MEI MTU Toshkent filiali derektori)

### Mas'ul kotiblar:

A.Sh.Mavlyanov (YAFI ITI)

A.M.Iskenderov (Toshkent sh. "MEI"

MTU filiali)

### Tashkiliy qo'mita a'zolari:

Z.T.Azamatov (YAFM ITI)

I.X. Xamidjonov (YAFM ITI)\_

B.J.Mamasoliyev (Toshkent sh."MEI" MTU filiali)

T.U.Nishanbayev (Toshkent sh."MEI" MTU filiali)

O.X.Qo'ldashov (YAFM ITI)

S.A.Muzafarova (YAFM ITI)

N.A. Turgunov (YAFM ITI)

M.B.Tagayev (QQDU)

B.K.Dauletmuratov (QDPI)

K.M.Kuchkarov (O'zR FA FTI)

G.Mavlyanov (TDTU)

K.S.Ayupov (TDTU)

R.U.Aliyev (And DU)

Q.M. Fayzullayev (YAFM ITI)

A.V.Stanchik (Belarus, BMFA M IAM)

O.F.Tukfatullin (YAFM ITI)

J.J.Hamdamov (YAFM ITI)

Ya.A.Saydimov (YAFM ITI)

A.B.Uteniyazova (YAFM ITI)

N.K.Xakimova (YAFM ITI)

Sh.E. Murodov (YAFM ITI)

D.A.Raxmanov (YAFM ITI)

A.Yesbergenova (YAFM ITI)

B.R. Bokiye (YAFM ITI)

Sh.B.Norkulov (YAFM ITI)

M.B.Bekmuratov (YAFM ITI)

X.J.Matchonov (YAFM ITI)

Z.Baxronqulov (YAFM ITI)

*Ushbu to'plam O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligining 2024-yil 27-dekabrda 490-son buyrug'i asosida nashrga tayyorlandi.*

*Ushbu nashrda keltirilgan barcha ma'lumotlar va fikr-mulohazalar mualliflarga tegishli bo'lib, tahrir hay'ati a'zolarining fikriga mos kelmasligi mumkin. Nashrda keltirilgan raqamlar, statistik ma'lumotlar, fikr-mulohazalar uchun mualliflar mas'ul hisoblanadi.*



## MUNDARIJA

|                                                                                                                                                                                                                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>AKADEMIK S. ZAYNABIDINOVNING HAYOT VA ILM YO‘LLARI</b>                                                                                                                                                                                                       | <b>6</b>  |
| <b>1 – SHO‘BA: QUYOSH ENERGETIKASIDA QO‘LLANILADIGAN ISTIQBOLLI MATERIALLAR VA TEXNOLOGIYALAR</b>                                                                                                                                                               |           |
| <b>A.T.Mamadalimov, N. K. Hakimova, Sh.M. Norbekov. Tabiiy tolalarining optik xossalarini tadqiq qilish</b>                                                                                                                                                     | <b>9</b>  |
| <b>Х.С. Далиев, И.Х. Хамиджонов. Скандий билан легирланган кремнийнинг инфрақизил ютилиши спектрларини ўрганиш.</b>                                                                                                                                             | <b>11</b> |
| <b>Ш.Б. Утамурадова, К.М. Файзуллаев, А.В. Станчик. Влияние типа подложки на морфологию тонких плёнок <math>Cu_2NiSn(S,Se)_4</math></b>                                                                                                                         | <b>13</b> |
| <b>Ш.Х.Далиев, Ш.А.Исмоилов. Электрофизические и спектральные свойства кремния, легированного никелем методом электрохимического осаждения</b>                                                                                                                  | <b>16</b> |
| <b>Н.Ф. Зикриллаев, Т.Б. Исмаилов, А.Т. Юлдошев, У.А. Ешимова. Магнитные свойства кремния, легированного примесными атомами хрома</b>                                                                                                                           | <b>19</b> |
| <b>Б.Л. Оксенгендлер, С.Х. Сулейманов, Н.Н.Никифорова, Ф.А.Искандарова, Г.Й. Ахматова, Р.Р. Иброхимов. Современные аспекты радиационной физики и технологии сложных систем</b>                                                                                  | <b>21</b> |
| <b>K.S. Daliev, V.F. Gremenok, Z.E. Bahronkulov. Electrophysical and structural advantages of lutetium-doped silicon</b>                                                                                                                                        | <b>23</b> |
| <b>Ш.Х. Далиев, Ф.А. Сапаров. Стабилизация условий синтеза оксидных структур на основе кремния.</b>                                                                                                                                                             | <b>25</b> |
| <b>A.T.Mamadalimov, N.K.Hakimova, Sh.M.Norbekov, D.A.Azimova, D.E.Xazratov, F.A.Berdiqulova, O.B.Nabiyev. <math>KMnO_4</math> bilan legirlangan kanop tolalarining elektro ‘tkazuvchanligi</b>                                                                  | <b>27</b> |
| <b>E.M. Ibragimova, I.N. Temirbayeva. Microscale structure profile and element composition of <math>As_2Se_3</math> film</b>                                                                                                                                    | <b>29</b> |
| <b>Ш.Х. Далиев, Ш.А. Исмоилов. Структурные и спектральные особенности кремния, легированного цирконием методом диффузии.</b>                                                                                                                                    | <b>32</b> |
| <b>Sh.B.Utamuradova, A.Sh.Mavlyanov, G.O.Abdurazzoqova. Kremniy kristall panjarasida izovalent strukturaning sonli hisobi.</b>                                                                                                                                  | <b>34</b> |
| <b>A.A. Abdreymov, M.B. Tagaev, M.B. Sharibaev. Эффекты локального электромагнитного усиления в органических солнечных элементах, модифицированных металлическими наночастицами.</b>                                                                            | <b>36</b> |
| <b>Н.А.Тургунов, Н.Б.Хайтимметов. Формирование примесных соединений в образцах <math>n-Si&lt;Fe&gt;</math>.</b>                                                                                                                                                 | <b>38</b> |
| <b>Sh.B. Utamuradova, A.B. Uteniyazova. Radiation defects profile in silicon doped with impurities of tantalum at proton irradiation</b>                                                                                                                        | <b>41</b> |
| <b>T.M. Razikov, S.A. Muzafarova, K.M. Kuchkarov, M.A. Maxmudov, R.T. Yuldoshov, A.S. Achilov, N.A. Axmedova, O.Sh. Norqulov, S.G. Taji-Aglaeva. Gaz tashish usuli bilan vodorod oqimida o‘stirilgan <math>Zn_xCd_{1-x}S</math> yupqa qatlamning xossalari.</b> | <b>43</b> |



|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| K.M. Quchqarov, B.A. Ergashev, D.Z. Isakov, R.R. Khurramov, M.A. Makhmudov, R.T. Yuldoshov, M. Pirimmatov. <i>Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> yupqa qatlamlarining morfologik va strukturaviy xususiyatlari</i>                                  | 46 |
| Б.Р. Кутлимурастов, Б.Л. Оксенгендлер, С.Е. Максимов, Х.Б. Ашуров. <i>Механизм деградации α-Si/c-Si с фрактальной границей раздела при ионизирующем воздействии радиации</i>                                                                  | 48 |
| T.M. Razikov, S.A. Muzafarova, K.M. Kuchkarov, M.A. Maxmudov, R.T. Yuldoshov, A.S. Achilov, N.A. Axmedova, O.Sh. Norqulov. <i>Tauc grafik asosida Zn<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>S yupqa qatlamlarining optik xususiyatlari tahlili</i>        | 51 |
| R.M. Jalalov, A.A. Abdug'affarov, U.N. Abduqaxxorov. <i>Yupqa α-si:h nanoqatlamli tuzilmalar olish va modellash</i>                                                                                                                           | 53 |
| Я.А.Сайдимов, Ф.Б.Умаров. <i>Монокристалл кремнийнинг хоссаларига тербий (Tb) ва тулий (Tm) ионларининг таъсири</i>                                                                                                                           | 55 |
| P.M. Турманова. <i>Исследование морфологических свойств Si, легированного Ni</i>                                                                                                                                                              | 56 |
| A.A. Meyliyeva, Sh.U. Yuldashev. <i>Zol-gel metodi orqali ga<sub>2</sub>o<sub>3</sub> yupqa plyonkalarini o'qirish</i>                                                                                                                        | 58 |
| Sh. Allaqliyeva, Sh. Otajonov, F. Mannonova. <i>Spektroskopik usul bilan etilbenzol molekulasini tadqiq qilish</i>                                                                                                                            | 61 |
| <b>2 – SHO'BA. QUYOSH ENERGETIKASI UCHUN YANGI YARIMO'TKAZGICHLI TUZILMALARNI ISHLAB CHIQISH VA ULARNI TADQIQ QILISH</b>                                                                                                                      |    |
| Э.З.Имамов, Х.Н. Каримов, А.Э. Имамов. <i>Применение наноразмерных кристаллитов при разработке эффективных кремниевых солнечных элементов</i>                                                                                                 | 64 |
| Ш.Б. Утамурадова, Д.А. Рахманов. <i>Рамановские спектры кремния, легированного палладием и облученного гамма-лучами</i>                                                                                                                       | 68 |
| Z.T. Azamatov, A.B. Baxromov. <i>Kremniy monokristalli asosidagi LiNbO<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si geterostrukturasi olish Metodi</i>                                                                                                      | 71 |
| O.K. Kuvandikov, Э.У. Арзикулов, Ж.Т. Рузимуродов. <i>Природа ферромагнетизма магнитных кластеров в кремнии</i>                                                                                                                               | 73 |
| N.F. Zikrillayev, G.H. Mavlonov, S.N. Srajev, A.A. Usmonov. <i>Kremniy kristall panjarasida bor va fosfor atomlarining birikmalarini shakllanish mexanizmi</i>                                                                                | 75 |
| A. Saidov, Sh. Usmonov, Sh. Masharipov, U. Asatova. <i>Thermodynamic stability of molecular gap substitution in silicon-based solid solutions</i>                                                                                             | 76 |
| C.M. Отажонов, К.А. Ботиров, Ж.М. Бокиров. <i>Эффективность солнечных элементов на основе гетероструктуры Cu<sub>2-x</sub>CdS-CdTe</i>                                                                                                        | 79 |
| S.X. Sulaymonov, R.R. O'rinboyev. <i>Mujassamlangan quyosh nuri tasirida rux oksidining karbotermik qaytarilishi</i>                                                                                                                          | 81 |
| Kh.M. Iliyev, N.F. Zikrillayev, U.Kh. Sodikov. <i>Expansion of the spectral region of photosensitivity by binary elementary cells in silicon</i>                                                                                              | 83 |
| P.F. Икрамов, Х.А. Муминов, С. С. Умаров, Б. Қ. Султонов, М.А. Нуриддинова, Р.М. Жалалов. <i>Паст температураларда α-Si:h нинг харажатчанлик тирқишини энергетик кенглигини температурага боғланишини бозе-эйнштейн формуласидан ҳисоблаш</i> | 85 |
| B.E. Umirzakov, J.B. Khujaniyozov*, A.A. Abduvayitov, I.Q. Qodirova, Z.A. Tursunmetova. <i>Active metal ion implantation effects on semiconductor surface properties</i>                                                                      | 87 |



|                                                                                                                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>A.R.To‘rayev, R.R.Burxonov.</b> <i>Monokristalli kremniy: ishlab chiqarish, nuqsonlar va quyosh panellaridagi samaradorlikni oshirish usullari</i>                                                | <b>89</b>  |
| <b>R.M. Jalalov, A.A. Abdug‘affarov, U.N. Abduqaxxorov.</b> <i>ESP32 asosida cnc plazma kesish qurilmasini ishlab chiqish va harakat trayektoriyasini modellashtirish</i>                            | <b>92</b>  |
| <b>М.Б.Бекмуратов.</b> <i>Исследование свойств структур Si&lt;Yb&gt; методами инфракрасной фурье-спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния</i>                                         | <b>93</b>  |
| <b>Kh.J. Matchonov.</b> <i>Phase composition of the surface of p-Si doped with Er and Cr</i>                                                                                                         | <b>97</b>  |
| <b>М.О. Бо‘ronov.</b> <i>Zamonaviy quyosh fotoelementlari, yarimo‘tkazgichlar fizikasi va samaradorlikni oshirish texnologiyalari</i>                                                                | <b>100</b> |
| <b>A.D. Nurimov, Sh.M. Davurov, E.S. Sherkulov, L.A. Joraboyev, I.Saydullayeva, Anvar Zakhidov.</b> <i>Optical properties of perovskite quantum dots-based luminescent solar concentrators</i>       | <b>102</b> |
| <b>Kh. Kamalov, A. Khudaybergenov, K. Kadirbaeva.</b> <i>Development and quantum-transport analysis of semiconductor structures with quantum-dot arrays for solar-energy field-effect devices</i>    | <b>103</b> |
| <b>3 – SHO‘BA. QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA MANBALARIDAN FOYDALANISHNING AMALIY JIHATLARI</b>                                                                                                          |            |
| <b>O.O.Mamatkarimov, A.A.Abdukarimov, M.A.Naimjonov.</b> <i>Temperature-dependent ionic conductivity of peo-based gel polymer electrolytes containing tpai for DSSC applications</i>                 | <b>107</b> |
| <b>O.X. Qo‘ldashov, D.O. Nabiev, A.A.Valixonov, A.A.Aliev.</b> <i>Quyosh panellari yuzasida chang to‘planishini nazorat qiluvchi optoelektron qurilma</i>                                            | <b>109</b> |
| <b>С.А. Даминов, О.Ф. Тукфатуллин, Э.Д. Мухамедиев, Д.С. Пулатова.</b> <i>Сравнительный анализ теплового режима фотоэлектрического модуля в стационарной и двухосной системе слежения за солнцем</i> | <b>111</b> |
| <b>М.А. Шерматова.</b> <i>Создание ветреных двигателей непрерывной работы для предгорный населенных пунктов</i>                                                                                      | <b>114</b> |
| <b>Р.Ю. Акбаров, С.Б. Бахронова.</b> <i>Роль научно-практических и учебно-образовательных полигонов в подготовке кадров для развития возобновляемой энергетики</i>                                   | <b>115</b> |
| <b>J.T.Ruzimurodov, S.Q.Eshmamatov, A.A.Eshbekov.</b> <i>Quyosh issiqlik energiyasini akkumliyatsiya qilish istiqbollari</i>                                                                         | <b>118</b> |
| <b>К.А. Джумамуратов, Д.С. Пулатова, С.А. Даминов.</b> <i>Мужассамлашган фотоиссиқлик айлантурғич қурилмасининг даслабки синов натижалари</i>                                                        | <b>120</b> |
| <b>O.T. Boltayev, I.N. Ismoilov.</b> <i>Improvement of practical methods for reducing electromagnetic impacts in traction transformers used in renewable energy-based power supply systems</i>       | <b>122</b> |
| <b>S.Q.Qarshiyev, O.O.Abdinazarova.</b> <i>Fotoelektrik panellar ishchi yuzasi haroratini nazorat qiluvchi qurilma</i>                                                                               | <b>125</b> |
| <b>H. Mamarasulova.</b> <i>Increasing the efficiency of solar batteries.</i>                                                                                                                         | <b>127</b> |



## **AKADEMIK S. ZAYNABIDINOVNING HAYOT VA ILM YO‘LLARI**

Mamlakatimizda qattiq jismlar fizikasi yo‘nalishining yarimo‘tkazgichlar va dielektriklar fizikasi bo‘yicha tadqiqotchilaridan, soha bo‘yicha fundamental ilmiy tadqiqotlar olib borgan, bir qancha darslik va o‘quv qo‘llanmalari yaratgan, xalqaro miqyosdagi olim, O‘zR FA akademigi, fizika-matematika fanlari doktori, professor, Abu Rayhon Beruniy nomidagi Davlat mukofoti sovrindori Sirojiddin Zaynobiddinov nomini O‘zbekistondagi yirik olimlar sirasiga birinchilardan bo‘lib kiritish mumkin.

Olim 1971 yilda Toshkent davlat universitetining fizika fakultetini yarimo‘tkazgichlar va dielektriklar fizikasi yo‘nalishi bo‘yicha bitirib, shu dargohda ilmiy-pedagogik faoliyatini boshladi. Ilmiy rahbarlari professorlar A.Teshaboev, M.K. Bahodirxonov (O‘zMU), B.I. Boltaks (FTI, S.Peterburg), V.I. Fistul (MNKTI, Moskva) bilan hamkorlikda, ustozlari S.A. Azimov, P.Q. Habibullaev, T.A. Sarimsoqov, S.H. Sirojiddinovlarning maslahatlari va yordamlari bilan diffuziya usulida chuqur holatli kirishma atomlari bilan legirlangan yarimo‘tkazgichli kremniy monokristallarida zaryadlangan zarrachalar xatti-harakatlarini, ularning elektrnafaol qismi tabiati va kristallar xususiyatlarining shakllanishida kirishma atomlari mikro- va nanobirikmalarining xossalarini o‘rganish bo‘yicha tadqiqotlar olib bordi. Tadqiqotlarining natijalari sifatida xalqaro va mamlakatimizning nufuzli ilmiy nashrlarida 250 dan ortiq ilmiy maqolalar e‘lon qildi, ilmiy anjumanlar to‘plamlarida 500 ga yaqin ma‘ruza matn-tezislari chop etildi. Olim 9 ta mualliflik guvohnomasi va patentlar, 8 ta monografiya, 30 ga yaqin o‘zbek tilidagi o‘quv adabiyotlari muallifi. O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim vazirligi tomonidan e‘lon qilingan “Yilning eng yaxshi darslik va o‘quv adabiyotlar muallifi” tanlovida 2 ta o‘quv qo‘llanmasi uchinchi, 2 tasi ikkinchi o‘rinni egalladi. “Nanozarralar fizikasi, kimyosi va texnologiyalari” (Toshkent, “Kamalak - Press”, 2014) o‘quv qo‘llanmasi 2015 yil tanlovida birinchi o‘ringa loyiq topildi.

Sirojiddin Zaynobiddinov 1978 yilda fizika-matematika fanlari nomzodi (FTI, Toshkent), 1987 yilda fan doktori (LPI, S. Peterburg) ilmiy darajalariga, 1992 yilda kremniydagi zaryadli zarrachalar xatti-harakatini o‘rganish bo‘yicha olib borgan fundamental tadqiqotlari uchun mamlakatimizning fan sohasidagi eng nufuzli mukofoti - Beruniy nomidagi Davlat mukofotiga sazovor bo‘ldi.

Olimning ilmiy faoliyati xalqaro miqyosda ham tan olinib, AQSH ning Nyu-York, Kaliforniyadagi Fan, ta‘lim, texnika va texnologiyalar fanlari akademiyalariga hamda Gruziyaning fan va turizm akademiyasiga a‘zo etib saylangan.

S. Zaynobiddinovning ilmiy yutuqlari uning turli lavozimlardagi jo‘shqin faoliyati bilan hamohang bo‘lganki, bu jihatlar olimning tashabbuskor, bilimdon, shijoatli, tadbirkor xodim ekanidan, adolatli rahbar va yo‘lboshchi ekanidan dalolat beradi.

O‘zbekiston Milliy universitetida ilmiy xodim, dotsent (1971-1978 y.y.) bo‘lganida ham, O‘R OVO‘MTV da yetakchi mutaxassis (1979-1980 y.y.) lavozimida ishlaganida ham, kafedra mudiri (1981-1996 y.y.), Fizika fakulteti dekani (1992-1996 y.y.), keyinchalik Andijon davlat universitetida rektor va bir vaqtda “Qattiq jismlar fizikasi” kafedrasida mudir bo‘lganida ham (1996-2006 y.) o‘z vazifasiga mas’uliyatni, munosabatda samimiylikni, muammolarni hal qilishda adolatni birinchi o‘ringa qo‘yadi. Shuning uchun bo‘lsa kerakki, “Oliy ta’lim a’lochisi”, “O‘rta va maxsus ta’lim a’lochisi” faxriy unvonlariga, “Xalqaro Oliy ta’lim fanlari akademiyasi” akademigi kabi unvonlarga sazovor bo‘lgan.

S.Zaynobiddinov ilmiy faoliyati yarimo‘tkazgichli kremniy monokristallariga kirishma atomlarini kiritishning ishonchli texnologiyalarini yaratish, kremniydagi kirishma atomlari xatti-harakatlari va ularning kristall nuqsonlari bilan o‘zaro ta’sirlashish mexanizmlarini o‘rganish hamda ular asosida o‘ziga xos xususiyatlarga ega bo‘lgan yangi turdagi yarimo‘tkazgich - kompensirlangan kremniy olishga bag‘ishlangan. Olimning bu borada olib borgan ilmiy tadqiqotlari natijasida o‘tish elementlari atomlari bilan legirlangan kremniy va ular asosidagi asboblarga tashqi omillar – issiqlik, yorug‘lik, radiatsiya, yuqori bosimlar, kuchli elektr va magnit maydonlari ta’sirlari o‘rganildi. Kuchli legirlangan kremniy monokristallarda bunday ta’sirlar natijasida yangi fizik jarayonlar – yorug‘lik va issiqlikka o‘ta sezgirlik yoki, aksincha, chidamlilik xossalarini, elektr o‘tkazuvchanlikni temperatura va yorug‘lik yordamida anomal katta so‘ndirish, uzoq muddatli katta miqdordagi qoldiq o‘tkazuvchanlikni hosil qilish hodisalarini vujudga keltirish shart-sharoitlari aniqlandi.

Sirojiddin Zaynobiddinov qayerda ishlamasin, oliy ma’lumotli mutaxassislar tayyorlashni, yuqori malakali kadrlar etkazib berishni o‘z faoliyatining ustuvor yo‘nalishi deb bilgan. O‘zMU va AnDU da ishlash paytida minglab talabalarga fizika fanining turli yo‘nalishlaridan saboq berish bilan birga, respublikamizning barcha viloyatlariga, shuningdek, qo‘shni respublikalarga ham bilimdon fizika mutaxassislarini tayyorlab berishda faollik ko‘rsatgan. Shuningdek, har ikkala oliygohda ilmiy darajalar beruvchi ixtisoslashgan Kengashlar raisi, O‘zMU huzuridagi Yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ITIda ilmiy darajalar beruvchi ixtisoslashgan Kengash a’zosi, Fizika texnika instituti, Yadro fizikasi instituti, TDTU qoshidagi ixtisoslashgan kengashlar a’zosi, ilmiy maslahatchi va



opponent sifatida yuzga yaqin izlanuvchilarning ilmiy darajalar olishida ishtirok etdi. Olimning bevosita rahbarligida 9 nafar fan doktori, 26 nafar fan nomzodlari tayyorlandi va ilmiy jamoatchilik tomonidan haqli ravishda e'tirof etilgan ilmiy maktab yaratildi. Bugunda bu yo'nalish bo'yicha uning rahbarligida o'ndan ortiq ilmiy izlanuvchilar ilmiy tadqiqotlar olib bormoqdalar.

S.Zaynobiddinov fizika fanining istiqboli yo'lida bir qator ishlarda bosh-qosh bo'lib, ilm-fan rivojiga o'zining barakali hissasini qo'shib kelmoqda. U "O'zbekiston fizika jamiyati" tuzilishining tashkilotchilaridan biri va uning 1995-2010 yillardagi rahbari, O'zR FAning Andijon-Namangan ilmiy markazi ochilishining tashabbuskori va rahbari, turli yillarda "Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika", "O'zbekiston fizika jurnali", "Fan va turmush", "Kompozitsion moddalar", "Ilmiy xabarnoma" (ADU) jurnallarida tahririyat a'zosi sifatida, "Eksperimental va nazariy fizika" ilmiy maqolalar to'plamlarining bosh muharriri sifatida faoliyat korsatgan, fan va ta'limni tashkil etish va targ'iboti ishlariga katta hissa qo'shgan.

O'zR FA akademigi, fizika-matematika fanlari doktori, professor, Beruniy nomidagi Davlat mukofoti sovrindori Sirojiddin Zaynobiddinov o'zining tabarruk 80 yoshini katta ilmiy va pedagogik salohiyat, 50 ga yaqin darslik va o'quv qo'llanmalari, ko'plab ijodiy g'oyalar va ulkan hayotiy tajribaga ega holda kutib olar ekan, biz ularga mustahkam sog'lik, oilaviy tinchlik va ilmiy-ijodiy ishlarida muvaffaqiyatlar tilaymiz.

**Tashkiliy qo'mita a'zolari**

## 1 – SHO'BA. QUYOSH ENERGETIKASIDA QO'LLANILADIGAN ISTIQBOLLI MATERIALLAR VA TEXNOLOGIYALAR

### TABIIY TOLALARINING OPTIK XOSSALARINI TADQIQ QILISH

A.T.Mamadalimov<sup>1</sup>, N. K. Xakimova<sup>1</sup>, Sh.M. Norbekov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti*

<sup>2</sup>*Toshkent menejment va iqtisodiyot instituti*

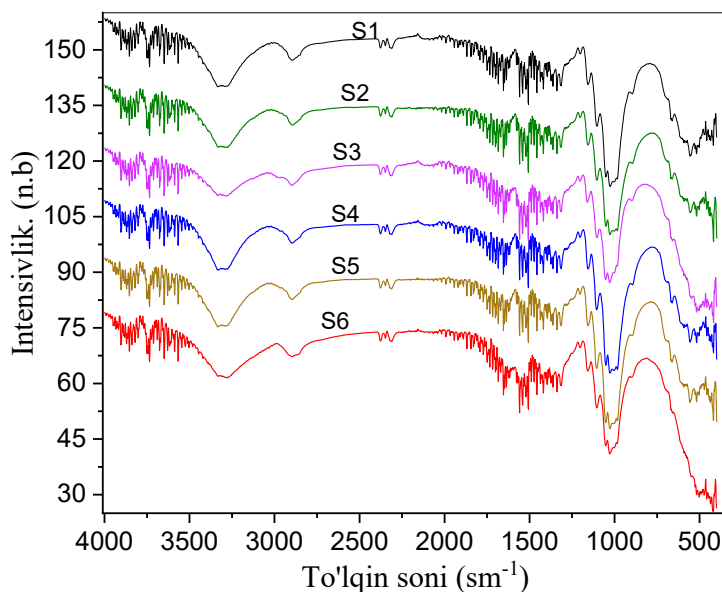
Mazkur tadqiqotda  $\text{KMnO}_4$  va yod bilan ishlov berilgan Surxon-18 va Surxon-104 navli paxta tolalarining optik xossalari, ya'ni fotolyuminesensiya (FL) va infraqizil (FTIR) spektroskopiya usullarini birgalikda qo'llash orqali kompleks tarzda o'rganildi. Ushbu yondashuv tolalarning energetik holatlari va molekulyar tuzilishi o'rtasidagi bog'liqlikni aniqlash imkonini berdi. Natijalar asosida taqiqlangan zonadagi chuqur sathlarning energiyasi 0.83–0.86 eV oralig'ida baholandi.  $\text{KMnO}_4$  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 [1-3]. Paxta tolalari ketma-ket almashinadigan kristalli va amorf tuzilishlariga ega [3]. Hozirgi vaqtda tabiiy yarimo'tkazgich tolalari fizikasi sohasida jadal tadqiqotlar olib borish natijasida elektron texnika elementlarini elektron namlik o'lchagich, diodlar, fotodiodlar va tranzistorlarni yaratishga imkon berdi [2-3].

Paxta tolalari asosiy tarkibiy qismi bo'lgan selluloza 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.

FTIR spektrlarida  $3600\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$  oralig'ida kuzatilgan keng yutilish chiziqlari selluloza molekulasidagi gidroksil ( $\text{--OH}$ ) guruhlarining cho'zilish tebranishlariga mos keladi.  $\text{KMnO}_4$  va yod bilan legirlangan namunalar uchun ushbu sohada cho'qqilarning kengayishi va intensivligining o'zgarishi vodorod bog'lanishlarining qayta tashkil topganini ko'rsatadi (1-rasm). Mazkur strukturaviy o'zgarishlar fotolyuminesensiya jarayonida elektronlarning relaksatsiya mexanizmlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

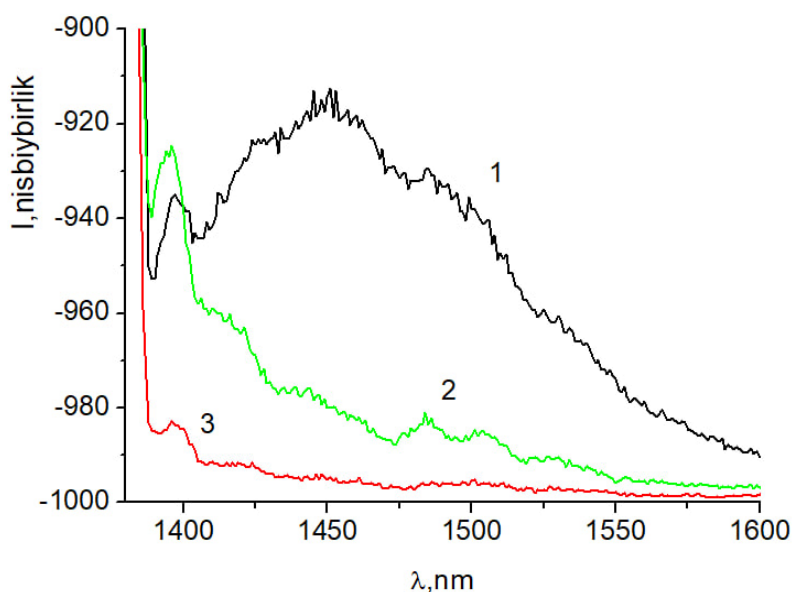
$\text{KMnO}_4$  bilan legirlangan namunalar FTIR spektrlarida  $1650\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$  sohada yutilish intensivligining ortishi bilan ajralib turadi. Bu holat oksidlovchi muhit ta'sirida selluloza zanjirlarida karbonil ( $\text{C=O}$ ) guruhlarining hosil bo'lishi bilan izohlanadi. Ushbu yangi funksional guruhlar taqiqlangan zonada chuqur energetik sathlar paydo bo'lishiga olib keladi, bu esa FL spektrida yuqori intensiv emissiya maksimumlari kuzatilishiga sabab bo'ladi. Ayniqsa,  $\text{KMnO}_4$  bilan legirlangan Surxon-18 namunasi fotolyuminesensiya intensivligining yuqori bo'lishi FTIR natijalari bilan to'liq mos keladi. Yod bilan legirlangan namunalar uchun FTIR spektrlarida  $1200\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$  oralig'ida  $\text{C--O}$  va  $\text{C--O--C}$  bog'lariga tegishli yutilish chiziqlarining sezilarli o'zgarishi kuzatildi. Bu yod atomlarining selluloza makromolekulalari bilan zaryad-almashuv komplekslari hosil qilishi ehtimolini ko'rsatadi.



**1-rasm. S1 toza (Surxon-18) navli paxta tolasi, S2 toza (Surxon-104) navli paxta tolasi, S3 KMnO<sub>4</sub> bilan legirlangan (Surxon-104) navli paxta tolasi, S4 yod bilan legirlangan (Surxon-18) navli paxta tolasi, S5 yod bilan legirlangan (Surxon-104) navli paxta tolasi, S6 KMnO<sub>4</sub> bilan legirlangan (Surxon-18) navli paxta tolasi.**

Ushbu jarayon elektron holatlarning qayta taqsimlanishiga olib kelib, fotolyuminesensiya spektrida emissiya intensivligining pasayishiga sabab bo'ladi. Bu holat yod bilan ishlov berilgan namunalarda FL maksimumlarining nisbatan kuchsizligi bilan tasdiqlanadi. FTIR spektrlarining 500–900  $\text{cm}^{-1}$  "barmoq izi" sohasida Surxon-18 va Surxon-104 navlari hamda legirlangan va legirlanmagan holatlar o'rtasida yaqqol farqlar kuzatildi. Bu farqlar tolalarning kristall va amorf fazalari nisbatining o'zgarishi bilan bog'liq bo'lib, ushbu strukturaviy farqlar FL spektrlarida kuzatilgan emissiya xususiyatlariga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Surxon-18 navli paxta tolalari legirlash jarayoniga nisbatan sezgirroq bo'lib, bu ularning yuqori optik faolligi bilan ifodalanadi.

FL spektrlari tahlili natijasida taqiqlangan zonada joylashgan chuqur energetik sathlarning energiyasi 0,83–0,86 eV oralig'ida ekanligi aniqlandi (2-rasm). Ushbu qiymatlar FTIR spektroskopiya orqali aniqlangan funksional guruhlar va strukturaviy defektlar bilan uzviy bog'liq bo'lib, tolalarning optik xossalarini boshqarish imkonini beradi.



**2-rasm. Surxon-18 KMnO<sub>4</sub> kaliy permanganat bilan legirlangan (1) va Yod ning 5% li spirtidagi eritmasi Surxon-18(2) hamda Yod ning 5% li spirtidagi eritmasi Surxon -104 paxta tolalarining fotolyumensensiya spektri[3].**



Fotoluminesensiya va infraqizil spektroskopiya usullarining kompleks tahlili shuni ko'rsatadiki,  $\text{KMnO}_4$  va yod bilan legirlash Surxon-18 va Surxon-104 navli paxta tolalarining molekulyar tuzilishi va energetik holatlariga sezilarli ta'sir ko'rsatadi.  $\text{KMnO}_4$  bilan legirlangan namunalar yuqori optik faollikni namoyon qilgan bo'lsa, yod bilan ishlov berish emissiya intensivligining pasayishiga olib keladi. Olingan natijalar tabiiy paxta tolalarini optoelektronika, fotodatchiklar va ekologik toza funksional materiallar yaratishda qo'llash imkoniyatlarini kengaytiradi.

### Adabiyotlar

1. Усмонов Х.У, Никонович Г.В. Электронная микроскопия целлюлозы. Тошкент. Издательство Академии наук УзССР. 1962. 264 стр.
2. 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).
3. А.Т.Мамадалимов, З.А.Додобоев, К.Махмудов, Ш.Туйчиев, М.Шерматов. Фотопроводимость хлопковых волокон. Доклады АН РУз 1995г. №5-6. стр.22-24.

## СКАНДИЙ БИЛАН ЛЕГИРЛАНГАН КРЕМНИЙНИНГ ИНФРАҚИЗИЛ ЮТИЛИШ СПЕКТРЛАРИНИ ЎРГАНИШ

Х.С. Далиев<sup>1</sup>, И.Х. Хамиджонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>“МЭИ миллий тадқиқот университети” Федерал давлат бюджети олий таълим муассасасининг Тошкент шаҳридаги филиали, Ўзбекистон, Тошкент

<sup>2</sup>Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника илмий - тадқиқот институти, Ўзбекистон, Тошкент

[islomjon\\_xx@mail.ru](mailto:islomjon_xx@mail.ru)

Яримўтказгичли асбобларнинг асосий материали бўлган кремнийнинг тақиқланган соҳасида чуқур энергетик сатҳ ҳосил қилувчи ҳамда унинг хоссаларини ўзгартириш имкониятини берувчи нодир ер элементларини легирлаб, уларга ташқи факторларнинг таъсирини ва хусусиятларини ўрганиш бўйича кўплаб илмий - тадқиқот ишлар олиб борилган [1-7]. Шу кунларгача олиб борилган илмий - тадқиқот ишларининг таҳлили шуни кўрсатдики, кремнийга скандий атомларини легирлаб, скандий атомларининг кремнийдаги хусусиятлари етарлича ўрганилган. Аммо монокристалл кремнийни ўстириш жараёнида ҳосил бўладиган технологик нуқсонларга скандий атомларининг таъсири бўйича жуда кам маълумотлар мавжуд.

Мазкур илмий иш кремнийга скандий атомларини диффузия усули билан легирлаб, монокристалл кремнийни ўстириш жараёнида ҳосил бўладиган технологик нуқсонлар билан скандий атомларининг таъсирлашув ва скандий атомларининг кремнийдаги хусусиятларини ўрганишга бағишланган. Тадқиқот учун, солиштира қаршилиги 48 Ом·см бўлган, Чохраль усулида ўстирилган р-типли монокристалл кремнийдан фойдаланилган. Киришма элементи сифатида, тозалиги 99.999 % бўлган скандий элементи олинган. Монокристалл кремний намуналарнинг ўлчами 14x7x1 мм га тенг.

Диффузиядан олдин монокристалл кремний намуналарига механик ва кимёвий ишлов берилган. Шу намуналар сиртига ВУП-4 қурилмаси ёрдамида скандий 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 олинди. Диффузия жараёни СУОЛ-4 печи ёрдамида  $T=1200^{\circ}\text{C}$  температурада  $t=20$  соат вақт давомида олиб борилди. Диффузиядан кейин, намуналар тез совитилди. Олинган натижаларни таққослаш учун, солиштира қаршилиги 48 Ом·см бўлган р-типи монокристалл кремний (киришмасиз, контрол) намуналари ҳам кварц шишадан тайёрланган ампулаларга жойлаштирилди. Ампулалар ичидаги ҳаво сўриб олинди ва юқори вакуум олинди. Контрол намуналар ҳам диффузия печи ёрдамида  $T=1200^{\circ}\text{C}$  температурада  $t=20$  соат вақт давомида термик ишлов берилди. Скандий билан легирланган кремний ва контрол намуналарнинг солиштира қаршилиги тўрт зондли усул ёрдамида ўлчанди. Скандий атомлари диффузия қилинган ва термик ишлов берилган контрол намуналарнинг солиштира қаршилигининг қийматлари дастлабки қийматлар билан таққосланди.

Скандий билан легирланган кремний намуналарининг дастлабки солиштира қаршилиги 48 Ом·см бўлган бўлса, диффузиядан кейин намуналарнинг солиштира қаршилиги  $100 \div 120$  Ом·см га ўзгариши ва намуналарнинг ўтказувчанлик типи эса ўзгармай қолгани кузатилди. Термик ишлов берилган контрол намуналарнинг ўтказувчанлик типи ва солиштира қаршилигининг қийматлари ўзгармай қолган. Монокристалл кремнийни ўстириш жараёнида ҳосил бўладиган технологик нуқсонлар (оптик фаол кислород ва оптик фаол углерод) билан скандий атомларининг ўзаро таъсирлашиши ҳам ўрганилди. Оптик фаол кислород  $N_o^{\text{опт}}$  ва оптик фаол углерод  $N_c^{\text{опт}}$  концентрацияларини хона температурасида аниқлаш учун  $370 \div 7800 \text{ см}^{-1}$  диапазонда ишлайдиган ФСМ-2201 инфрақизил спектрометридан фойдаланилди [8]. Кислород учун  $1106 \text{ см}^{-1}$  (9,1 мкм) да ИҚ - ютилиш спектрлари ўлчанди. Углерод учун эса  $607 \div 620 \text{ см}^{-1}$  диапазонда ИҚ - ютилиш спектрлари ўлчанди.

Монокристалл кремний (эталон) намунасининг дастлабки оптик фаол кислород концентрацияси  $N_o^{\text{опт}} = 5,730 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  ва оптик фаол углерод концентрацияси  $N_c^{\text{опт}} = 0,641 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  га тенг эканлиги тадқиқот натижалари асосида аниқланди. Кремнийдаги мавжуд бўлган технологик нуқсонлар кислород ва углерод атомлари бўлиб, уларнинг концентрациялари кремний кристалл панжарасида  $10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$  гача мавжуд бўлади.

Контрол намуналарни  $T=1200^{\circ}\text{C}$  температурада  $t=20$  соат вақт давомида термик ишлов берилгандан кейинги оптик фаол кислород концентрацияси  $N_o^{\text{опт}} = 5,920 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  ва оптик фаол углерод концентрацияси  $N_c^{\text{опт}} = 0,860 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  қийматга ўзгарди. Кремнийга скандий атомларини  $T=1200^{\circ}\text{C}$  температурада  $t=20$  соат вақт давомида диффузия қилинган ва тез совитилган намуналарда эса оптик фаол кислород концентрацияси  $N_o^{\text{опт}} = 5,542 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  ва оптик фаол углерод концентрацияси  $N_c^{\text{опт}} = 0,641 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  қийматга тенг бўлиб қолган. Бундан кўриниб турибдики, скандий атомлари кислород билан комплек ҳосил қилар экан деган хулосага келиш мумкин. Термик ишлов берилган намуналарда эса оптик фаол кислород концентрацияси ортиши кузатилди. Бундан ташқари кремний монокристаллини нодир ер элементлари билан легирланганда ковалент радиусларининг фарқи туфайли ички эластик кучларнинг пайдо бўлишига олиб келади.

#### 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. Н.А.Султанов, З.Мирзажонов, Ф.Т.Юсупов, М.Ф.Ахмаджонов. Свойства уровней скандия в кремнии. "Oriental Renaissance: Innovativa, edicational, natural and social sciences. Scientific Journal Impact Factor. 2021. Volume 1. ISSUE ISSN 2181-1784. SJIF 2021: 5.423. с.380-385.

3. Х.С.Далиев, Б.Э.Эгамбердиев, И.Х.Хамиджонов, Ш.Б.Норкулов, У.К.Эруглиев. Исследование легирования атомами скандия на структуру поверхностного слоя кремния. International Multidisciplinary Research in Academic Science (IMRAS). Volume 7. Issue 04, April (2024) p. 229-237 <https://doi.org/10.5281/zenodo.11069468>.

4. B.E.Egamberdiev, Kh.S.Daliev, I.Kh. Hamidjonov, Sh.B.Norkulov, U.K.Erugliev. Investigation of scandium alloy on the structure of the silicon surface layer. International Journal of Education, Social Science & Humanities. Finland Academic Research Science Publishers. Volume 12. Issue - 4, 2024. p. 894-904 . <https://doi.org/10.5281/zenodo.11075765>

5. Х.С.Далиев, Ш.Б.Утамурадова, И.Х.Хамиджонов, А.Й.Бобоев. Структурные особенности монокристаллического кремния с примесями скандия. Илмий хабарнома. Физика – математика тадқиқотлари. АндДУ. Андижон. 2024 йил №1(6). 54-59 бетлар.

6. Daliev Kh.S., Utamuradova Sh.B., I.Kh. Khamidjonov. Structural features of single – crystal silicon with scandium and yttrium impurities. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures. Vol.20, No.4, October-December 2025, p.1437-1446. <https://doi.org/10.15251/DJNB.2025.204.1437>

7. Х.С.Далиев, И.Х.Хамиджонов. Газ фазаси усулида скандий атомлари билан легирланган кремнийнинг хусусиятлари. Ёш олимлар ва физик талабаларнинг IV Республика илмий анжумани материаллари. Тошкент. 25-май. 2024 йил. 37-39 бетлар.

8. Фурье-спектрометры инфракрасные ФСМ. Санкт – Петербург. 2021 г.

## ВЛИЯНИЕ ТИПА ПОДЛОЖКИ НА МОРФОЛОГИЮ ТОНКИХ ПЛЁНОК $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$

Ш.Б. Утамурадова<sup>1</sup>, К.М. Файзуллаев<sup>1</sup>, А.В. Станчик<sup>2</sup>

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

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

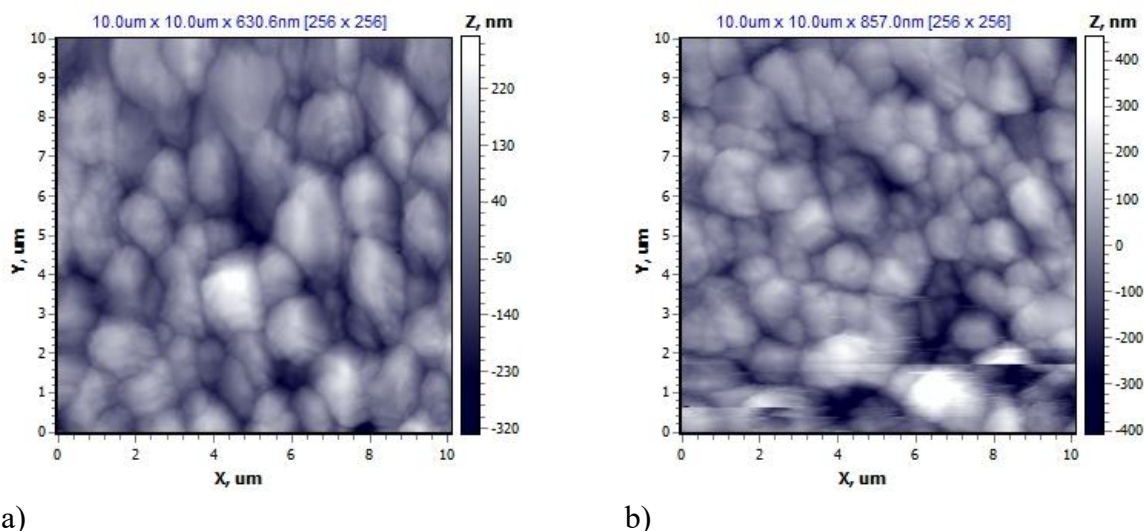
Сложное халькогенидное соединение  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$  активно исследуется в качестве материала для изготовления современных энергетических и функциональных устройств благодаря их подходящим физико-химическим характеристикам. В частности, тонкие плёнки  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$  демонстрируют высокую фотоэлектрическую активность и значительный коэффициент поглощения, что делает их перспективными светопоглощающими материалами для тонкоплёночных солнечных элементов [1]. Соединение  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$  также отличается стабильностью и низкой стоимостью компонентов, что выгодно выделяет его на фоне традиционных полупроводников, таких как CdTe или CuInGaSe<sub>2</sub> [2,3].

В последние годы растёт интерес к созданию высокоэффективных солнечных элементов на основе тонких плёнок  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ , включая как экспериментальные исследования технологии синтеза плёнок, так и теоретическое моделирование солнечных ячеек с оптимизацией параметров устройств [4,5]. Помимо фотовольтаики, исследования также показывают, что соединение  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$  и, в особенности, гетероструктуры на его основе обладают перспективными термоэлектрическими свойствами, что расширяет возможности его применения в системах преобразования тепловой энергии [6].

Одним из наиболее информативных методов для анализа поверхности материалов на наноуровне является атомно-силовая микроскопия (АСМ), также известная как Atomic Force Microscopy (AFM). Этот метод позволяет получать подробные топографические изображения поверхности с нанометровым разрешением и предоставляет информацию о микроструктуре, шероховатости и морфологии материала. АСМ используется для изучения поверхностей проводящих и непроводящих материалов, включая полупроводники, такие как  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ , для оценки их текстуры, распределения дефектов, границ зерен и других характеристик, которые могут существенно влиять на их функциональные свойства.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния типа подложки (стекло/Мо и Ti-фольга) на параметры шероховатости и структуру поверхности плёнок  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ . Плёнки были получены двухэтапным методом, который включал магнетронное напыление металлических прекурсоров и их последующий отжиг в парах серы и селена. Исследование морфологии поверхности образцов проведено с помощью атомно-силового микроскопа NT 206 (Microtestmachines Co., Беларусь).

На рисунке 1 представлены двумерные АСМ-изображения поверхности тонких плёнок  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ , полученных на подложках стекло/Мо и Ti-фольга. В обоих случаях наблюдается выраженная однородная зернистая структура, характерная для многокомпонентных халькогенидов. Тип подложки оказывает заметное влияние на размеры зерен и параметры шероховатости.



**Рис. 1. АСМ-изображения тонких плёнок  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ , полученных на различных подложках: (а) стекло/Мо и (b) Ti-фольга**

Плёнки  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$  на подложке стекло/Мо демонстрируют более крупные зерна на поверхности, размер которых достигает 3 мкм, по сравнению с пленками на подложке из Ti-фольги. При этом перепад высот неровности рельефа для плёнок на подложке стекло/Мо



и Ti-фольга составляет 630 и 857 нм, соответственно; как видно значения отличаются незначительно. Во втором случае большие значения высоты рельефа могут быть обусловлены более грубой поверхностью титановой фольги по сравнению с плёнкой молибдена на стекле.

Параметры шероховатости поверхности тонких плёнок  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ , полученных на различных типах подложек, также отличаются незначительно. Так, для плёнок на подложке стекло/Мо средняя арифметическая ( $R_a$ ) и квадратичная ( $R_q$ ) шероховатость поверхности составляет 63 нм и 79 нм, соответственно. В то время как для плёнок на Ti-фольге данные параметры составляют 79 нм и 103 нм, соответственно. Большие значения параметров шероховатости для плёнок на подложках из Ti-фольги, как отмечалось выше, обусловлены более грубой поверхностью металлической фольги по сравнению с плёнкой молибдена, нанесенной на стекло.

Таким образом, можно заключить, что выбор типа подложки оказывает влияние на морфологию поверхности тонких плёнок  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$ . При использовании подложки из стекла с подслоем Мо формируется более гладкая поверхность плёнки с более крупными зёрнами и с меньшей степенью шероховатости, чем на подложках из титановой фольги. Подобные различия могут оказывать влияние на последующие оптические и электрические свойства материала, включая перенос носителей заряда и концентрацию поверхностных дефектов.

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. Dridi S., Bitri N., Mahjoubi S., Chaabouni F., Ly I. and Bougriou A. One-step spray of  $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$  thin films as absorber materials for photovoltaic applications // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. –2020. –Vol. 31, –P. 7193.
2. Fernandes P., Srihari M. and Leitão J. P. Comparison of environmentally friendly Cu-based quaternary chalcogenides with CdTe and CIGS absorbers // Materials Science in Semiconductor Processing. –2022. –Vol. 127, –P. 105.
3. Zhang L., Sun K. and Li Y. Structural stability and optical properties of  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$  thin films for sustainable photovoltaic applications // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2021. –Vol. 230, –P. 1.
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  $\text{Cu}_2\text{NiSn}(\text{S},\text{Se})_4$  Thin Films Obtained by an Electrodeposition-Annealing Process // Coatings. – 2022. – Vol. 12, N. 8. – P. 1198.
5. Khatun M. M., Hosen A. and Al Ahmed S. R. Evaluating the performance of efficient  $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4$  solar cell—A two stage theoretical attempt and comparison to experiments // Heliyon. –2023. –Vol. 9, N. 10. –P. e20603.
6. Mani J., Radha S., Shalini Devi T. R., Rajkumar R., Arivanandhan M. and Anbalagan G. Effect of energy filtering on  $\text{Cu}_2\text{NiSnS}_4/\text{CuO}$  composites for thermoelectric applications // J. Mater. Sci. –2024. –Vol.59. –P. 8911.

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО НИКЕЛЕМ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

Ш.Х.Далиев, Ш.А.Исмоилов

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

*e-mail: [ismoilov-2015@inbox.ru](mailto:ismoilov-2015@inbox.ru)*

Одним из ключевых направлений развития солнечной энергетики является поиск новых полупроводниковых материалов с более высокой фотоактивностью, меньшими потерями в кристалле и улучшенными характеристиками переноса носителей заряда. Классический кремний остаётся базовым материалом, однако его свойства можно значительно улучшить за счёт введения переходных металлов, образующих локальные уровни в запрещённой зоне. Создание новых полупроводниковых структур для солнечной энергетики основано на контролируемой модификации энергетической структуры кристалла. Согласно классическим работам по физике примесных центров в кремнии [1,2], добавление переходных металлов приводит к появлению глубоких уровней в запрещённой зоне и изменяет рекомбинационные процессы. Никель, как показано в современных исследованиях [3,4], образует устойчивые комплексы Ni-Si, которые могут повышать эффективность фотогенерации при определённых режимах обработки. Никель (Ni) является одним из наиболее интересных модификаторов кремния по следующим причинам: образует устойчивые комплексы Ni-Si и Ni-Si-O; способствует изменению локальной электронной плотности состояний; ускоряет рекомбинацию дефектов при высокотемпературной обработке; влияет на ширину и положение Raman-пиков, что коррелирует с кристаллической деформацией. Эти свойства позволяют использовать Ni-легированный Si в солнечных элементах с улучшенной фотогенерацией и повышенной плотностью тока. Данная работа направлена на исследование влияния Ni на вибрационные и электрические свойства кремния KEF-35 с целью оценки его потенциала в солнечных структурах. Ранее работы авторов [5,6] показали, что переходные металлы могут значительно менять структуру дефектов и поведение носителей в Si, что делает данное направление актуальным и практически значимым.

Образцы KEF-35 подвергались химическому никелированию, после чего проводился высокотемпературный отжиг при  $T = 900\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 2\text{ s}$ . Исследования включали: Raman-спектроскопию; измерения ёмкостно-вольтовых характеристик (C-V) при 78 K и 295 K; анализ температурной зависимости ёмкости  $\Delta C(T)$ ; измерение удельного сопротивления при 700–1200  $^{\circ}\text{C}$ .

Анализ пиков показывает: 1. Пик 520–523  $\text{cm}^{-1}$  — основная оптическая мода Si. У Ni-легированного образца наблюдается уменьшение интенсивности и незначительный сдвиг. Это связано с деформацией решётки из-за включений Ni. 2. Область 900–1100  $\text{cm}^{-1}$  — комбинационные моды, чувствительные к наличию металлических кластеров.

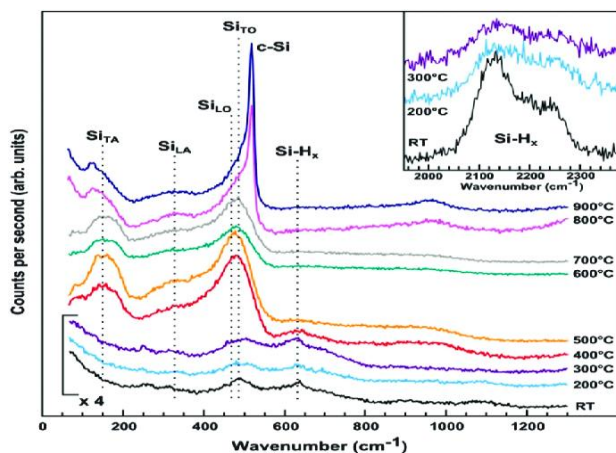


Рисунок 1. Раман-спектры исходного Si и Si<Ni> при T = 900 °C.

3. Новые слабые пики в области 1400–1700  $\text{cm}^{-1}$  — признаки формирования связей Ni–Si или Ni–Si–O. Эти изменения свидетельствуют о появлении дополнительных электронно-фононных взаимодействий, что важно для управления рекомбинацией в солнечных элементах.

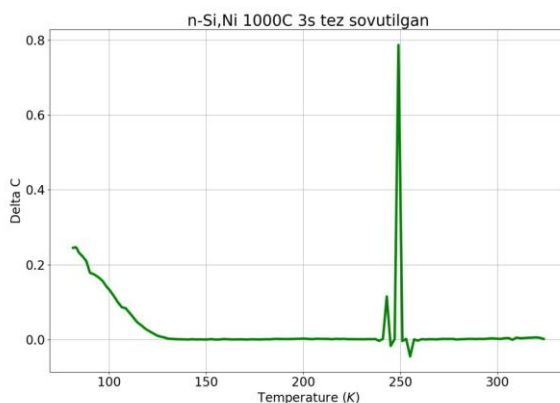


Рисунок 2. Температурная зависимость  $\Delta C(T)$  для n-Si<Ni> после отжига 1000 °C.

При  $T \approx 250$  K фиксируется ярко выраженный пик, характерный для активации глубоких уровней Ni. Это подтверждает присутствие ловушек, влияющих на генерацию-рекомбинацию в солнечных структурах. Подобные уровни могут использоваться в промежуточных зонных фотопреобразователях повышенной эффективности.

### 3.3. C–V характеристики при 78 K и 295 K

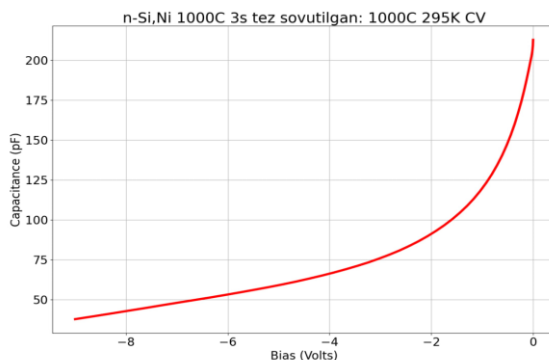
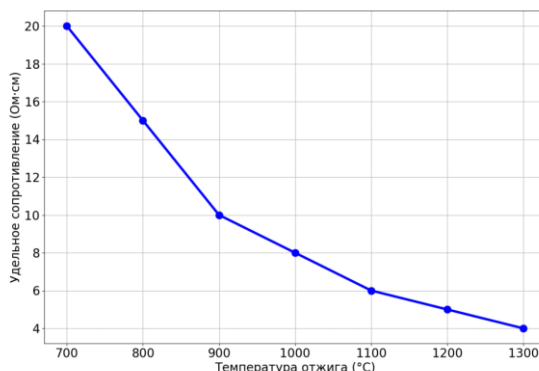


Рисунок 3. C–V характеристики Si<Ni> при различных температурах.

Наблюдается: Рост ёмкости при приближении к 0 V — свидетельство поверхностного обеднения и перераспределения носителей. Изменение наклона кривых между 78 К и 295 К указывает на присутствие термически активируемых ловушек. Более высокая ёмкость после легирования Ni — увеличение эффективного уровня легирования. Эти данные важны для расчёта токов короткого замыкания в солнечных структурах.

### 3.4. Влияние температуры отжига на удельное сопротивление



**Рисунок 4. Зависимость удельного сопротивления Si<Ni> от температуры отжига.**

При  $T \geq 1100$  °C сопротивление резко возрастает, что может быть связано: с активацией Ni-комплексов; с образованием глубоких ловушек; с перераспределением легирующих центров. Такие данные позволяют оптимизировать термическую обработку солнечных элементов.

Проведённые исследования показывают, что никель существенно изменяет физические свойства кремния. Основные выводы: 1. Ni вызывает сжатие решётки и модификацию Raman-пигов, что отражает перестройку кристаллической структуры. 2. Появление температурно-активируемых ловушек влияет на фотоэлектрические характеристики и может быть использовано для повышения эффективности солнечных элементов. 3. Ni-легированный Si является перспективным материалом для новых солнечных элементов, включая структуры с промежуточной зоной, барьерные элементы и датчики солнечного спектра. Работа демонстрирует, что направленное легирование Ni является эффективным способом улучшения функциональных свойств кремния для солнечной энергетики.

### Список литературы

1. Власов В.А., Михайлов А.П. Физика полупроводников. Москва: Наука, 2018.
2. Weber J. Transition metals in silicon. Applied Physics A, 1983, 30(1): 1–22.
3. Pearton S.J. Impurities and Defects in Group IV Semiconductors. Springer, 2015.
4. Tsetseris L., Pantelides S. Transition-metal interactions with Si defects. Phys. Rev. B, 2009, 79: 115208.
5. Ismailov Sh.A. Structural modification of Si doped with transition metals. Journal of Semiconductors, 2025.
6. Daliev Sh.Kh., Utamuradova Sh.B. High-temperature defect engineering in silicon. Semiconductors, 2022.



## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ПРИМЕСНЫМИ АТОМАМИ ХРОМА

Н.Ф. Зикриллаев<sup>1</sup>, Т.Б. Исмаилов<sup>2</sup>, А.Т. Юлдошев<sup>3</sup>, У.А. Ешимова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека

<sup>3</sup>Самаркандский государственный университет

Одним из эффективных подходов к формированию магнитных свойств кремния является введение в его кристаллическую решетку парамагнитных примесей, в частности атомов хрома (Cr). По нашему мнению, для устройств спинтроники наиболее перспективными являются кремниевые материалы, содержащие магнитные наноразмерные кластеры. В данной работе исследовалась возможность получения кремния с магнитными свойствами методом диффузионного легирования хромом. Для получения кремния, легированного примесными атомами Cr, использовался монокристаллический кремний *p*-типа с удельным сопротивлением  $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  и  $\rho = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Температура и время диффузии подбирались таким образом, чтобы после диффузионного отжига образцы с примесными атомами хрома оставались сильно компенсированными *p*-типа. Результаты исследования показали, что в образцах  $\text{Si}\langle\text{Cr}\rangle$  с понижением температуры положительное магнетосопротивление переходит в отрицательное. При дальнейшем понижении температуры величина отрицательного магнетосопротивления возрастает и при температуре  $T = 100 \text{ К}$  достигает значения  $\Delta\rho/\rho = 45\text{--}50 \%$ . Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что диффузионное легирование кремния атомами хрома позволяет формировать материалы с выраженными магнитотранспортными свойствами, что представляет интерес для разработки магнитных полупроводниковых структур на основе кремния [1,2]. Получение магнитных полупроводниковых материалов для современной спинтроники представляет значительный научный и практический интерес. Одним из подходов к формированию магнитных свойств в кремнии является внедрение парамагнитных примесей, таких как хром. Атомы хрома в кристаллической решетке кремния преимущественно занимают междоузельные положения и проявляют донорные свойства. Они обладают ненулевым спиновым моментом, что обуславливает возможность формирования магнитных эффектов в кремнии [3,4]. Существенным ограничением является низкая предельная растворимость хрома в электроактивном состоянии, однако при оптимальных условиях диффузии и высокой скорости охлаждения возможно получение кремния, в котором значительная часть примесных атомов хрома находится в электроактивном состоянии [5,6].

**Таблица 1**

Электронная структура и параметры примесных атомов Cr, в кремнии

| Элемент | Электронная структура | Спин          | Полная предельная растворимость, $\text{см}^{-3}$ | Электроактивная часть предельной растворимости, $\text{см}^{-3}$ | Энергетические уровни в кремнии |
|---------|-----------------------|---------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Cr      | $3d^5 4s^1$           | $\frac{5}{2}$ | $10^{16}$                                         | $10^{14}$                                                        | Эс – 0.41                       |

Установлено, что в образцах кремния, легированных примесными атомами хрома ( $\text{Si}\langle\text{Cr}\rangle$ ), наблюдается преимущественно слабое положительное магнетосопротивление, величина которого не превышает 6 %.

Таблица 2

Электрофизические параметры кремния, легированного атомами Cr, Mn, Fe, Co и Ni

| Образы | $\rho$ , Ом·см          | Тип проводимости | Концентрация носителей заряда, см <sup>-3</sup> | Подвижность носителей заряда, см <sup>2</sup> /В·с |
|--------|-------------------------|------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Si<Cr> | $(5 \div 6) \cdot 10^3$ | p                | $3,8 \cdot 10^{12}$                             | 250 ÷ 270                                          |

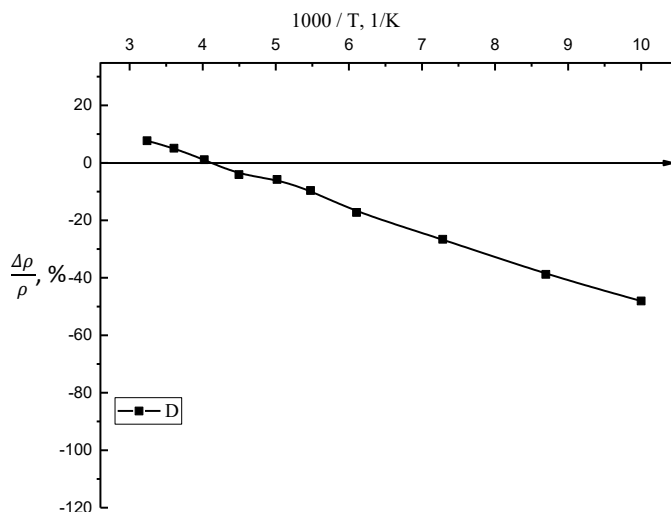


Рис.1. Зависимость магнетосопротивления от температуры для образцов Si<Cr>, при E=200 В/см, B=2 Тл.

Интересные результаты были получены при исследовании температурной зависимости магнитного сопротивления  $\Delta\rho/\rho$  в интервале температур  $T = 100\text{--}380$  К. Нами было исследовано магнетосопротивление в зависимости от температуры в образцах Si<Cr> в электрическом поле  $E = 200$  В/см и магнитном поле  $B = 2$  Тл (рис. 1).

Результаты показали, что при понижении температуры в образцах Si<Cr> происходит изменение характера магнетосопротивления, что указывает на существенное влияние температурных факторов на магнитотранспортные свойства кремния, легированного примесными атомами хрома.

### Литература

- [1] A. Hirohataa, K. Yamadab, Y. Nakatanic, I.L. Prejbeanud, B. Diényd, P. Pirroe, B. Hillebrands, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 509, 166711, (2020).
- [2] M. Bolduc, C. Awo-Affouda, A. Stollenwerk, M. B. Huang, F. G. Ramos, G. Agnello, and V. P. LaBella, *Physical Review B* 71, 033302 (2005).
- [3] Hung-Ta Lin, Wei-Ji Huang, Shuo-Hong Wang, Hsiu-Hau Lin and Tsung-Shune Chin, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(9), 095004 (2008).
- [4] D. J. Fisher, *Diffusion in Silicon: 10 Years of Research* (Scitec publications, 2010), pp. 339.
- [5] B. I. Boltaks, *Diffusion and Point Defects in Semiconductors* (Nauka, Leningrad, 1972), pp. 384.
- [6] C. Awo-Affouda, M. Bolduc, M. B. Huang, F. G. Ramos, K. A. Dunn, B. Thiel, G. Agnello, and V. P. LaBella, *Journal of Vacuum Science and Technology A* 24, 1644 (2006).

## СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Б.Л. Оксенгендлер<sup>\*,1</sup>, С.Х. Сулейманов<sup>1</sup>, Н.Н.Никифорова<sup>1</sup>,  
Ф.А.Искандарова<sup>1</sup>, Г.Й. Ахматова<sup>1</sup>, Р.Р. Иброхимов<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>Институт Материаловедения Академии Наук Республики Узбекистан,  
Ташкент, 100084, ул Бодомзор йули 2Б.

<sup>2</sup>Ташкентский государственный технический Университет, Узбекистан, Ташкент,  
100095, ул. Университетская, 2А

\*e-mail: oksengendlerbl@yandex.ru

За прошедшие более чем 170 лет первые эффекты с радиационным воздействием на среды стало очевидно, что все скачки прогресса в области радиационной физики и технологии объектов неживой и живой Природы связаны с тремя факторами: появлением новых материалов; появлением новых облучающих аппаратов; и развитием новых мощных теоретических концепций взаимодействия радиации с веществом [1].

Именно к таким концепциям относится концепция «Complexity», базирующаяся на синергетике, реализованной в трех парадигмах, и синергистики, реализованной на одной парадигме (рис.1).

Отметим, что реализация хотя бы одного свойства особенности структуры приводит к «Complexity», на практике, однако, выявились ситуации, когда целый ряд таких свойств реализуется одновременно и среда демонстрирует фрактонное поведение при облучения [1]. В этой схеме особый интерес вызывают механизмы, приводящие к рождению **нового** (т.н. «эмерджентность»). По-видимому, можно предложить многообразные варианты появления «нового», в частности если «результат» будет зависеть от **совместного действия нескольких «причин»** различной природы. Можно предположить, что такая зависимость, обусловленная какими-то особыми механизмами, которые принято обсуждать в рамках синергизма.

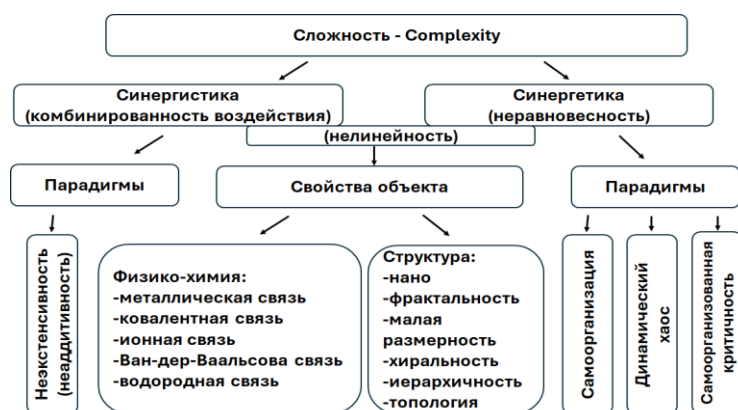


Рис. 1. Схема расширенной концепции «Complexity» применительно к радиационным эффектам в сложных средах, отражающая состояние интереса исследователей по РФТТ в первой половине XX века (роль физико-химии) и современный интерес конца XX века – начало XXI века (проблема структуры).

Резюмируем суть сказанного. Базовая идея синергистики (или более общо – **Синергизма**) – нахождение **механизмов неаддитивного усиления** (ослабления) результата облучения с несколькими факторами воздействия. Натурфилософские основы синергизма к настоящему времени проработаны весьма основательно и связываются с так называемым **холизмом**, в противовес **редукционизму**. В самом общем случае, холизм, в применении к синергизму представлен процессами, в результате которых «**полученное**

целое» оказывается больше **простой суммы**. Под это определение подпадает множество ситуаций, в том числе и с участием радиационного воздействия.

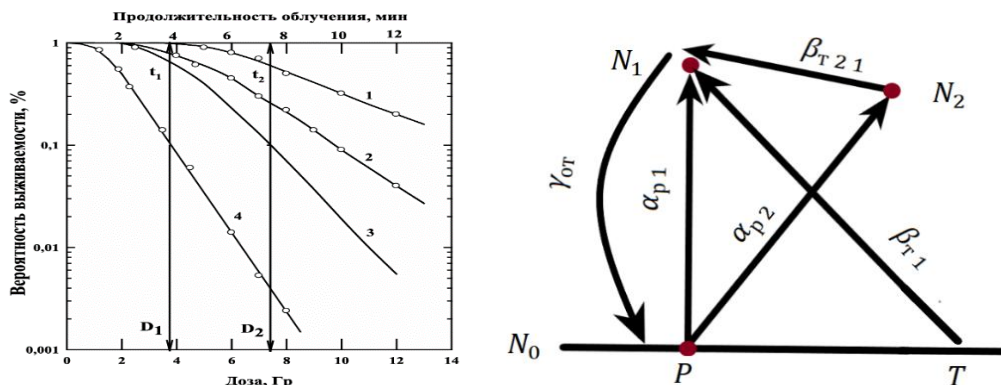


Рис. 2 а - Пример из радиационной онкологии количественной оценки коэффициента синергического усиления деструкции опухоли (Е.С. Евстратова, В.Г. Петин 2020 г.); б – Диаграмная техника, позволяющая проанализировать кинетику двухфакторного повреждения раковой опухоли.

В качестве примера рассмотрим случаи двух факторов воздействия (рис.2). Кинетика эффекта накопления дозы такова: 1 – соответствует **отдельному** фактору теплового разогрева; 2 - соответствует кинетике **отдельного** фактора облучения; 3 – соответствует **теоретической простой сумме** одновременного (комбинированного) воздействия указанных двух факторов; 4 – **экспериментальная** кривая показывающая, что эффект комбинированного воздействия двух факторов различной природы (радиация+тепло), неаддитивен и сильнее простой теоретической суммы. В качестве безразмерного параметра этой **неаддитивности** (зависящей от дозы) можно выбрать выражение

$$Q(t) = [N_4(t) - N_3(t)] / [N_4(t) + N_3(t)] \quad (1)$$

Видно, что неаддитивность возрастает с дозой, что указывает на глубокую перестройку объекта при облучении. Это мотивирует на поиск еще более фундаментальных подходов к радиационной физике, например, подхода Тцаллиса, который в конце прошлого века ввел понятие деформированной термодинамики и статистической физики: используя параметр деформации  $q$ , он сумел описать  $q$  деформированную энтропию [2]. В настоящей работе этот подход будет расширен нами на РФКС.

$$S_q = - \sum_i p_i \left( \frac{p_i^{q-1} - 1}{q-1} \right) \quad (2)$$

Здесь  $p_i$  – больцмановская вероятность состояния  $i$ , а важное уравнение  $Q_p = \frac{|N_4(t) - N_3(t)|}{|N_4(t) + N_3(t)|} = 1 - q$  задает возможность создания «мостика» между экспериментами по радиационному воздействию (например, X-облучение – рис.2 ) и теорией Тцаллиса, тем более что в современном варианте величина  $q$  является  $q$ -триплетом:  $q = (q_1, q_2, q_3)$  [2]. Важнейшим обстоятельством является то что величина  $q_1$  характеризует зависимость изучаемого эффекта от начальных условий - «эффект бабочки», величина  $q_2$  определяет характер релаксации системы – либо экспоненциальной, либо степенной; величина  $q_3$  определяет характеристики стационарного состояния облучаемой системы. Если еще учесть  $q$  деформированные характеристики Тцаллиса (типа  $S_q$  и т.д.), то при  $q \rightarrow 1$  получаются все величины термодинамики и статистики Больцмана-Гиббса характерные для аддитивных систем, и можно оценить возможную огромную пользу от анализа радиационных процессов в живой и неживой природы именно при фундаментальном подходе Тцаллиса. Понятно, что его роль возрастает при излучении особо сложных



процессов в сложных материалах, примерами чего может быть радиационная онкология, радиационная биология и радиационная технология, например, реализуемая в Большой Солнечной Печи, где имеют место четыре базовых факторов (!)

**Список литературы:**

1. Oksengendler B.L., Iskandarova F.A., Suleimanov S. et. al. Interaction of Radiation with Hierarchical Structures // *Journal of Surface Investigation X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. - 2023. - V.17 (1). – P.31-42. <https://doi.org/10.1134/S1027451023010196>
2. Ferri G.L., Reynoso Savio M.F., Plastino A., Tsallis' - triplet and the ozone layer // *Physica A..* – 2004. – V.340 (1). – P.1829-1833. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSA.2009.12.020>

**ELECTROPHYSICAL AND STRUCTURAL ADVANTAGES OF LUTETIUM-DOPED SILICON**

**K.S. Daliev<sup>1</sup>, V.F. Gremenok<sup>2</sup>, Z.E. Bahronkulov<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan 20 Yangi Almazar st.,*

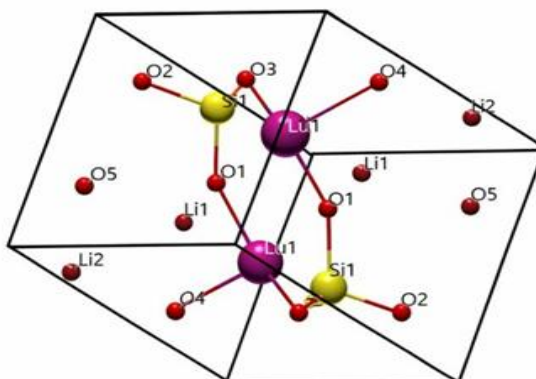
<sup>2</sup>*Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus, P. Brovki Str. 19, 220072 Minsk, Republic of Belarus*

*\*Corresponding Author e-mail: [zbakhronkulov@inbox.ru](mailto:zbakhronkulov@inbox.ru)*

The rapid development of semiconductor physics and microelectronics technologies has sharply increased the demand for expanding the functional capabilities of silicon-based materials. Although conventional doping methods allow control over the electrical properties of silicon to some extent, such approaches are increasingly insufficient for modern electronic devices operating under high-precision, high-temperature, and radiation-intensive conditions. Therefore, the search for new dopant elements capable of modifying the internal energy structure of the silicon crystal at a deeper level has become an urgent scientific challenge.

The incorporation of lutetium into silicon holds profound scientific and practical significance from the perspective of modern semiconductor physics, as this process enables control over the internal electronic structure, defect states, and functional properties of silicon-based materials. Experimental observations show that when lutetium atoms are incorporated into the silicon crystal lattice, they exhibit acceptor behavior, which leads to a redistribution of the majority charge carrier concentration in n-type silicon. As a result, the electrical conduction mechanism is governed not only by free electrons but also by recombination–generation processes occurring through deep energy levels. This manifests as a reduction in hysteresis effects in current–voltage and capacitance–voltage characteristics, a more stable capacitance-voltage relationship, and increased electrical stability of surface-barrier structures. This provides a significant advantage for electronic devices requiring high precision.

The defect system in lutetium-doped silicon also undergoes qualitative changes. Vacancies, dislocations, and oxygen-related complexes naturally present in silicon transition to energetically more stable states in the presence of lutetium atoms. This process leads to the ordered formation of deep energy levels and reduces the probability of random charge carrier trapping. Consequently, the activity of recombination centers decreases, resulting in increased carrier lifetime and improved reliability of the semiconductor. Notably, in thermally treated n-Si<Lu> samples, the stability of deep levels is maintained even at elevated temperatures, confirming the strong incorporation of lutetium atoms into the silicon lattice.



**Figure 1. Atomic-crystal model of the lutetium-doped silicon–oxygen system: arrangement of Lu–O–Si complexes in the unit cell.**

In the lattice shown in the figure, Lu (lutetium) atoms play a central role, forming multiple coordinated bonds with surrounding O (oxygen) atoms. This behavior is explained by lutetium's strong oxophilicity, meaning that in the silicon environment, Lu does not directly bond with Si atoms but primarily forms bridge-like Lu–O–Si connections through oxygen. As a result, local structural distortions arise in the silicon lattice; however, these distortions are not random but manifest as energetically stable complexes.

Si (yellow spheres) atoms are bonded to oxygen in a tetrahedral environment, indicating a local configuration similar to silicon oxide. This shows that the introduction of lutetium partially disrupts the pure Si–Si covalent bonds in silicon, leading to mixed Si–O–Si and Lu–O–Si bonds. Physically, this affects the electronic band structure of silicon: deep energy levels appear within the forbidden gap.

From an optical perspective, lutetium incorporation causes significant changes in the infrared absorption and Raman spectra of silicon. The emergence of vibrational modes corresponding to Si–O–Si and Lu–O bonds indicates the formation of complex chemical structures both at the surface and in the bulk of silicon. This provides the possibility to control not only the electronic but also the optoelectronic properties of silicon. Consequently, such materials are promising for photodetectors, infrared-sensitive elements, and integrated electronic-optical devices.

Thus, the incorporation of lutetium into silicon should be considered not merely as doping, but as a complex physical process that reorganizes the internal energetic and structural balance of the silicon crystal. Lutetium atoms enable simultaneous control over charge carriers, defects, and energy-level systems. This significantly expands the functional capabilities of silicon-based materials, making them highly effective candidates for current and future microelectronics technologies.

This work was carried out through a collaboration between the Scientific Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics and the Scientific-Production Research Center for Materials Science of the National Academy of Sciences of Belarus.

#### References.

1. Kh.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, Z.E. Bahronkulov, A.Kh. Khaitbaev, J.J. Hamdamov, *East Eur. J. Phys.* 4, 193 (2023).
2. Kh.S. Daliev, Z.E. Bahronkulov, J.J. Hamdamov, *East Eur. J. Phys.* 4, 167 (2023).
3. Daliev, Kh.S., Utamuradova, Sh.B., Khamdamov, J.J. & Bahronkulov, Z.E. (2024). Electrophysical properties of silicon doped with lutetium. *Advanced Physical Research*, 2024. 6(1), 42-49.

4. Kh.S. Daliev, Sh.B. Utamuradova, J.J. Khamdamov, Z.E. Bahronkulov, East Eur. J. Phys. 2, 304 (2024).
5. Daliev Kh. S., Utamuradova Sh. B., Hamdamov J.J, Bahronqulov Z. E. IR absorption spectrum of silicon doped with lutetium Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference «Science and Education in Progress» December 26-28, 2023 Dublin, Ireland, pp.417-421.

## СТАБИЛИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

Ш.Х. Далиев, Ф.А. Сапаров

НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУЗ им. М. Улугбека,  
Узбекистан, 100057, Ташкент, ул. Янги Алмазар, 20  
e-mail: [sfa@inbox.ru](mailto:sfa@inbox.ru)

Актуальность изучения переходного слоя Si-SiO<sub>2</sub> обусловлена его существенным вкладом в физико-химические свойства интерфейса в оксидных гетероструктурах. В работе исследуется характер воздействия внешних факторов на свойства таких слоёв, формирующихся при создании многослойных кремниевых систем по созданию фотовольтаиков.

В рамках комплексного исследования были детально проанализированы две группы гетероструктур, сформированных на монокристаллической подложке p-типа кремния с ориентацией (111).

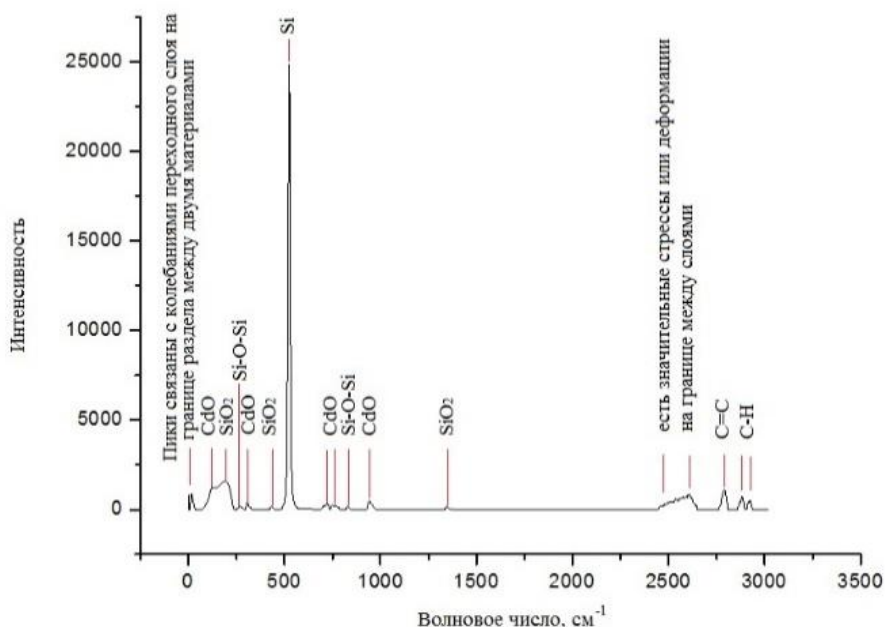


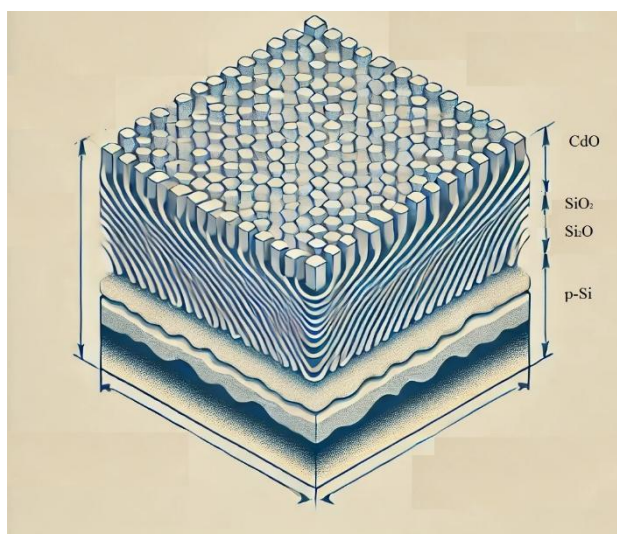
Рис. 1. Раман-спектр структуры p-Si/SiO<sub>2</sub>-CdO. На графике представлены характеристики колебательных мод, соответствующих Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>2</sub>O и CdO. Обнаруженные пики, связанные с Si<sub>2</sub>O, подтверждают формирование переходного слоя

Полученная структура представлена последовательностью слоёв:  $p\text{-Si} \rightarrow \text{Si}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CdO}$ . Здесь особую научную значимость приобретает квазимолекулярный переходный слой  $\text{Si}_2\text{O}$ , образующийся в результате межфазных реакций между кристаллическим кремнием и аморфным диоксидом кремния. Этот буферный слой играет решающую роль в снижении межфазного натяжения и стабилизации границ раздела. Верхний слой  $\text{CdO}$  представлен кубической фазой оксида кадмия, известного своими высокими показателями электронной проводимости и широким диапазоном применения в оптоэлектронных устройствах. Для исследования структурных и фазовых характеристик оксидного слоя применялся метод Раман-спектроскопии. Результат (Рис. 1) выявил характерные пики, соответствующие соединениям  $\text{Si}$ ,  $\text{Si}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CdO}$ . Зарегистрированные спектральные линии указывают на формирование однородного и качественного оксидного слоя, без наличия посторонних примесных соединений.

На основе полученного спектра была проведена детальная оценка фазового распределения и структурных деформаций в кремниевых образцах. Анализ спектральных пиков позволил выявить ключевые особенности, связанные с межслойными взаимодействиями и механическими напряжениями на границах раздела материалов.

Роль переходного слоя  $\text{Si}_2\text{O}$  Квазимолекулярный слой оксида кремния ( $\text{Si}_2\text{O}$ ) представляет собой уникальную фазу, обладающую частичной кристалличностью и играющую роль энергетического буфера. Он снижает механические напряжения, возникающие из-за различий в коэффициентах теплового расширения между кремнием и оксидными покрытиями. С точки зрения электронной структуры, слой  $\text{Si}_2\text{O}$  способствует более благоприятному выравниванию энергетических уровней, снижая потенциальные барьеры для носителей заряда.

Полученные экспериментальные данные были визуализированы в виде рентгеновских дифрактограмм, спектров Рамана и схем структуры слоёв. Визуализации, созданные при участии ИИ (Рис. 2), точно воспроизводят соотношения слоёв: 62% ( $p\text{-Si}$ ), 14% ( $\text{Si}_2\text{O} + \text{SiO}_2$ ), 24% ( $\text{CdO}$ ), и сопровождаются изображениями кубической решётки  $\text{CdO}$  и аморфной матрицы  $\text{SiO}_2$ .



**Рисунок 2.** Визуализация полученной структуры.

Методы XRD подтвердили ориентацию подложки по  $\text{Si}(111)$  — интенсивный пик при  $2\theta \approx 28^\circ$ . В структуре  $p\text{-Si}/\text{SiO}_2/\text{CdO}$  зафиксированы пики при  $2\theta \approx 32^\circ$  и  $38^\circ$ , характерные для кубической решётки  $\text{CdO}$ . Однако в ряде участков спектра наблюдалось ослабление



этих пиков и усиление аморфного фона, что указывает на частичное замещение CdO квазимолекулярным слоем SiO<sub>2</sub>.

- Наличие слоя SiO<sub>2</sub> в структуре p-Si/SiO<sub>2</sub>/CdO обеспечивает буферизацию, снижение межфазного натяжения и более стабильное соединение кристаллического кремния с оксидом металла.

- Частичное преобразование CdO в SiO<sub>2</sub> подтверждает наличие активных диффузионных процессов и подчёркивает необходимость оптимизации условий осаждения.

- Использование квазимолекулярных буферных слоёв — перспективное направление в инженерии многослойных систем на базе кремния и оксидов металлов.

### Литература

1. Sh.Kh. Daliev, and F.A. Saparov, "On the properties of the Si-SiO<sub>2</sub> transition layer in multilayer silicon structures" // East European Journal of Physics, 2023. (4), pp. 206-209.
2. Sh. Kh. Daliev, F. A. Saparov Influence of the interface on the electrical characteristics of MIS structures // The European science review, №1-2, 2022, pp. 31-35.
3. Sh. Kh. Daliev, F. A. Saparov Effect of pressure on the relaxation characteristics of MOS structures // "Yarimo'tkazgichlar va polimerlar fizikasining dolzarb muammolari" mavzusidagi Respublika ilmiy-amaliy anjumani Toshkent. 2022. pp.33-35
4. Sh. Kh. Daliev, F. A. Saparov and F. Umarov. "Influence of thermal field treatments on the volt-farad characteristics of MDS structures." // SCIENCE AND WORLD International scientific journal № 10 (98) Vol 2 (2021): pp. 8-11.
5. A. A. Dakhel. Influence of Be doping on the characteristics of CdO/p-Si heterojunction for optoresponse applications. // Bull. Mater. Sci., V. 37, No. 6, October 2014, pp. 1509–1514.

### KM<sub>n</sub>O<sub>4</sub> BILAN LEGIRLANGAN KANOP TOLALARINING ELEKTRO'TKAZUVCHANLIGI

A. T.Mamadalimov<sup>1,2</sup>, N.K.Xakimova<sup>1</sup>, Sh.M.Norbekov<sup>2</sup>, D.A.Azimova<sup>2</sup>,  
D.E.Xazratov<sup>2</sup>, F.A.Berdikulova<sup>2</sup>, O.B.Nabiyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti

<sup>2</sup>Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti

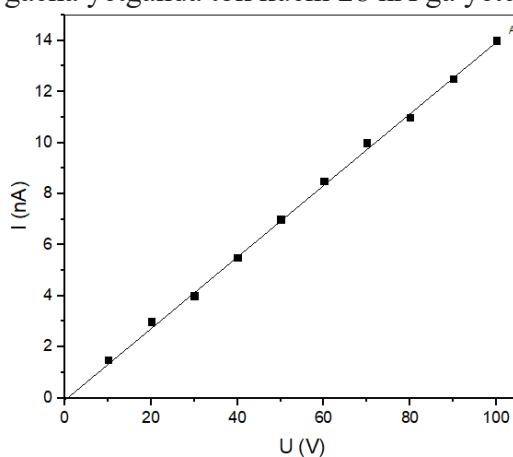
E-mail: [Khakimova\\_nilufar@mail.ru](mailto:Khakimova_nilufar@mail.ru)

Hozirgi vaqtda mikroelektronika sanoati o'z rivojlanishining yuqori bosqichiga yetgan bo'lib, bu esa yangi texnologik yechimlarga ehtiyojni oshirmoqda. Xususan, elektronika sohasida nanoo'lchamli tizimlar – ya'ni nanoelektronika – rivojlanishi yangi materiallar, ayniqsa ekologik toza, barqaror va funksional materiallarga bo'lgan talabni oshirmoqda. Bunda tabiiy nanostrukturalarga ega tolalar, xususan kanop tolalari, istiqbolli ob'ektlar sifatida qaralmoqda. Ekologik xavfsiz va qayta tiklanadigan tabiiy resurslardan foydalanishga qaratilgan tadqiqotlar tobora dolzarb bo'lib bormoqda. Tolalar fizikasi sohasidagi tadqiqotlar ko'rsatmoqdaki, tabiiy va sintetik polimer tolalar zamonaviy texnikada keng qo'llanilmoqda. Kanop tolalari o'zining yuqori darajadagi ekologik xavfsizligi, biologik parchalanuvchanligi, iqtisodiy arzonligi va qayta tiklanish xususiyati bilan boshqa tolalar orasida alohida o'rin egallaydi. Kanop gulxayridoshlar

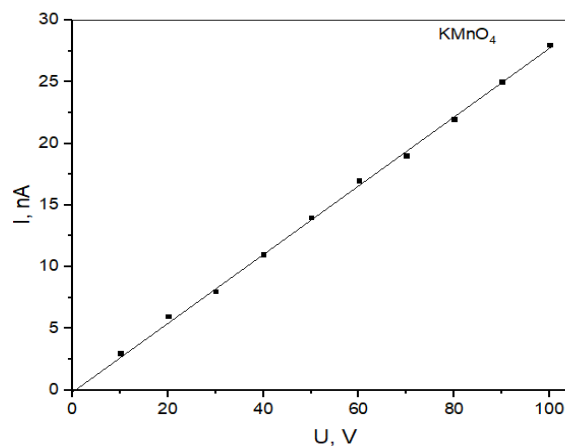
oilasiga kiradigan tolali bir yillik o'simlikdir [1]. Kanop tolalarining kimyoviy tarkibiga ko'ra 53-91 % selluloza, 4-28 % gemisellyuloza, 1-21 % lignin, 1-17 % pektindan tashkil topgan [2]. Kanop tolalarining elektrofizik xossalarini yanada yaxshilash va ularni zamonaviy texnologik sohalarga moslashtirish maqsadida, ularni turli moddalar bilan legirlash, ya'ni ularning tarkibiga turli faol kiritmalar qo'shish orqali fizik-kimyoviy va elektr tavsiflarini boshqarish imkoniyati mavjud [3]. Bugungi kunda kanop o'simligining biologik, fizik-mexanik, kimyoviy va boshqa xususiyatlari bo'yicha keng ko'lamli tadqiqotlar olib borilmoqda, ammo kanop o'simligining tolalarini elektrofizik xususiyatlari bo'yicha tadqiqotlar hali to'liq o'rganilmagan.

Ushbu maqolada  $KMnO_4$  bilan legirlangan "11127" navli kanop tolalari asosida tayyorlangan namunalarning VAX va elektro'tkazuvchanligini temperaturaga bog'liqligini tadqiq qilindi.

Kanop o'simligidan ajratib olingan kanop tolalari distillangan suvda 30 daqiqa davomida qaynatib, moy, chang kabi iflosliklar moddalardan tozalanadi, bu esa aniq natijalarni ta'minlaydi. Yuvilgan kanop tolalarini qaynatib bo'lgandan so'ng xona haroratida bir sutka davomida quritiladi. Qurigan kanop tolalari ma'lum qismlarga ajratiladi. Bir qismini shu holicha qoldiriladi, qolgan qismini esa  $KMnO_4$  (kaliy permanganat) bilan legirlanadi. Bunda  $KMnO_4$  ning 2% li suvdagi eritmasiga yuvilgan kanop tolalarini 30 daqiqa davomida 27°C haroratda yaxshilab botirilgan holatda qoldiriladi. Legirlangan kanop tolalarini tashqi ta'sirdan himoyalangan 70°C li diffuzion pechda 1 soat davomida ishlav berildi. Tayyor kanop tolalaridan omik kontaktli namunalar tayyorlandi. Legirlanmagan kanop tolalari va  $KMnO_4$  (kaliy permanganat) bilan legirlangan kanop tolalaridan namunalar tayyorlandi. Namunalarning volt-amper harakteristikasi va tok kuchining haroratga bog'liqligi o'lehandi. Legirlanmagan kanop tolalaridan yasalgan namunalarimizga berilgan kuchlanish 0 V dan 100 V oralig'ida, tok kuchi  $I_{max}=14$  nA ni tashkil qildi.  $KMnO_4$  (kaliy permanganat) bilan legirlangan kanop tolalarida esa kuchlanishlanish 0 V dan 100 V gacha yetganda tok kuchi 28 nA ga yetdi.



A



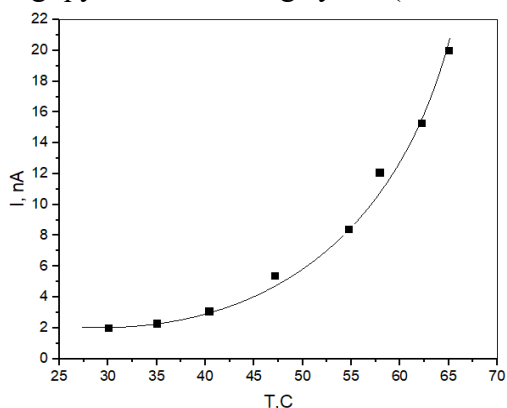
B

**1-rasm. "11127" navli legirlanmagan (A) va  $KMnO_4$  (kaliy permanganat) bilan legirlangan (B) kanop tolalarining VAX si grafigi**

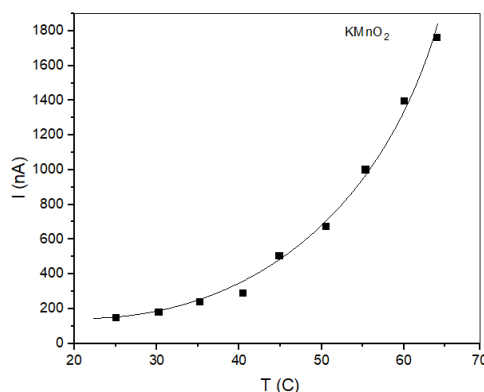
Tadqiqot natijalariga ko'ra legirlanmagan kanop tolalarining VAX  $KMnO_4$  bilan legirlangan kanop tolalaridan yasalgan namunning VAX si o'rtasida 2 marta farq qildi.

Yarimo'tkazgich materiallarda haroratning ortishi elektro'tkazuvchanlikning oshishiga olib keladi va bu quyidagi ifoda orqali ifodalanadi:  $\sigma = \sigma_0 \exp(-E/kT)$ . Taqiqlangan zona kengligi qancha katta bo'lsa, elektronlarning o'tkazuvchanlik zonasiga o'tishi uchun zarur bo'lgan energiya miqdori shunchalik yuqori bo'ladi. Yarimo'tkazgichlarning elektro'tkazuvchanligi sezilarli darajada ortishi uchun uni yetarli darajada yuqori haroratgacha qizdirish talab qilinadi. "11127"

navli kanop tolalarining legirlanmagan holatidagi namunalaridan o'tayotgan elektr tokini haroratga bog'liqligini ko'rish mumkin. Tajribada temperaturani boshlang'ich 30°C da 2 nA ni tashkil etib, elektr toki temperaturaning ortishi bilan eksponensial qonun bo'yicha ortib bordi. Temperatura 65°C ga yetganda tok kuchi 20 nA ni ko'rsatdi (2- A rasm). KMnO<sub>4</sub> (kaliy permanganat) bilan legirlangan "11127" navli kanop tolalari namunalaridan o'tayotgan elektr toki haroratni orttirib borilganda eksponensial ortib borishi kuzatildi, temperaturani boshlang'ich 25°C sida tok kuchi 150 nA ni tashkil etdi. Hamda temperaturani 65°C gacha orttirganimizda tok kuchining qiymati 1750 nA ga yetdi (2- B rasm).



A



B

**2-rasm. Legirlanmagan (A) va KMnO<sub>4</sub> (kaliy permanganat) bilan legirlangan (B) "11127" navli kanop tolalarining elektro'tkazuvchanligini temperaturaga bog'liqligi**

Haroratning ortishi natijasida yarimo'tkagichning elektro'tkazuvchanligi eksponensial qonuniyat asosida  $I \sim \frac{l}{RS} = \sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{E}{kT}\right)$  oshadi. Buning sababi shundaki, kirishma (legirlovchi qo'shimchalar) atomlari taqiqlangan zona kengligida chuqur sahtlar hosil qiladi. Temperaturaning bosqichma-bosqich oshishi kirishma atomlari kanop tolalari bilan kimyoviy bog'lar hosil qilib, ularning elektro'tkazuvchanligini orttirishini yuzaga keltiradi. "11127" navli kanop tolalarining KMnO<sub>4</sub> (kaliy permanganat) bilan legirlangan namunalarning aktivatsiya energiyasi  $E_t=0.47\text{eV}$  ekanligi aniqlandi.

### Adabiyotlar

1. A.Salimov "Tabiiy tolalarni dastlabki ishlash". O'quv qo'llanma. T.:TTYeSI, 2009 y.
2. J.Van de Velde & P. Kiekens (2002), Textile Research Journal. 63(9), 1201-1213.
3. N. A. Siddiqui et al (2021), Polymers and Polymer Composites. 29(9), 1-12.

## MICROSCALE STRUCTURE PROFILE AND ELEMENT COMPOSITION OF As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> FILM

**E.M. Ibragimova, I.N. Temirbayeva**

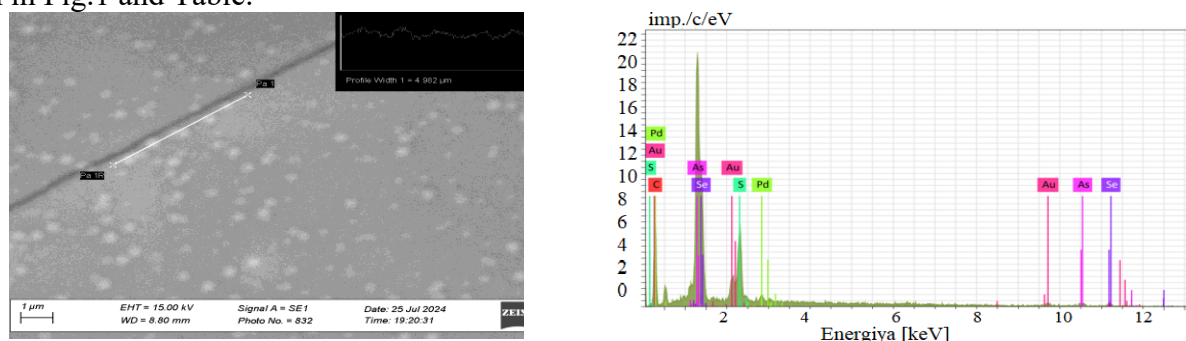
*Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,  
Tashkent, Ulugbek settlement, 100214;*

*E-mail: ibragimova@inp.uz, temirbayevainabat0101@gmail.com*

Arsenic triselenide (As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>) is one of the most extensively investigated binary compounds, used in the form of glassy alloys doped with metallic impurities or amorphous microfilm on

dielectric substrate for holography, IR optics, and optical data storage due to low electrical conductivity, strong optical nonlinearity, pronounced photoinduced crystallization, and high photosensitivity; but the unresolved problem remains - to increase the system rigidity [1]. The diffusion of Ag into the As-Se matrix was shown to maintain its amorphous state, which is confirmed by the absence of sharp XRD peaks [2]. The aim of our research is to study the influence of high-energy electrons on the crystallization  $\leftrightarrow$  amorphization processes in the industrial two-layer tape of AsSe film on a polyethylene terephthalate (PETF) substrate film by means of scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD).

The samples were irradiated in air at a temperature of 300 K at the electron accelerator "Electron U-003" (an average electron energy of 5 MeV and flux  $2.5 \times 10^{12}$  el/cm<sup>2</sup>s) during 100 and 200 sec. to fluencies  $2.5 \times 10^{14}$  and  $5 \times 10^{14}$  cm<sup>-2</sup>, respectively. Initially, the microstructure profile and micro-local elemental composition were determined in SEM-EDS EVO 15 (Zeiss) at an accelerating voltage not exceeding 10 kV to prevent burning of the polymer substrate film, as shown in Fig.1 and Table.



**Fig. 1. Unirradiated AsSe film: surface nanostructure with high SEM resolution. The introduction shows the nanoprofile of the light points at the points of linear ordering.**

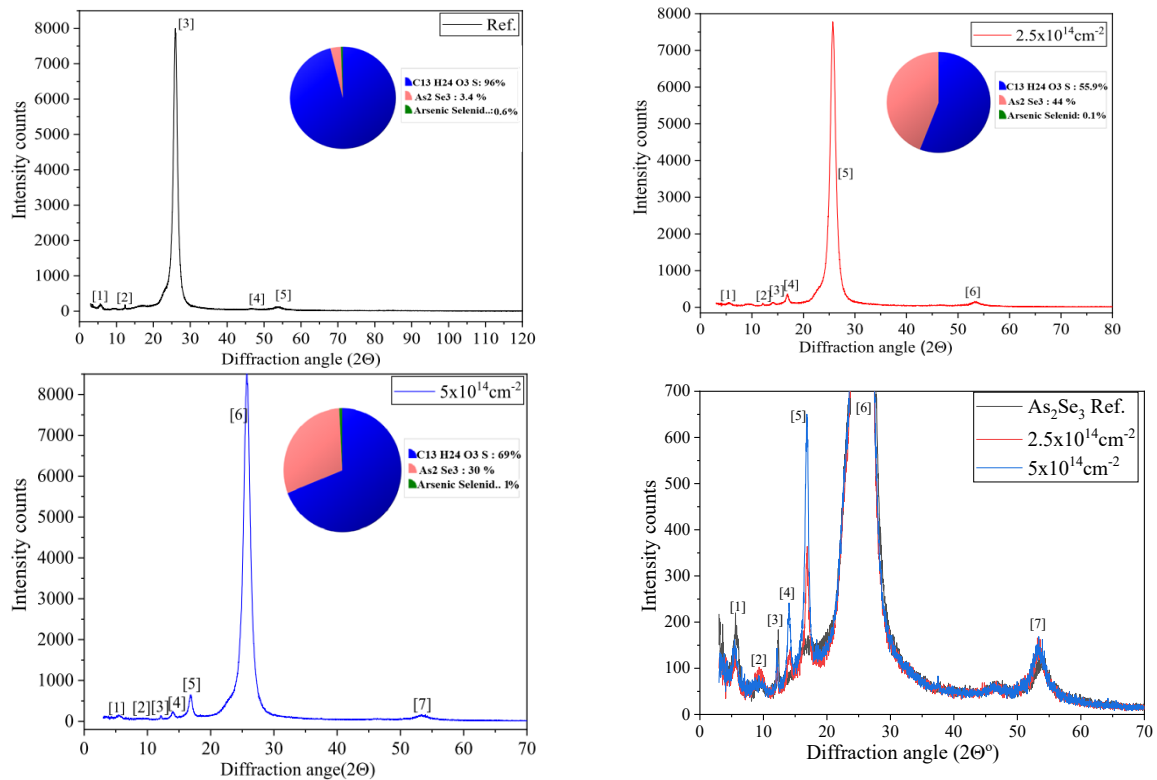
**Pulse/sec/eV Energy, keV**

*Table. Microlocal element composition in normalized mass and atom % of AsSe non-irradiated reference and samples irradiated for 100 and 200 seconds, the last column shows absolute error  $\sigma$*

| Element | Z  | Ref. Mass. Norm. [%] | Ref. [at.%] | 100s. Mass. Norm. [%] | 100 sec [at. %] | 200s. Mass. Norm. [%] | 200 sec At. [%] | Sigma absol. |
|---------|----|----------------------|-------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--------------|
| C       | 6  | 27.69                | 69.15       | -                     | -               | 41.45                 | 76.25           | 2.49         |
| As      | 33 | 32.41                | 12.97       | 40.44                 | 30.40           | 25.99                 | 7.66            | 2.73         |
| Se      | 34 | 21.99                | 8.35        | 28.34                 | 20.21           | 15.10                 | 4.23            | 1.92         |
| S       | 16 | 8.36                 | 7.82        | 11.09                 | 19.48           | 6.63                  | 4.57            | 0.61         |
| Au      | 79 | 7.62                 | 1.16        | 10.09                 | 2.88            | 4.68                  | 0.52            | 0.63         |
| O       | 8  | -                    | -           | 7.26                  | 25.56           | 4.68                  | 6.46            | 0.51         |
| Pd      | 46 | 1.93                 | 0.54        | 2.78                  | 1.47            | 1.47                  | 0.31            | 0.22         |
|         |    | 100.00               |             | 100.00                |                 | 100.00                |                 |              |

As can be seen from Figure 1 left, the distance between the nano-humps ordered at microscale varies from 2 to 4 per micron, and the inset shows the profiles of 5 humps in the range of 5 microns. This submicrostructure is comparable with the best diffraction gratings mechanically made on a polished glass or metal surface with a diamond cutter. The EDS spectrum (fig.1 right) and table demonstrate the total As/Se contents ratio prior and after irradiation both in crystal and amorphous phases is 1.47, 1.42 and 1.72, respectively and neither corresponds to the As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> formulae ratio. Perhaps As and Se have very close masses and EDS. The crystalline phases were determined in XRD Rigaku MiniFlex 600 within a wide angular range (5-120) as shown in Fig.2, the search was limited by the introduction of chemical elements determined by the SEM\_EDS database (fig.1 and Table).





**Fig. 2. XRD (Cu K $\alpha$ ,  $\lambda=1.5406\text{\AA}$ ) analysis of the  $\text{As}_2\text{Se}_3$  identification compound.**

The material is mostly crystalline, since XRD data show distinct, sharp peaks characteristic of crystalline structures and no broad band from amorphous fractions occurs. Since the polymer substrate  $\text{C}_{13}\text{H}_{24}\text{O}_3\text{S}$  has the dominating volume 96% in the reference sample, the deposited AsSe film showed only 4 % of 2 minor crystalline phases. The standard XRD peaks of  $\text{As}_2\text{Se}_3$  (12.54°, 14.9°, 16.185°, 27.2°, and 53.013°) ID mp-1078443 in the database [3] are close to 12°, 14°, 16°, 26.6°, and 53.3° observed in fig.2. The most important results are seen after electron exposure – 10 times growth of the crystalline phase  $\text{As}_2\text{Se}_3$ , because of the irradiation induced crystallization process, which is required for many practical applications [1,2].

**Acknowledgments:** The authors express their gratitude to A.Gafurova (Institute of virusology, Tashkent) for SEM-EDS measurements and M. Shokirov (National University of Uzbekistan) for XRD analysis. The work is financed from the State Budget of the Republic of Uzbekistan (No. PP-4526), allocated to the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

#### LITERATURE

- 1) Sharma I., Elsaedy H.I., et al. Comparative study of physical properties of  $\text{As}_2\text{Se}_3$  and  $(\text{As}_2\text{Se}_3)_{90}\text{Ge}_{10}$  glassy alloys doped with metallic impurities, *Ceramics International*. Part A, (2024), Vol. 50, Iss. 20, P. 38741-38747 // <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.245>
- 2) Adyasha A., Naik R., et al. Photo- and thermally induced property change in Ag diffusion into thin films of Ag/ $\text{As}_2\text{Se}_3$ . *Applied Physics A* (2018) Vol.124 P.267 // <https://doi.org/10.1007/s00339-018-1692-4>.
- 3) Material project. <https://legacy.materialsproject.org/materials/mp-1078443/>

## СТРУКТУРНЫЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ЦИРКОНИЕМ МЕТОДОМ ДИФфуЗИИ

Ш.Х. Далиев, Ш.А. Исмоилов

*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники,  
Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан.*

*E-mail: ismoilov-2015@inbox.ru*

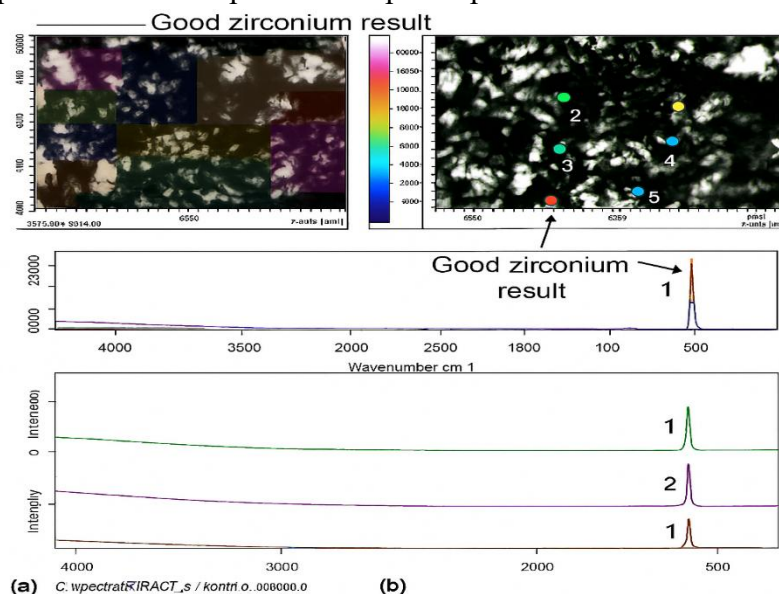
Развитие солнечной энергетики требует постоянного поиска новых материалов и способов модификации традиционного кремния с целью расширения спектральной чувствительности, увеличения коэффициента поглощения и уменьшения рекомбинационных потерь. Одним из перспективных направлений является легирование кремния переходными металлами, способными формировать дефектные уровни и высокodieлектрические фазы [1, 2]. Цирконий (Zr) представляет особый интерес для солнечной энергетики благодаря способности образовывать устойчивые соединения  $ZrO_2$ , обладающие высокой dieлектрической проницаемостью, термической стабильностью и выраженным влиянием на электронную структуру кремния. Формирование комплексов Zr–O и Zr–Si–O может приводить к расширению спектрального диапазона поглощения и увеличению концентрации фотогенерированных носителей [3, 4].

Целью настоящей работы является исследование оптических, дефектных и микроструктурных свойств кремния, легированного цирконием при температуре 950 °C в течение 12 часов, и оценка его перспектив для применения в солнечной энергетике.

Легирование цирконием осуществлялось методом термической диффузии в вакуумной атмосфере при температуре 950 °C в течение 12 часов. Для анализа структуры и фазового состава использовались: Раман-спектроскопия, инфракрасная (ИК) спектроскопия, карты распределения интенсивности, анализ дефектных состояний и микроструктуры.

На рисунке X представлены результаты комплексного анализа поверхности и инфракрасных спектральных характеристик кремния, легированного цирконием методом диффузии и подвергнутого высокотемпературному отжигу. Полученные данные позволяют установить взаимосвязь между микроструктурным состоянием поверхности, распределением примеси циркония и спектральными признаками его активации. Анализ 3D-карты рельефа поверхности (рис. Xa) показывает, что после диффузионного легирования цирконием формируется выражено неоднородная микроструктура. Наблюдаемые вариации высоты поверхности в микрометровом диапазоне указывают на локальные напряжения и неравномерное перераспределение примеси вблизи поверхности кремния. Такие особенности рельефа характерны для систем, в которых примесь взаимодействует с кислородом и дефектами решётки, формируя сложные комплексы типа Zr–O–Si. Оптическое микроскопическое изображение поверхности (рис. Xb) подтверждает наличие различных микроструктурных областей. Отмеченные точки локального анализа (2–5) соответствуют зонам с различной степенью зернистости и плотности дефектов. Области с более однородной структурой характеризуются меньшей шероховатостью, тогда как зернистые участки указывают на локальную агрегацию примеси циркония и связанных с ней дефектов. FTIR-спектр образца Si+Zr (рис. Xc), зарегистрированный в диапазоне

4000–500  $\text{cm}^{-1}$ , содержит интенсивную полосу в области около 500–520  $\text{cm}^{-1}$ , отмеченную стрелкой 1. Данная полоса связана с колебательными модами кремниевой матрицы, модифицированной присутствием циркония, и интерпретируется как признак формирования связей Si–O–Zr. Высокая интенсивность этой полосы свидетельствует об эффективной активации примеси циркония и формировании дефектно-активных комплексов, а не электрически нейтральных агрегатов. Сравнение FTIR-спектров, полученных в различных точках поверхности (рис. Xd), показывает, что спектр, обозначенный номером 1, соответствует областям с наиболее выраженным спектральным откликом циркония. Эти области характеризуются оптимальным распределением примеси и рассматриваются как зоны «хорошего результата легирования». Спектры, обозначенные номерами 2 и 3, демонстрируют меньшую интенсивность характерной полосы, что указывает на частичную деактивацию циркония и возможную агрегацию примеси в электрически менее активные комплексы. Таким образом, полученные результаты показывают, что эффективность легирования кремния цирконием определяется не только температурой отжига, но и локальными микроструктурными условиями. Области с умеренной шероховатостью и более однородной структурой обеспечивают максимальную спектральную выраженность связей Si–O–Zr и, следовательно, более высокую степень активации циркония. Эти результаты хорошо согласуются с электрофизическими данными, свидетельствующими о снижении удельного сопротивления и росте подвижности носителей заряда при оптимальных режимах термообработки.



**Рис. 1. (а) 3D-карта рельефа поверхности образца Si+Zr после отжига; (б) оптическое изображение поверхности с отмеченными точками локального анализа; (с) FTIR-спектры (Bruker) в диапазоне 4000–500  $\text{cm}^{-1}$ .**

На рисунке представлены результаты комплексного исследования поверхности и структуры кремния, легированного цирконием методом диффузии и подвергнутого высокотемпературному отжигу. Анализ выполнен с использованием оптической микроскопии, 3D-профилометрии и FTIR-спектроскопии (Bruker). На верхней левой части рисунка показана цветовая карта рельефа поверхности образца Si+Zr, полученная методом оптической профилометрии. Цветовая шкала отражает изменение высоты поверхности в

микрометровом диапазоне. Наблюдается выраженная неоднородность рельефа, связанная с диффузионным перераспределением циркония и формированием микроструктурных областей с различной плотностью дефектов. Области с более высокими значениями рельефа соответствуют зонам повышенной концентрации цирконий-содержащих фаз и напряжений в кристаллической решётке кремния.

В работе показано, что диффузионное легирование кремния цирконием с последующим высокотемпературным отжигом приводит к формированию структурно и спектрально различных областей, отражающих степень активации примеси. Комплексный анализ поверхности и FTIR-спектров установил, что интенсивная полоса в области  $500\text{--}520\text{ см}^{-1}$  связана с образованием связей  $\text{Si-O-Zr}$  и является надёжным признаком эффективного легирования цирконием. Области с полученными спектральными и пространственными данными подтверждают перспективность структуры  $\text{Si+Zr}$  для применения в солнечной энергетике в качестве материала с расширенным диапазоном поглощения и улучшенными фотоэлектрическими характеристиками.

#### Литература

1. Green M.A. Silicon solar cells: advanced principles & practice. Sydney: UNSW, 2006.
2. Weber E.R. Transition metals in silicon. Appl. Phys. A, 1983.
3. Tsetseris L., Pantelides S.T. Defects in silicon doped with transition metals. Phys. Rev. B, 2008.
4. Ismoilov Sh.A., Daliev Sh.Kh. Optical properties of Zr-doped silicon. Semiconductor Physics, 2021.

## **KREMNIY KRISTALL PANJARASIDA IZOVALENT STRUKTURANING SONLI HISOBI**

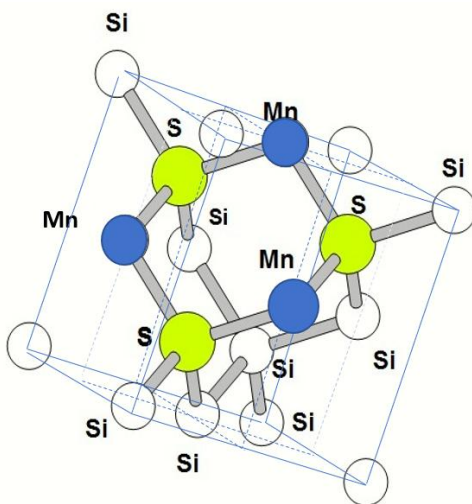
**Sh.B.Utamuradova, A.Sh.Mavlyanov, G.O.Abdurazzoqova**

*O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika  
ilmiy-tadqiqot instituti  
[microelectronics74@mail.ru](mailto:microelectronics74@mail.ru)*

So'nggi vaqtlarda kichik miqdordagi nuqsonlardan tashkil topgan komplekslarni maqsadli shakllantirish, asosiy material va kiritilgan kirishma atomlarning asosiy panjaradagi tartibli joylashuvi hamda ular o'rtasidagi qisman ionli va qisman kovalent o'zaro ta'sirlashuvlar tufayli yarimo'tkazgich tuzilmalarining funksional parametrlari yaxshilanishi va ularning xususiyatlarini boshqarish imkonini bermoqda. Nazariy tadqiqotlar, kvant-kimyoviy hisoblashlar va tajribalar dunyoning yetakchi universitetlari va ilmiy-tadqiqot markazlarida, olmos turidagi kubik panjaraga ega yangi gibridd komplekslar sinfini yaratish sohasida olib borilmoqda.[1]-manbada  $\text{SiN/Mn}$  past darajada legirlangan eritmalarini modellashtirish uchun  $(N+1)$ -qatlamli tetragonal o'tapanjara ishlatilgan, ular  $N$  ta kremniy bir qatlamidan va bitta marganes molekulyar qatlamidan iborat edi. Hisoblashlar uch xil strukturaviy konfiguratsiya uchun bajarilgan bo'lib, marganesning joylashuvi va molekulyar holati o'zgarib borilgan. Bunda marganes atomlari tugunlarni (1-konfiguratsiya), tugunlararo bo'shliqlarni (2-konfiguratsiya) va aralash joylarni (3-konfiguratsiya) egallagan.



Qatlam qalinligi  $N = 7, 11, 15...$  ya'ni, marganesning molekulyar qatlamlari 7 dan 31 gacha o'zgarib borgan. Elementar panjara birligi vektorlari  $a, b$  va  $c$  kristallografik  $[110], [110]$  va  $[001]$  o'qlariga muvofiq yo'naltirilgan, bunda  $a = b = a_{Si}/\sqrt{2}$  va  $c = a_{Si}(N + 1)/4$ , bu yerda  $a_{Si} = 5,46 \text{ \AA}$  – olmos turidagi kubik tuzilma uchun kremniyning muvozanatli panjara doymiyisi. [1]-manbada maqbullashtirish uchun Vienna ab initio Simulation Package (VASP) dasturiy modeli qo'llanilgan bo'lib, bunda almashuv-korrelyatsion potentsialga umumlashtirilgan gradient yaqinlashuvi qo'llanilgan. Elektron-ion o'zaro ta'sirlari qo'shilgan tekis to'liqlik psevdopotensiallar orqali elektron to'liqlik funksiyalari esa 500 eV energiya chegarasiga ega tekis to'liqliklar yordamida tasvirlangan. Maqbullashtirishdan so'ng uchta konfiguratsiyada Mn atomlarining joylashuvida siljishlarni aniqlandi. Siljishlar esa o'z navbatida materialning strukturaviy xususiyatlarini o'zgartirdi. Magnit xususiyatlarni tadqiq qilishda almashuv o'zaro ta'sirlari ham hisobga olingan. Uchta konfiguratsiya uchun spin-polyarizatsiyalangan elektron holatlarining zichliklari hisoblangan. Yuqorida ta'kidlanganidek, modellashtirish va kvant-mexanik hisoblashlar uchun F43m- $\beta$ -MnS (sink sulfidi) kubik tuzilmasini —  $Si_2MnS$  faraziy strukturasi (1-rasm) tanlab olindi. Hisoblashlar quyidagi dasturlar yordamida amalga oshirildi: zichlik funksional usuli (DFT) uchun mo'ljallangan bepul dasturiy ta'minot Abinit, yarimempirik hisoblashlar uchun notijorat GAMESSPC dasturi, shuningdek erkin tarqatiladigan ViewMol3D va Molekel dasturlari. Tekshirilayotgan strukturani grafik shaklda yaratish uchun Hyper Chem Lite 3.0.1 evaluation dasturi ham ishlatildi. Mavjud kvant-kimyoviy va molekulyar-dinamik usullardan foydalangan holda kub ichiga joylashtirilgan, muntazam tetraedrning uchlarida joylashgan to'rtta atomi bilan olmos panjarasining Si tuguni, shuningdek, olmos turidagi panjara strukturasi qurildi. Si uchun quyidagi panjara parametrlari o'rnatildi:  $a=5,43095 \text{ \AA}$ ,  $d(A-B)=2,35167 \text{ \AA}$ ,  $d(A-A)=33,84026 \text{ \AA}$ .



**1-rasm. Sfalerit turidagi kubik F43m- $\beta$ -MnS tuzilmasi ( $Si_2MnS$ ).**

Ma'lumki, izolyatsiya qilingan  $Mn$  ioni magnit momenti  $3 \mu_B$  ga teng bo'lib, odatda Si panjarasida tetraedr ichida tugunlararo joyni egallaydi va donor sifatida harakat qiladi. Ayni paytda, agar  $Mn$  panjaraning tugunlarini egallasa, u 3d holatlarini Si ning 3 (s,p) holatlari bilan kuchli gibridlashtirib, akseptor sifatida namoyon bo'ladi [2–3]. Biroq, past darajada legirlangan Si:Mn eritmalari holati ancha murakkab va aniq bir talqinga ega emas. Ushbu materiallar ularning ferromagnit holati taxminan 400 K atrofidagi haroratlarda ko'rib chiqilganidan so'ng o'ziga xos qiziqish uyg'otgan [4].

Past va o'rtacha *Mn* tarkibli (0,5 dan 17,5 a. E. % gacha) past darajada legirlangan Si:Mn qattiq eritmalarining magnit va rentgen-strukturaviy xususiyatlarini yanada sinchkovlik bilan o'rganish, legirlash jarayonini nazorat qilishning imkonsizligi va natijalarni qayta takrorlash qiyinligi sababli ushbu tizimlar keng oraliqda notekis bo'lishi ko'rsatadi. Natijada, Mn ionlari nafaqat panjaraning tugunlarini va tugunlararo joylarni egallashi, balki turli xil molekulyar klasterlar va qattiq fazadagi birikmalarni hosil qiladi. Ushbu kabi strukturalarni nazariy modellashirish, hisoblash, kremniyni marganes va oltingugurt bilan tajribada legirlash, tajriba ma'lumotlarni hisoblash natijalari bilan taqqoslash va kelajakda shunga o'xshash strukturalarni bashorat qilish imkonini beradi.

#### **Adabiyotlar**

6. M. M. Otrokov, A. Ernst, V. V. Tugushev, S. Ostanin, P. Buczek, L. M. Sandratskii, G. Fischer, W. Hergert, I. Mertig, V. M. Kuznetsov, and E. V. Chulkov. *Ab initio* study of the magnetic ordering in Si/Mn digital alloys // PHYSICAL REVIEW B 84, 144431 (2011) p. 144431-1-144431-11.
7. T. Jungwirth, J. Sinova, J. Masek, J. Kucera, and A. H. MacDonald // Rev. Mod. Phys. 78, 809 (2006).
8. T. Dietl, Modern Aspects of Spin Physics, Lecture Notes in Physics, Vol. 712, edited by W. Potz, U. Hohenester, and J. Fabian (Springer, Berlin/Heidelberg, 2007), pp. 1–46.
9. K. Sato *et al.*, Rev. Mod. Phys. 82, 1633 (2010).

### **ЭФФЕКТЫ ЛОКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УСИЛЕНИЯ В ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ**

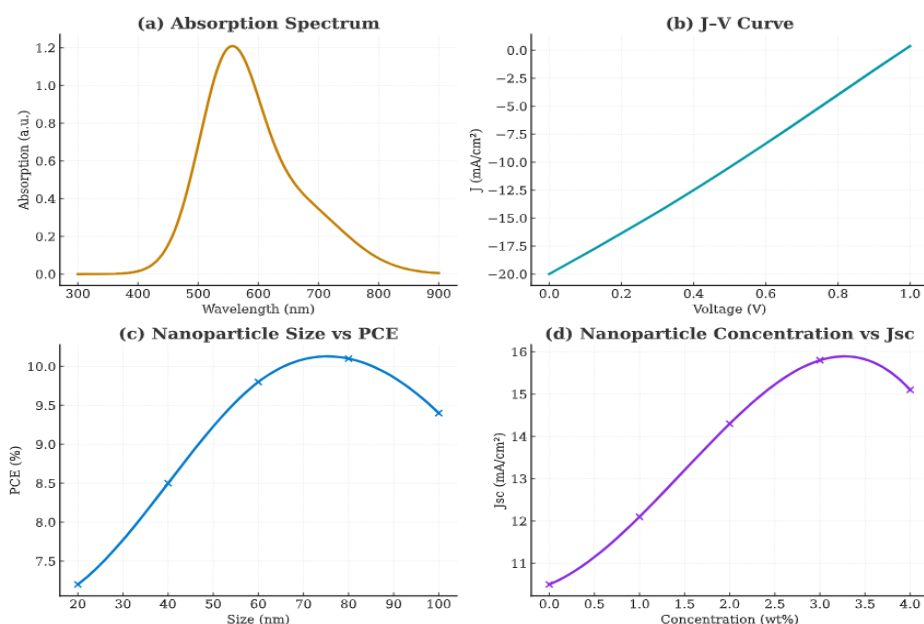
**A. A. Abdreymov, M. B. Tagaev, M. B. Sharibaev**

*Каракалпакский государственный университет им. Бердаха,  
Узбекистан, Нукус, 230100 Адрес: город Нукус, улица Ч. Абдилова, №1.*

*\*e-mail: [tagaev@gmail.com](mailto:tagaev@gmail.com)*

Органические солнечные элементы в последние годы рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным кремниевым элементам благодаря низкой себестоимости, гибкости и совместимости с технологиями печатной электроники [1]. Однако их дальнейшее развитие ограничивается узким спектром поглощения, низкой подвижностью носителей заряда и необходимостью уменьшенной толщины активного слоя, что снижает эффективность генерации и транспортировки фотоиндуцированных зарядов [2]. Одним из наиболее результативных подходов к повышению эффективности органические солнечные элементы является использование плазменных наноструктур. Ряд исследований демонстрирует, что оптимизация размера (25-90 нм), формы и концентрации наночастиц может увеличить эффективность органические солнечные элементы на 9-35 %, что делает плазменные структуры одним из ключевых направлений в повышении производительности органической фотовольтаики. Применение плазменных наноструктур в органических солнечных элементах основано на способности металлических наночастиц возбуждать поверхностный плазменный резонанс, приводящий к локальному усилению

электромагнитного поля. В результате значительно увеличивается оптическое поглощение в активном слое органические солнечные элементы, что повышает генерацию экситонов и фототока. Эффективность данного механизма определяется несколькими факторами: материалом наночастиц, их размером и формой, концентрацией, а также их расположением в структуре солнечного элемента. Геометрия наноструктур определяет положение резонансного пика и распределение локальных полей. Используются сферические, стержневые, призматические наночастицы, а также периодические нанорешётки. Увеличение длины или асимметрии структуры приводит к смещению резонанса в красную область спектра, что позволяет согласовать его с характеристиками конкретного органического материала. Вблизи поверхности металлической наночастицы формируется область сильного локального поля, что увеличивает вероятность поглощения фотонов активным слоем. Данный эффект наиболее выражен при размещении наночастиц внутри или на границе активного слоя. В этой работе рассматривается влияние размеров и концентрации наночастиц на оптические и электрические характеристики органических солнечных элементов. Проведён анализ изменений в поглощении, вольтамперная характеристиках, а также влияния плазменных параметров на ток короткого замыкания коэффициент полезного действия солнечного элемента и ток короткого замыкания  $J_{кз}$ , что позволяет определить оптимальные условия для повышения эффективности гибридных органических фотопреобразователей [3-4]. Полученные результаты показывают, что внедрение плазменных наночастиц в структуру органических солнечных элементов является эффективным подходом для усиления поглощения света и повышения фотоэлектрической эффективности. При оптимальных условиях - размере наночастиц 40-70 нм и концентрации 2,4% - наблюдается существенный рост эффективности фотопреобразования.



**Рис. 1. Оптические и электрические характеристики органических солнечных элементов с плазменными наноструктурами.**

(a) Спектр поглощения активного слоя с усилением оптического поля за счёт поверхностного плазменного резонанса.

(b) Вольтамперная характеристики, демонстрирующие увеличение фототока при введении металлических наночастиц.

(c) Рост КПД в зависимости от размера Au/Ag наночастиц и определение оптимального диапазона (40–70 нм).

(d) Изменение тока короткого замыкания  $J_{кз}$  при увеличении концентрации наночастиц и выявление оптимального уровня ( $\approx 2,4\%$ )

В то же время повышенная концентрация наночастиц приводит к снижению внешнего квантового выхода и уменьшению ток короткого замыкания  $J_{кз}$ , что обусловлено усилением рассеяния и рекомбинационных процессов. Полученные данные подтверждают, что оптимизированный дизайн плазменной наногеографии представляет собой ключевую стратегию для дальнейшего повышения энергетической эффективности органических фотовольтаических технологий.

### Заклучение

Проведённые исследования показали, что введение плазменных наночастиц эффективно усиливает поглощение света и повышает фотоэлектрическую эффективность органических солнечных элементов. Оптимальные параметры наночастиц - размер 40–70 нм и концентрация около 2,4% - обеспечивают максимальный прирост фототока за счёт усиления локального электромагнитного поля. Дальнейшее увеличение концентрации приводит к росту рассеяния и нерадиативной рекомбинации, что снижает внешняя квантовая эффективность солнечного элемента и значение ток короткого замыкания  $J_{кз}$ . Результаты подтверждают важность точного подбора геометрии и содержания наночастиц для оптимизации органических фотопреобразователей. Такой подход открывает путь к созданию более эффективных гибридных архитектур солнечных элементов.

### Список литературы:

1. Li, G., Zhu, R., Yang, Y. *Polymer solar cells*. // Nature Photonics. — 2012. — V6, №3 — P.153–161.
2. Atwater, H.A., Polman, A. *Plasmonics for improved photovoltaic devices*. // Nature Materials. — 2010. — V9. — P205–213.
3. Lin, K., Chen, F., Wu, H. *Effect of nanoparticle size on plasmon-enhanced organic solar cells*. // Solar Energy Materials & Solar Cells. — 2017. — V159. — P240–248.
4. Krebs, F.C. *Fabrication and processing of polymer solar cells*. // Solar Energy Materials and Solar Cells. — V2009. — V.93. — P. 394–412.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРИМЕСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ n-Si<Fe>

Н.А.Тургунов, Н.Б.Хайтимметов

Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники  
при Национальном университете Узбекистана

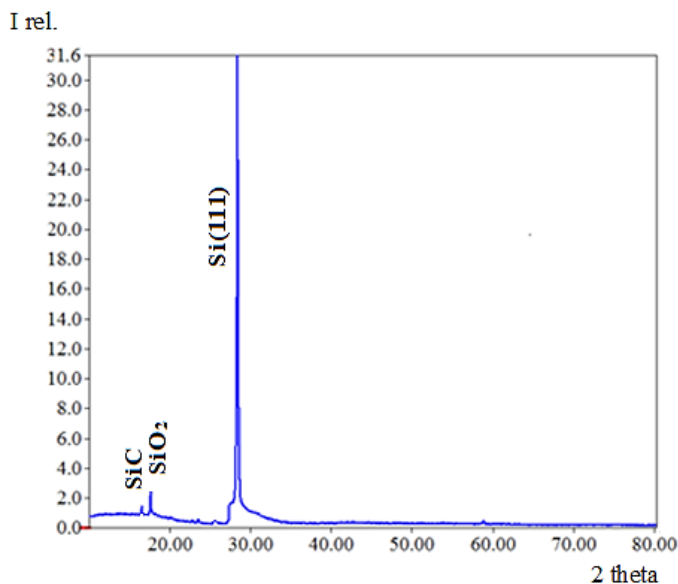
Известно, что управление свойств кремния, легированного различными примесными элементами 3d-металлов, определяется формированием более дисперсной структуры и образованием микро- и наноскоплений примесных атомов [1-3]. В данном процессе путем выбора оптимальных параметров диффузии, можно значительно повысить физико-химические свойства полупроводникового кремния. Введение металлов в объем кремния,



особенно методом высокотемпературного диффузионного легирования, может оказать существенное влияние на процессы химического взаимодействия атомов матричного элемента кремния с атомами технологических примесей, а также на их структурообразование [4,5].

В данной работе были получены результаты структурных анализов кремниевых образцов, легированных железом. Для проведения исследований использовались исходные образцы n-Si<sub>исх</sub> и образцы n-Si<Fe>, полученные методом диффузии. Диффузия железа в кремний осуществлялась при температуре 1300 °С в вакуумной печи СОУЛ-4, в герметичных ампулах, где поддерживался вакуум в диапазоне 10<sup>-3</sup>-10<sup>-4</sup> Торр. Длительность диффузионного процесса составляла 2 часа. Образцы после диффузионного отжига подвергались процессу охлаждения с двумя методами: к быстрой закалке при  $v_{охл}=250$  °С/с и к медленному охлаждению при  $v_{охл}=0,05$  °С/с. Структурные характеристики исходных и легированных образцов кремния были изучены с помощью рентгеноструктурного анализа. Для проведения структурных исследований был использован современный рентгеновский дифрактометр XRD 6100 Shimadzu с применением CuK $\alpha$  - излучения в режиме пошагового сканирования. Длина волны излучения в данном случае составляло  $\lambda=1,5406$  Å.

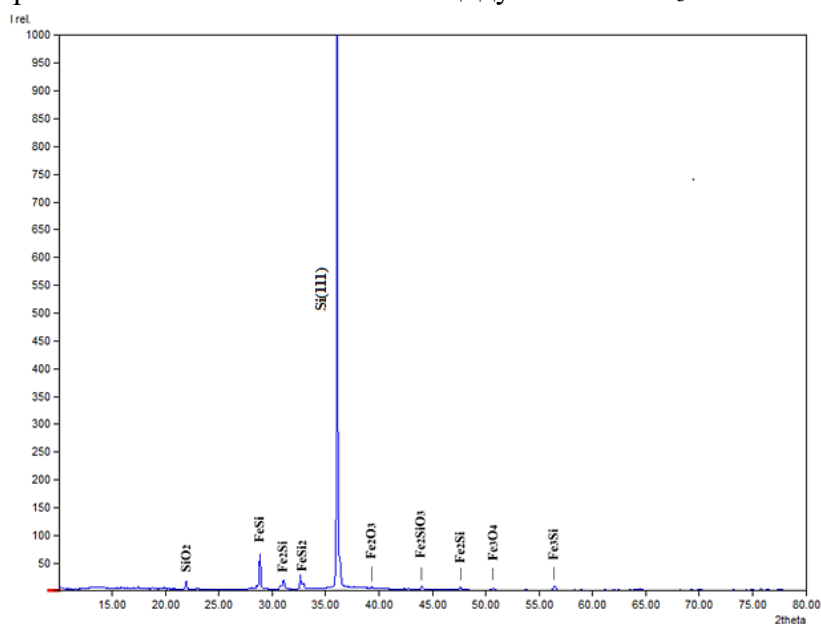
На рис. 1 приведены результаты рентгеноструктурного анализа исходного образца n-Si. На рентгенограмме наблюдаются два ярко выраженных пика с различными интенсивностями. Из них самый высокий пик, наблюдаемый под углом  $2\theta=28,39^\circ$  соответствует кремнию с кристаллографической ориентацией (111). Высокая интенсивность и узкая ширина рефлекса пика Si(111), свидетельствуют о высокой степени совершенства кристаллической решетки. Результаты проведенных расчетов показали, что в наблюдаемом рефлексе при  $2\theta=25,61^\circ$  межплоскостное расстояние  $d$  составляет 0,347 нм. Следующий рефлекс, который наблюдается под углом  $16,21^\circ$ , относится к комплексу кислорода с кремнием – SiO<sub>2</sub>. А самый маленький пик с низкой интенсивностью, наблюдаемый под углом  $2\theta=14,39^\circ$ , относится к соединению SiC.



**Рис.1. Рентгенограмма контрольного образца n-Si<sub>исх</sub>.**

На рис. 2 приведены результаты рентгеноструктурного анализа образца n-Si<Fe>. Как видно, в рентгенограмме самый высокий пик соответствует к Si(111) и она наблюдаемый под углом  $2\theta=36,42^\circ$ . После диффузии данный пик сместился в сторону больших значений угла по сравнению с тем же рефлексом в исходном образце, которое показывает, что после диффузии происходит деформация кристаллической структуры матричного элемента

кремния. На рентгенограмме в диапазоне углов  $2\theta$  от  $22^\circ$  до  $57^\circ$  зафиксированы несколько пиков, указывающие на образование различных соединений, содержащих атомов кремния, а также атомов основных и технологических примесей. Идентифицированный пик при  $2\theta=22,45^\circ$  обусловлен диоксидом кремния. В дифракционной картине были обнаружены рефлекссы, относящиеся к силицидам железа  $\text{FeSi}$ ,  $\text{Fe}_2\text{Si}$  и  $\text{FeSi}_2$ , которые наблюдаются под углом  $2\theta$  равной к  $28.64^\circ$ ,  $31.85^\circ$  и  $32.26^\circ$  соответственно. Пик при  $2\theta=39.05^\circ$  соответствует соединению атомов железа с кислородом –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Наблюдаемый максимум при  $2\theta=43.84^\circ$  относится к соединению  $\text{Fe}_2\text{SiO}_3$ . Далее, на рентгенограмме при  $2\theta=47.65^\circ$  зафиксирован пик, относящийся к соединению  $\text{Fe}_2\text{Si}$ . Рефлекссы с заметной интенсивностью, соответствующий соединению  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , наблюдается при угле  $2\theta=51.04^\circ$ . Наиболее выраженный пик при  $2\theta=56.82^\circ$  относится к силициду железа –  $\text{Fe}_3\text{Si}$ .



**Рис.2. Рентгенограмма образца n-Si<Fe>.**

Таким образом, из полученных результатов выясняется, что при высокотемпературном ( $T=1300^\circ\text{C}$ ) диффузионном легировании кремния железой, в объеме образцов происходят существенные изменения в структурном строении полупроводникового материала, которые связаны с образованием новых соединений атомов матричного элемента Si, а также основного и технологических примесей.

#### Список использованной литературы:

1. Scheffler L., Kolkovsky V., Weber J., Electrical levels in nickel doped silicon // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116. p. 173704(1-8).
2. Turgunov N.A. Decay of Impurity Nano-inclusions of Cobalt in Silicon under the Influence of Thermal Annealing // Inorganic Materials. 2018. Vol. 54, No. 12. pp. 1183–1186.
3. Li X., Yang Lou B., Ping Wu H., Dong He X., Sun Y. Effect of Pressure on Microstructure and Properties of High Silicon Electrical Steel by EB-PVD // Applied Mechanics and Materials. 2011. Vols. 55-57. pp. 348-351.
4. Iniewski K. Radiation effects in semiconductors // New York, 2011, pp. 405.
5. J. Lindroos, D. P. Fenning, D. J. Backlund, E. Verlage, A. Gorgulla et al. Nickel: A very fast diffuser in silicon // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. Issue 20. p. 204906(1-7).

## RADIATION DEFECTS PROFILE IN SILICON DOPED WITH IMPURITIES OF TANTALUM AT PROTON IRRADIATION

**Sh.B. Utamuradova, A.B. Uteniyazova**

*Research Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National  
University named after Mirzo Ulugbek  
e-mail: [aysara.uteniyazova@gmail.com](mailto:aysara.uteniyazova@gmail.com)*

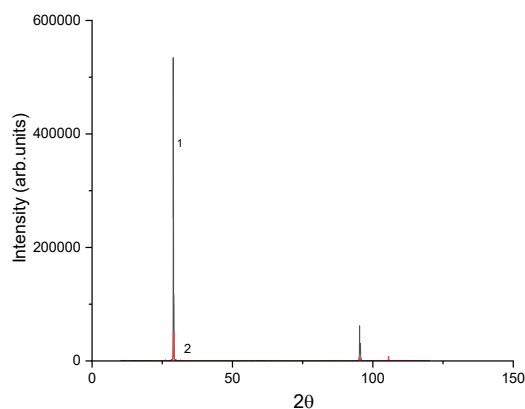
At present, management of properties of semiconductor materials and creation of new semiconductor structures by irradiation of ionizing particles is one of modern directions of semiconductor materials science [1]. It is well known that proton irradiation is characterized by rather unique character of energy losses in deceleration, which leads to generation of radiation defects (RD) in a semiconductor, mainly at depths corresponding to the range of protons ( $R_p$ ). In this case, the rate of RD generation immediately at the semiconductor surface is nearly an order of magnitude lower than that at the end of the range; at greater depths no RD are formed at all [2]. Thus, proton irradiation can yield depthlocalized (buried) semiconductor layers with high concentration of radiation defects. This is the reason why irradiation with high doses of low-energy protons is widely used in technologies for various semiconductors, both to create buried layers with high resistivity ("SOI") and to separate thin layers of the material in annealing of irradiated samples ("Smart Cut"). Use of proton irradiation for modifying silicon is of particular interest owing to the recently discovered possibility of formation of a silicon of the semiconductor layer by proton irradiation [3].

The individual properties of electrically active point defects can be studied by deep level transient spectroscopy (DLTS)[4]. However, quantitative analysis with DLTS requires that the concentrations of the defects under investigation are well below the background doping. This limits the usefulness of DLTS to silicon irradiated with low proton fluences, typically below  $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$  for the type of silicon used in power applications, or to the near surface region of proton irradiated samples, where the defect concentration is low. Higher fluences, which are of considerable technological interest, must be investigated by other means. In this study we used spreading resistance (SR) profile measurements, since the very same effect that DLTS inaccurate also causes a measurable change in resistivity. We have studied silicon bombarded with different proton energies and fluences matching the range of the technological applications. The measurements show that the resistivity increase first appears around the proton end of range, as expected. However, increasing the fluence further causes a rapid increase in resistivity not only at the mean projected range, but throughout the entire region penetrated by the proton.

The interaction of tantalum atoms with silicon, under proton irradiation, in which heterodiffusion and the formation of chemical compounds are possible, has so far been little studied. In this regard, the aim of our work was to study the influence of proton irradiation boundary of the tantalum silicon film on the redistribution of components in this system.

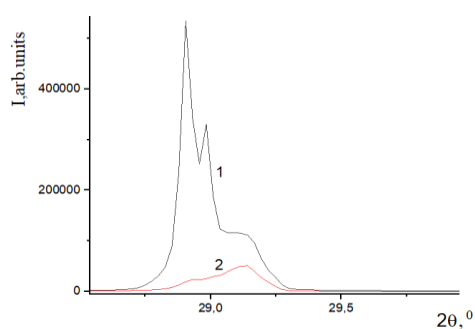
The study was carried out using X-ray crystallography analysis on the diffractometer Empyrean Malvern Panalytical. Radiation defects in Ta-Si systems were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) analysis before and after irradiation with 650 keV protons. In the Fig.1. shows of XRD spectra of Ta-Si system.

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 [5].

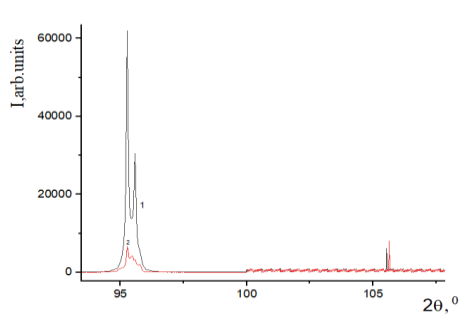


**Fig.1.XRD spectres of Ta-Si system (1) and Ta-Si system(2) irradiated by proton**

This is produced by reaction-diffusion at the metal-silicon interface in the solid state. Tantalum silicide ( $\text{TaSi}_2$ ) is the potential high temperature material and micro-electronic material.  $\text{TaSi}_2$  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  $\text{TaSi}_2$  silicide have also been investigated by experimental and theoretical methods. Experimental and theoretical results indicate that  $\text{TaSi}_2$  silicide exhibit the brittle behavior [6].



a)



b)

**Fig.2. Typical X-rays of Ta-Si system before (1) and after (2) proton radiation: a)  $2\theta$  from 28 to 29.5 b)  $2\theta$  from 94 to 97**

Figure 1 and 2 shows typical X-rays of the Ta-Si system before (1) and after (2) proton radiation. The obtained results show that the intensity of the peaks in the spectra decreases at proton irradiation (Figure 2.) and the values of the resulting peak angle shift a larger side. These

changes indicate that exposures produce complexes of radiation defects. Analysis of the results shows that the concentration of radiation defects is dependent on the oxygen content.

#### REFERENCES

1. A.R. Chelyadsky, F.F. Kamarov, *Defective Impurity Engineering in Implanted Silicon* // Advances in Physical Sciences, 2003, T.173, 8, P.813
2. V.V.Kozlovski: *Modification of Semiconductors with Proton Beams* (Nauka, St. Petersburg, Russia 2003).
3. E.V.Bogdanova, V.V.Kozlovski, D.S.Rumyantsev, A.A.Volkova, *Materials Science Forum*. Vol. 457, (2004)
4. D.V. Lang. *J.appl.Phys.* 45,3023 (1974)
5. Mahmood F., Ahmed H. et.al. *J. Appl. Phys.* Part 2 – Lett. 30(1991) p. L1418-L1421.
6. A. Gunes, Katarzyna, M. Edward, *Phase stability, microstructure and high-temperature properties of NbSi<sub>2</sub>- and TaSi<sub>2</sub>-oxide conducting ceramic composites*, *J. Mater. Sci.* 53 (2018) 9958–9977)

#### GAZ TASHISH USULI BILAN VODOROD OQIMIDA O'STIRILGAN $Zn_xCd_{1-x}S$ YUPQA QATLAMNING XOSSALARI

**T.M. Razikov, S.A. Muzafarova, K.M. Kuchkarov, M.A. Maxmudov, R.T. Yuldoshov, A.S. Achilov, N.A. Axmedova, O.Sh. Norqulov, S.G. Taji-Aglaeva.**

*Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, O'zbekiston, Toshkent, Yangi Olmazor ko'chasi, 20*

Yupqa plyonkalar bo'yicha tadqiqotlarning keskin o'sishi, ularning elektronika, optika, kosmos ilm-fani va boshqa sanoat tarmoqlaridagi keng qo'llanilishi bilan bog'liqdir [1]. Ular o'zining noyob elektr, optik, mexanik va termal xususiyatlari bilan ajralib turadi[2].

Shunday yupqa qatlamlardan biri kadmiy sink sulfid ( $Zn_xCd_{1-x}S$ ) bo'lib, bu uchlik birikmasining xossalarini sozlash mumkinligi sababli, u quyosh batareyalari va fotoaktiv qurilmalar ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi.  $Zn_xCd_{1-x}S$  ning energiyaviy taqiqlangan soha oralig'i sink miqdorini o'zgartirish orqali boshqariladi, bu esa materialning xossalarini quyosh batareyalaridagi yutuvchi materialga moslashtirish imkonini beradi[3].

Bizning tadqiqotlarimizda gaz tashish usuli bilan vodorod oqimida molibden (Mo) tagligining 750-800 °C haroratida Mo tagligi yuzasiga  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlam o'stirildi. VUP-4 qurilmasida  $10^{-4} - 10^{-5}$  Tor. vakuumda  $A^2B^6$  – birikmali  $Zn_xCd_{1-x}S$  qattiq qorishmasining yuzasiga yupqa Au qatlami o'stirildi va Au -  $Zn_xCd_{1-x}S$  tuzulmasiga ega Shottki to'siqli fotoqabullagich yaratildi.

Skannerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) natijalari  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamlarining morfologiyasi, donalar kattaligi, yuza teksturasi va struktur birxilligini baholash imkonini beradi. Olingan SEM tasvirlari yupqa qatlamning yaxshi shakllangan nanokristal strukturaga egaligini hamda yuzasining bir tekis tarqalganini ko'rsatadi. Taxlil natijalaridan ma'lumki,  $Zn_xCd_{1-x}S$  qatlamining yuzasida o'zaro bog'langan, polikristal tabiatga ega bo'lgan donalar mavjud. Donalarning o'rtacha o'lchami sintez sharoitiga bog'liq holda 50–150 nm atrofida o'zgaradi. Bunday o'lchamlar nur yutilishini oshirish va tashuvchilarning diffuziya uzunligini ta'minlash uchun optimal deb hisoblanadi. Yupqa qatlam yuzasida katta mikrochuqurlik yoki yong'insimon defektlar kuzatilmagani qatlamning yuqori sifati va uning tarkibiy barqarorligidan dalolat beradi. Donalar chegaralarining aniq ko'rinishi  $Zn_xCd_{1-x}S$  dagi geksagonal vursit strukturasi xos bo'lgan kristall o'sishi jarayonlarining barqaror amal qilganini tasdiqlaydi. SEM tasvirlaridagi bir



oz nohamvorlik (roughness)  $Zn_xCd_{1-x}S$  qabatida fotogeneratsiya va yutilish mexanizmlariga ijobiy ta'sir ko'rsatadi, chunki bunday tekstura yorug'likning ko'proq tarqalishi va yuzadan qaytishining kamayishiga sabab bo'ladi. Umuman olganda, SEM morfologiyasi  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamlarining: bir xil va barqaror strukturaga, nanomiqyosdagi bir tekis tarqalgan donalarga, yuqori adgeziya va yaxshi yuza sirtiga, fotoelektrik qurilmalar uchun mos bo'lgan morfologik parametrlarga ega ekanini ko'rsatadi.

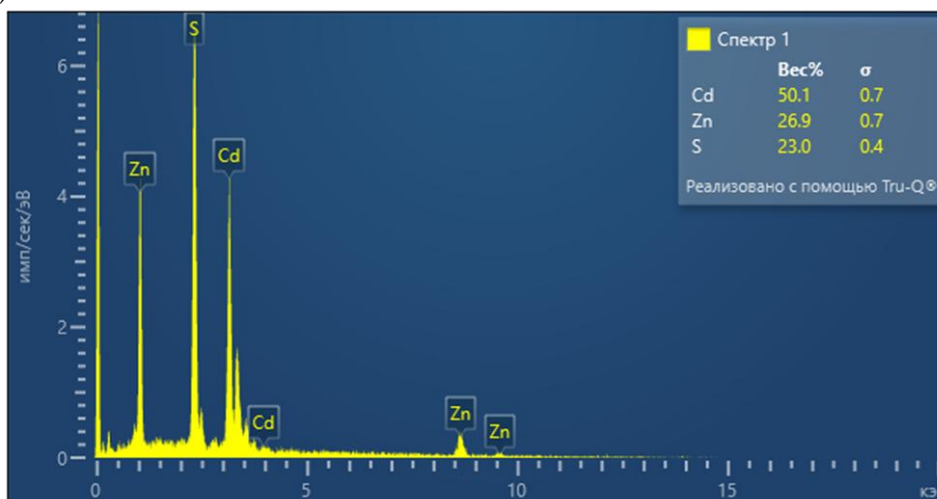
**Olingan natijalarning taxlili.**  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamining EDS spektral tahlilida kattik kotishma  $Zn_xCd_{1-x}S$  ning spektri yupqa qatlamining element tarkibini aniqlash uchun qo'llanilgan bo'lib, spektrda asosiy tarkibiy elementlar — Cd, Zn va S aniq indentifikatsiya qilinan. Spektrdagi aniq va yuqori intensivlikka ega pikni mavjudligi materialning bir xil va barqaror tarkibiy tuzilmaga egaligini ko'rsatadi (1-rasm).

#### Jadval.1

EDS hisobotiga ko'ra elementlarning  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamining og'irlik bo'yicha foiz miqdori (Wt.%):

| Element | Miqdor (Wt.%) | $\sigma$ |
|---------|---------------|----------|
| Cd      | 50.1 %        | 0.7      |
| Zn      | 26.9 %        | 0.7      |
| S       | 23.0 %        | 0.4      |

Kadmiy (Cd) piking intensivligi yuqori bo'lib,  $Zn_xCd_{1-x}S$  qatlamida Cd tarkibi nisbatan katta ekanini ko'rsatadi. Bu materialdagi x qiymatining kichik ekanidan (Zn nisbatan kam) dalolat beradi (1-rasm)



1-rasm.  $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$  yupqa qatlamining EDS spektral tahlili

$Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$  yupqa qatlamining tarkibidagi x xisoblanishi  $x = 0,35$  ga teng ekanligini ko'rsatdi:

$$x = \frac{Zn}{Zn + Cd} = \frac{26.9}{26.9 + 50.1} \approx 0.35$$

Yupqa qattik qotishma qatlami taxminan  $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$  tarkibiga ega. Demak, oltingugurt (S) pikining barqaror va yuqori intensivlikda bo'lishi  $Zn_xCd_{1-x}S$  birikmasining stexiometriyasiga yaqin sintez qilinganini tasdiqlaydi.

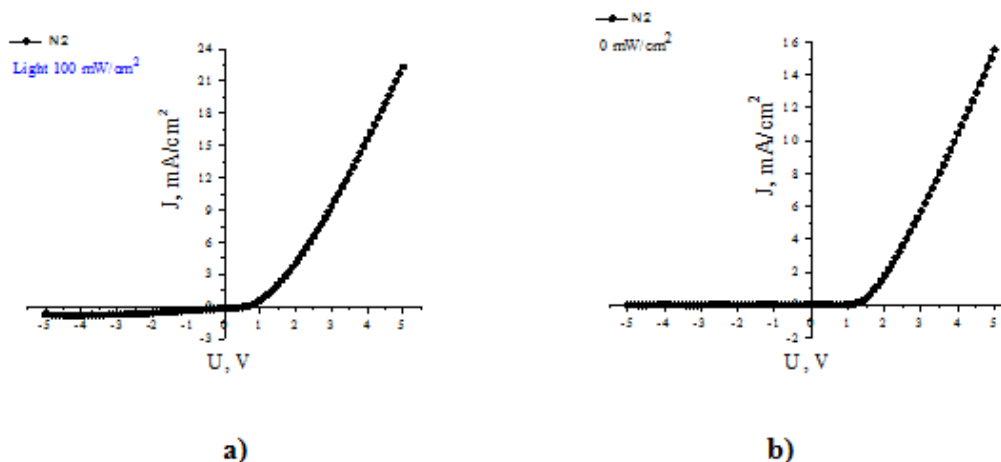
Spektrdan ko'rinib turibdiki, ifloslanish elementlari (O, C, Si va boshqalar) yo'qligi yuqori tozalikdagi sintez jarayoni amalga oshirilganini yaqqol ko'rsatadi. 5–10 keV atrofidagi qo'shimcha zaif Zn cho'qqisi  $Zn_K$  va  $Zn_L$  chiziqlariga to'g'ri keladi va material tarkibiga mosdir.

$Zn_xCd_{1-x}S/Au$  asosidagi geterostruktura uchun o'lchangan volt-amper xarakteristikalarining (VAX) tahlili ushbu tizimning fototashuvchilar generatsiyasi va barer o'tishlariga sezgir ekanligini ko'rsatadi. Grafikdan ko'rinib turibdiki, qorong'ilik sharoitida ( $U_q$ ) o'lchangan tok qiymatlari juda past bo'lib, butun diapazon bo'ylab deyarli o'zgarmaydi. Bu holat Au–ZnCdS interfeysida

Schottky tipidagi to'siq (barer) mavjudligini va uning teskari yo'nalishda tokni samarali ravishda cheklab turishini anglatadi.

Yorug'lik ta'sirida ( $U_y$ ) olingan VAX chizig'i esa keskin o'zgarishga ega bo'lib, musbat kuchlanishlar diapazonida tokning sezilarli oshishi kuzatiladi. Bu oshish  $Zn_xCd_{1-x}S$  yarimo'tkazgich qatlamida fotoinduksiyalangan elektron-kovak juftlarining hosil bo'lishi va ularning tashqi maydon ta'sirida ajralib chiqishi bilan bog'liq. Yorug'lik natijasida barer balandligining pasayishi (fotomodulyatsiya) termoemissiya va tunnellanish jarayonlarini kuchaytiradi, natijada tok qiymati qorong'ilikdagiga nisbatan bir necha baravar ortadi.

Optik o'tishlarning turi: Chiziqli sohaning mavjudligi va Tauc grafigi to'g'ridan to'g'ri o'tish (direct allowed) uchun tuzilganligi  $Zn_xCd_{1-x}S$  ning bu tarkibi uchun to'g'ri o'tishli yarimo'tkazgich ekanini tasdiqlaydi. Bu  $Zn_xCd_{1-x}S$  ning quyosh elementlari, fotodetektorlarda ishlatilishga mos kelishini ko'rsatadi.



**2-rasm.  $Zn_xCd_{1-x}S/Au$  asosidagi geterostrukturaning yorug'lik va qorong'ulikdagi VAX xarakteristikasi.**

Chapdagi grafik (yorug'lik ta'sirida,  $100 \text{ mW/cm}^2$ )da yorug'lik tushirilganida tok zichligi ancha katta qiymatlarga erishgan ( $24 \text{ mA/cm}^2$  gacha). Bu fotoemissiyon jarayon sodir bo'layotganini bildiradi: yorug'lik energiyasi natijasida yarimo'tkazgichda elektron-kovak juftlari hosil bo'ladi va ular tashqi elektr maydoni ta'sirida harakatga keladi. Natijada tok ortadi va diodning fotoelektr xossasi yaqqol namoyon bo'ladi. Shuningdek, grafikda to'g'ri tok sharoitida eksponensial o'sish, manfiy kuchlanishda esa tok deyarli nolga teng qolayotganini ko'rishimiz mumkin (2-a rasm).

O'ngdagi grafik (yorug'liksiz,  $0 \text{ mW/cm}^2$ )da yorug'lik tushirilmagan holatda tok zichligi ancha kichik bo'lib, maksimal qiymati taxminan  $15 \text{ mA/cm}^2$  atrofida. Bu holda faqat elektr maydon ta'sirida tashuvchilar (elektronlar va kovaklar) harakatlanadi. Yorug'liksiz sharoitda tashuvchi konsentratsiyasi kam bo'lgani uchun tok sezilarli darajada kamayadi (2-b rasm).

**Xulosa.** Zn qo'shilishi  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamlarining optik taqiqlangan zona kengligini sezilarli oshiradi. Tauc grafigi to'g'ri chiziqli maydonlarining mavjudligi materialning to'g'ridan to'g'ri optik o'tishga ega yarimo'tkazgich ekanini tasdiqlaydi. Zn konsentratsiyasining 0.05 dan 0.1 ga oshishi  $E_g$  ni  $\sim 0.15 \text{ eV}$  ga oshirgan. Bu xususiyatlar  $Zn_xCd_{1-x}S$  ni UV-Vis diapazonli optoelektron qurilmalar, jumladan, fotoelektrika, fotoelementlar, foton detektorlar uchun istiqbolli material ekanini tasdiqlaydi.

#### Adabiyotlar

- [1]. Goswami, Thin Film Fundamentals, New Age International (P) Limited, New Delhi, (1996).
- [2]. L.E.Brus, J.Chem. Phys.80, 4403(1984).
- [3]. Humaira Latif, Rehana Zia, Muneeb Irshad, Huma Latif, Optical and structural properties of  $Zn_xCd_{1-x}S$  ( $x=0.2, 0.4, 0.6$  and  $0.8$ ) thin films prepared by thermal evaporation technique, International Educative Research Foundation and Publisher © 2013 pg. 30

## **Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> YUPQA QATLAMLARINING MORFOLOGIK VA STRUKTURAVIY XUSUSIYATLARI**

**K.M. Quchqarov, B.A. Ergashev, D.Z. Isakov, R.R. Khurramov, M.A. Makhmudov,  
R.T. Yuldoshov, M. Pirimmatov**

*S.A. Azimov nomidagi Fizika-texnika instituti*

Global miqyosda energiyaga bo'lgan talabning ortib borishi barqaror, ishonchli va iqtisodiy jihatdan maqbul fotoelektr (PV) materiallarini izlashni kuchaytirdi. Hozirda polikristalli kremniy (Si), kadmii tellurid (CdTe) hamda mis–indiy–galliy selenid (Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>, CIGS) quyosh elementlari (QE) da asosiy yutuvchi qatlamlari sifatida qo'llanilmoqda va ularning barchasi 20% dan yuqori sertifikatlangan quvvatni quyosh energiyasiga aylantirish samaradorligiga (FIK) erishgan [1-3]. Biroq Si ishlab chiqarishning yuqori tannarxi, Cd ning toksikligi, Ga va In ning qimmatligi, shuningdek In, Ga hamda Te elementlarining kamyoblighi ushbu materiallardan yupqa qatlamli QE ni ommaviy ishlab chiqarishda jiddiy muammolarni yuzaga keltiradi [3,4].

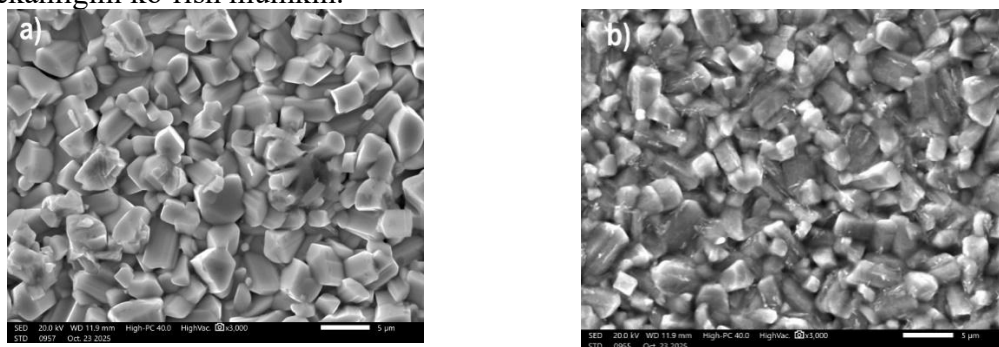
So'nggi o'n yillikda Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> yupqa qatlamlari QE ning yutuvchi qatlami sifatida katta e'tiborni o'ziga qaratdi. Bunga uning ko'rinadigan yorug'lik diapazonida juda yuqori optik yutilish ko'effitsiyenti ( $>10^5 \text{ cm}^{-1}$ ), 1.1-1.3 eV oralig'idagi maqbul taqiqlangan soha kengligi, yuqori zaryad tashuvchilar harakatchanligi ( $10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), past zaharlilik darajasi, oddiy faza kimyosi, arzonligi va elementlarining yuqori tabiiy tarqalganligi sabab bo'lmoqda [5–9]. Shuningdek, Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> fotoelektrokimyoviy suv parchalash qurilmalarida ham istiqbolli natijalar ko'rsatgan [10–13].

Ushbu tadqiqotda KMDO usuli yordamida vodorod atmosferasida oddiy shisha va Mo bilan qoplangan shisha sirtlariga o'stirilgan Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> yupqa qatlamlarning morfologik va strukturaviy hossalari o'rganilgan.

KMDO usulida Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> yupqa qatlamlarini olish uchun optimal texnologik rejimlar aniqlanib, tajribalar davomida asosiy parametrlar qat'iy nazorat qilindi. Xususan, manba bo'lgan surma uchun harorat ( $T_{\text{Sb}}$ ) 850 °C da, selen manbasi uchun harorat ( $T_{\text{Se}}$ ) esa 440 °C da ushlab turildi. Taglik harorati ( $T_{\text{tag}}$ ) 500 °C qilib belgilandi va o'stirish jarayoni 30 daqiqa davom ettirildi.

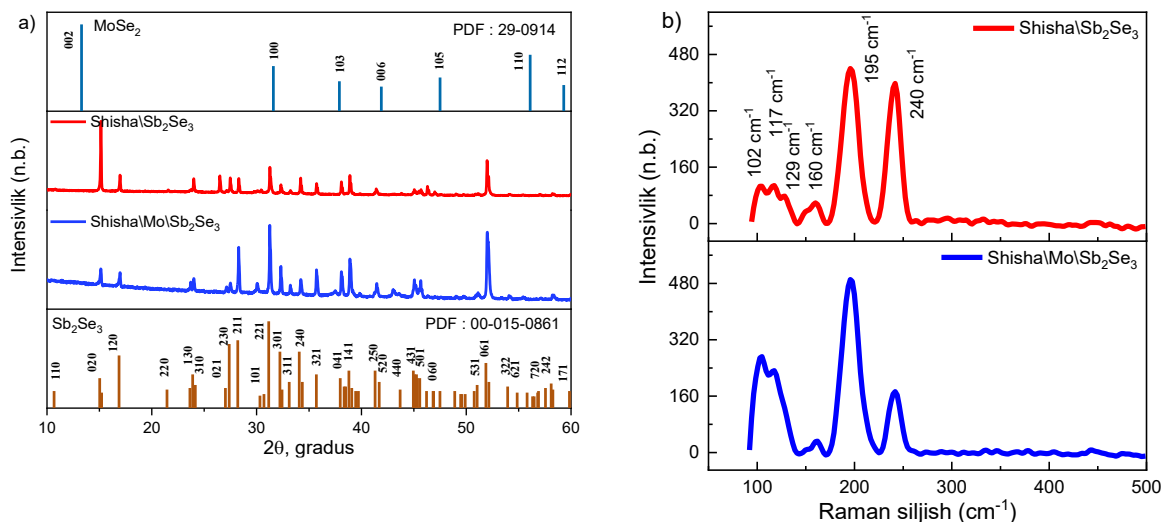
Har ikkala taglik uchun ham EDS spektrlarida Sb va Se elementlariga tegishli asosiy energiya cho'qqilari aniq kuzatiladi. Shakllangan donacha ustida olingan EDS spektr tahlili Sb/Se nisbati sxitiometrik tarkibga yaqin ekanligini ya'ni shisha va Mo qoplangan shisha uchun mos ravishda 0.70 va 0.69 ga tengligini ko'rsatdi.

1a - rasmda shisha taglik ustiga o'stirilgan Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> yupqa qatlamining yuzasi zich, bir-biriga yaqin joylashgan va keskin qirralangan donachalardan tashkil topganligini ko'rish mumkin. Donachalar o'rtacha o'lchamlari 0.5–2  $\mu\text{m}$  oralig'ida bo'lib, polikristall tuzilishga ega va nisbatan yirik donachali morfologiya kuzatildi. Mo qoplangan shisha ustiga o'stirilgan Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> yupqa qatlamining donachalar nisbatan kichikroq bo'lib, donchalarning o'lchamlari 300 nm – 1.5  $\mu\text{m}$  oralig'ida yotadi (1b-rasm). Sirtida donalar zich va bir-biriga yaqin joylashgan hamda bo'shliqlar juda kam ekanligini ko'rish mumkin.



**1-rasm. Oddiy shisha (a) va Mo bilan qoplangan shisha (b) ustiga  
o'stirilgan Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> yupqa qatlamlarining SEM tasvirlari**

2a-rasmda oddiy shisha va Mo bilan qoplangan shisha ustiga o'stirilgan  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  yupqa qatlamlarining Rentgen tahlillari keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, ikki xil taglikda o'stirilgan  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  yupqa qatlamlarda ham bir xil cho'qqilar (020, 120, 130, 230, 211, 221, 301, 240, 041, 141, 431, 501 va 061) kuzatilgan bo'lib, ularning intensivliklari taglikning turiga qarab turlicha bo'ldi. Shisha taglikda o'stirilgan  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  yupqa qatlamlarda asosan hk0 yo'nalishidagi cho'qqilar (020, 120, 130, 230 va 240) dominantlik qilganini ko'rish mumkin.



**2-rasm. Oddiy shisha va Mo bilan qoplangan shisha ustiga o'stirilgan  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  yupqa qatlamlarining Rengen tahlili (a) va Raman spektrlari (b)**

2b-rasmda 785 nm lazer chizig'i yordamida o'lichangan Raman spektroskopiyasi natijalari Romboedrik Se<sub>6</sub> halqalari bilan assotsiatsiyalangan 102 va 129 cm<sup>-1</sup> dagi cho'qqilar ushbu halqali strukturalarning tebranishlariga mos keladi [14]. 117 cm<sup>-1</sup> dagi Raman cho'qqi ortorombik  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  fazasining Ag tipidagi past chastotali panjara tebranish rejimi bo'lib, materialning fazaviy tozaligi va strukturaviy barqarorligini tasdiqlaydi. 160 cm<sup>-1</sup> dagi cho'qqi  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  ning ortorombik fazasiga xos Ag simmetriyali ichki vibratsion faza bo'lib, Sb–Se bog'larining kuchaygan cho'zilish tebranishini ifodalaydi. 195 cm<sup>-1</sup> dagi tebranish  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  kristall panjarasida mavjud yuqori energiyali Ag simmetriyali ichki cho'zilish rejimi sifatida baholanib, Sb–Se kovalent bog'larining kuchli dinamik javobini aks ettiradi. 240 cm<sup>-1</sup> atrofidagi Raman cho'qqi ortorombik  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  fazasi uchun xos bo'lgan yuqori chastotali Ag turidagi ichki vibratsiya rejimiga mansub bo'lib, Sb–Se bog'larining lokal yuqori energiyali tebranishlarini ifodalaydi [15–17].

Shisha va Mo qoplama ustida o'stirilgan  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  qatlamlaridagi Raman intensivliklaridagi farq taglikning film bilan mexanik bosim, sirt kimyosi, hamda optik interferensiya sharoitiga ta'siri bilan izohlanadi. Sodali-ohak shisha sirtida ichki Sb–Se bog'larining kuchli cho'zilish tebranishlarini kuchaytirib, yuqori chastotali 160 va 240 cm<sup>-1</sup> cho'qqilarining intensivligini oshiradi, Mo-qoplangan shishada yupqa qatlam bilan kuchliroq interfaol bog'lanish (mexanik bosim, reflektivlik va yaxshiroq tekstura) hosil qilib, past va o'rta chastotali Ag rejimlari (102, 117, 129, 195 cm<sup>-1</sup>) ning Raman sezgiriligini orttiradi [15–17].

**Xulosa.** O'tkazilgan tahlillar Mo qoplangan taglikning  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  yupqa qatlamlarining o'sishi va ularning fizik xossalari sezilarli ta'sir ko'rsatishini tasdiqladi. Mo taglikda yanada zich, izchil va vertikal yo'nalgan kristall tuzilish shakllandi, bu esa samarali zaryad transporti uchun qulay sharoit yaratadi. Shisha taglikda kuzatilgan hk0 yo'nalishlar o'rniga Mo taglikda (211) va (221) kabi yuqori samaradorlikka yo'naltirilgan fazalar ustunlik qildi. Raman, SEM va XRD natijalari kompleks tarzda Mo taglikning struktura sifatini oshiruvchi rolini ko'rsatdi. Shu sababli, Mo bilan qoplangan taglik  $\text{Sb}_2\text{Se}_3$  asosidagi fotoelektrik va optoelektron qurilmalar uchun eng istiqbolli tagliklardan biri hisoblanadi.

**Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati:**

1. A. Mavlonov, T. Razykov, F. Raziq, J. Gan, J. Chantana, Y. Kawano, T. Nishimura, H. Wei, A. Zakutayev, T. Minemoto, Sol. Energy, 2020, 201, 227–246.
2. M. Green, E. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, X. Hao, Prog. Photovoltaics Res. Appl., 2021, 29, 3–15.
3. R. Scheer, H.-W. Schock, Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices, John Wiley & Sons, 2011.
4. A. Zakutayev, Curr. Opin. Green Sustainable Chem., 2017, 4, 8–15.
5. C. Chen, D. C. Bobela, Y. Yang, S. Lu, K. Zeng, C. Ge, B. Yang, L. Gao, Y. Zhao, M. C. Beard, Front. Optoelectron., 2017, 10, 18–30.
6. H. Lei, J. Chen, Z. Tan, G. Fang, Sol. RRL, 2019, 3, 1900026.
7. O. S. Hutter, L. J. Phillips, K. Durose, J. D. Major, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2018, 188, 177–181.
8. Y. Zhou, M. Leng, Z. Xia, J. Zhong, H. Song, X. Liu, B. Yang, J. Zhang, J. Chen, K. Zhou, Adv. Energy Mater., 2014, 4, 1301846.
9. S. Ghosh, M. Moreira, C. Fantini, J. González, Sol. Energy, 2020, 211, 613–621.
10. S. Chen, T. Liu, Z. Zheng, M. Ishaq, G. Liang, P. Fan, T. Chen, J. Tang, J. Energy Chem., 2022, 67, 508–523.
11. J. Tan, W. Yang, H. Lee, J. Park, K. Kim, O. S. Hutter, L. J. Phillips, S. Shim, J. Yun, Y. Park, Appl. Catal. B, 2021, 286, 119890.
12. W. Yang, J. H. Kim, O. S. Hutter, L. J. Phillips, J. Tan, J. Park, H. Lee, J. D. Major, J. S. Lee, J. Moon, Nat. Commun., 2020, 11, 1–10.
13. W. Yang, J. Park, H.-C. Kwon, O. S. Hutter, L. J. Phillips, J. Tan, H. Lee, J. Lee, S. D. Tilley, J. D. Major, Energy Environ. Sci., 2020, 13, 4362–4370.
14. Zhou et al., J. Phys. Chem. C, 2020, 124, 23456–23463
15. Wang et al., J. Mater. Chem. C, 2018, 6, 10592–10601
16. Liu et al., ACS Appl. Mater. Interfaces, 2019, 11, 15564–15572
17. Chen et al., Opt. Mater. Express, 2017, 7, 1274–1283

**МЕХАНИЗМ ДЕГРАДАЦИИ a-Si/c-Si С ФРАКТАЛЬНОЙ ГРАНИЦЕЙ  
РАЗДЕЛА ПРИ ИОНИЗИРУЮЩЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ РАДИАЦИИ**

**Б.Р. Кутлимуротов<sup>1\*</sup>, Б.Л. Оксенгендлер<sup>2</sup>, С.Е. Максимов<sup>3</sup>, Х.Б. Ашуров<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Академический лицей «Темурбеклар мактаби», Узбекистан, г. Ташкент

<sup>2</sup>Институт материаловедения АН РУз

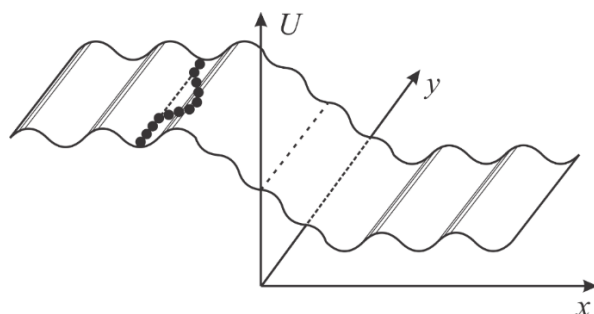
<sup>3</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН РУз

\*e-mail: bek.fiz.1986@mail.ru

В проблеме радиационной деградации полупроводниковых приборов на основе гидрогенизированного аморфного кремния (a-Si:H), к настоящему времени предложено несколько механизмов деградации касающихся как объема a-Si:H, так и границы раздела (ГР) a-Si/c-Si, что отражает особую чувствительность радиационной стойкости к обоим частям приборов этого типа: в объеме – модификации механизма типа эффекта Стеблера-Вронского (ЭСВ) [1] и двух-ступенчатого механизма при упругом смещении быстрыми электронами [2]; на ГР – механизм вязких пальцев [3].



В настоящей работе обсуждается новый механизм деградации a-Si, связанный с ионизационно-стимулированной (фотонами и электронами) фрактальной границы раздела (ФГР) между a-Si и c-Si. ГР типа a-Si/c-Si в модели Кана [4] имеет вид на рис.1.

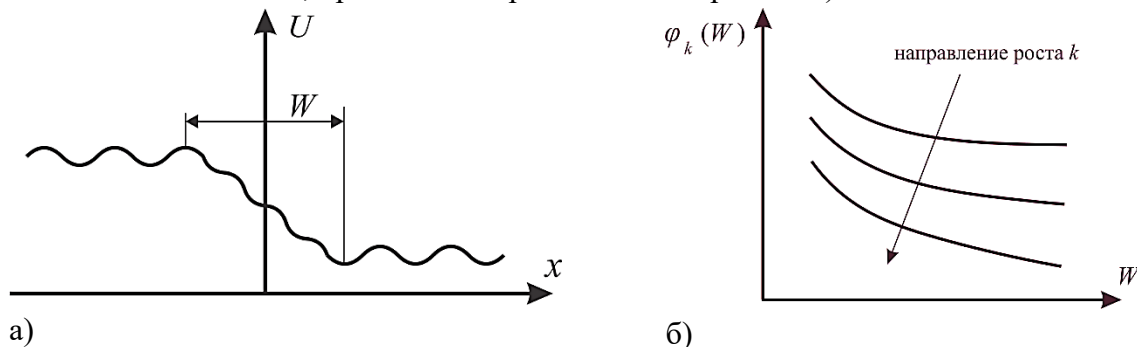


**Рис. 1. Схематическая изображения начала флуктуации перехода части моделирующие цепочки из долины 0 в долину 2 и т.д. до долины n, т.е. ширина плоской ГР  $W = na$ :  $a$  – межатомное расстояние,  $W$  – ширина ГР.**

В данном случае рассмотрена плоская граница вдоль оси  $y$  с одинаковой шириной  $W$  (рис. 2 а). При переходе к ФГР величину  $W$  можно считать не постоянной, а фрактальной т.е. сочетающей детерминизм и беспорядок.

Вид функции  $\varphi_k(W)$  – распределение по шинам барьера типа гиперболы весьма часто используется во фрактальной науке [5], причем величина  $k$  может быть и дробный.

Согласно [4], ГР имеет два режима дестабилизации ГР (тангенциальный, когда флуктуационный выброс одной фазы растет вдоль оси  $y$ , и нормальный, когда движения ГР осуществляется вдоль оси  $x$ , причем всей границей одновременно).



**Рис. 2. Случай плоской ГР:  $W = const$  (а); случай ФГР:  $W \neq const$ , причем  $W$  имеет распределение по размерам в виде  $\varphi_k(W) = \frac{const}{W^k}$  (б).**

Последний случай (нормальный механизм фазового перехода) отвечает быстрой деградации, именно это радиационное (ионизационное) стимулирование движения ФГР будет проанализировано нами далее.

Анализ показывает, что стабильность и дестабилизация ГР a-Si/c-Si обусловлено соотношением нескольких величин: свободной энергии фазового перехода ( $-\Delta F_V$ ), поверхностным натяжением ГР ( $\sigma_0$ ), отношением ширины ГР к межатомному расстоянию ( $W/a$ ), а также исходной степенью поврежденных химических связей ( $\alpha_0$ ) в a-Si [6].

Анализ показывает, что для дестабилизации ГР по нормальному механизму необходимо «испортить» некое дополнительное число химических связей за счет их ионизации ( $\alpha$ ); эта величина определяется выражением:

$$\alpha > \alpha^* = \frac{1 - \alpha_0}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{-\Delta F_V a}{\pi \sigma_0 g}} \right) \quad (1)$$

В этом выражении  $g(W) = \pi(W/a)^3 \exp[-\pi(W/a)]$ .

При ФГР необходимо осуществить усреднение по спектру ширины ГР:

$$\langle \alpha(W, k) \rangle = \frac{\int_{W_{min}}^{W_{max}} \varphi_f(W) \alpha(W) dW}{\int_{W_{min}}^{W_{max}} \varphi_f(W) dW}; \quad (2)$$

Проводя усреднение с использованием функции  $\varphi_f(W) = \frac{const}{W^k}$ , мы получим величину  $\langle \alpha(W, k) \rangle$ , которую уже необходимо использовать для анализа дестабилизации (типа формулы (1)). Результат анализа показывает, что с увеличением параметра фрактальности ( $k$ ), дестабилизация ФГР происходит при числе ионизации, меньших чем для плоской ГР:

$$\langle \alpha(W, k) \rangle < \alpha^*, \quad (3)$$

причем  $\frac{d(\alpha^* - \langle \alpha(W, k) \rangle)}{dk} > 0$  (см. рис. 3).

$$\alpha^* - \langle \alpha(W, k) \rangle$$



**Рис. 3. Схематическое изображение эффекта понижения критической величины поврежденных связей при радиационном воздействии на ФГР для её дестабилизации т.е. и деградации приборных структур, содержащих такие ФГР.**

Представленные выше результаты справедливы для фотовоздействия, электронного облучения, а также облучение и ионами (напр. протонами) при достаточно высоких энергиях, когда электронные потери превышают все остальные.

#### Список литературы:

1. Х.Б. Ашуров, Б.Р. Кутлимуротов, С.Е. Максимов, Н.Н. Никифорова, Б.Л. Оксенгендлер. Эффект Стеблера-Вронского в аморфном кремнии и нанофрактальная спиновая химия // *Узбекский физический журнал (УФЖ)*. – 2021. – Vol. 23, No.3. – pp.29-32.
2. Kh. B. Ashurov, B.R. Kutlimurotov, B. L. Oksengendler. Characteristics of Radiation Degradation of Solar Cells with an Abnormally High Concentration of Hydrogen Atoms // *Applied Solar Energy*. – 2018. – Vol. 54, No. 5. – pp. 322-325.
3. Х.Б. Ашуров, Б.Р. Кутлимуротов, Б.Л. Оксенгендлер. Деградация границы раздела *a-Si/c-Si* по фрактальному механизму «квазивязких пальцев». // “Яримўтказгичлар физикасининг ҳозирги замон муаммолари” Республика илмий анжумани материаллари, 26-27 октябрь 2018 йил, Тошкент ш., 108-109 б.
4. Дж. Кан. Теория роста кристалла и движения границы раздела фаз в кристаллических материалах // *Успехи физических наук*. – 1967. – Т. 91, вып. 4. – С. 677-689.
5. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254с.
6. R.W. Keyes. Antibonding potentials and dielectric properties of amorphous phases // *Physics letters*. – 1975. – V.51A, No 7. – P. 395-397.

## TAUC GRAFIK ASOSIDA $Zn_xCd_{1-x}S$ YUPQA QATLAMLARINING OPTIK XUSUSIYATLARI TAHLILI

**T.M. Razikov, S.A. Muzafarova, K.M. Kuchkarov, M.A. Maxmudov,  
R.T. Yuldoshov, A.S. Achilov, N.A. Axmedova, O.Sh. Norqulov.**

*Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, O'zbekiston,  
Toshkent, Yangi Olmazor ko'chasi, 20*

So'nggi yillarda  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa plyonkasini yaratish va uni tadqiq qilish bo'yicha juda ko'p ishlar olib borilmoqda. Buning asosiy sababi, quyoshdan keladigan ultrabinafsha nurlariga sezgir fotodiodlar yaratishga bo'lgan intilishdir.  $Zn_xCd_{1-x}S$  esa ultrabinafsha nurlariga sezgir geterostruktura bo'lib, x ning qiymatini o'zgartirish orqali uning taqiqlangan soha kengligini sozlash mumkin[1,2].

Bizning tadqiqotlarimizda "Yarimo'tkazgichli qatlamlarni gaz tashish usulida o'stiruvchi qurilmasi" yordamida  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlam molibden taglikda o'stirildi. TAUC grafigi asosida  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamlarining optik xususiyatlari tahlil qilindi.

1-rasmda  $Zn_{0.05}Cd_{0.95}S$  va  $Zn_{0.1}Cd_{0.9}S$  qatlamlarining Tauc grafigi, ya'ni  $(\alpha hv)^2$  ning hv energiyaga bog'liqligi tasvirlangan. Grafik to'g'ridan to'g'ri ruxsat etilgan optik o'tish (direct allowed transition) uchun qurilgan va taqiqlangan zona kengligi ( $E_g$ ) qiymati chiziqli sohaning energiya o'qiga ekstrapolyatsiyasi bilan aniqlangan.

Har ikki na'munada kuzatilgan xususiyatlar:

- Past energiyalarda  $(\alpha hv)^2$  juda kichik qiymatlarga ega – bu past absorbsiya hududi;
- Energiya ortishi bilan egri chiziq keskin ko'tarila boshlaydi, bu esa asosiy optik o'tishlar boshlanishiga mos keladi;
- Yuqori Zn tarkibida ( $x = 0.1$ ) chiziq yanada chapga siljiydi, bu  $E_g$  oshishini ko'rsatadi.

Zn miqdori qattiq qotishma tarkibida oshishi panjara kengayishi va bog'lanish energiyasining ortishi bilan izohlanadi. Taqiqlangan soha ( $E_g$ ) qiymatlari:

$Zn_{0.05}Cd_{0.95}S$  (kul rang)  $E_g \approx 2.40-2.42$  eV

$Zn_{0.1}Cd_{0.9}S$  (qizil)  $E_g \approx 2.55-2.58$  eV

Zn miqdori oshishi bilan  $E_g$  ortadi. Bu shuni anglatadiki, ZnS ning taqiqlangan sohasi katta (3.7 eV), CdS niki esa kichikroq (2.42 eV), shuning uchun Zn qo'shilishi qattiq eritma taqiqlangan sohasini kengaytiradi. Zn–Cd–S uchli tizimida taqiqlangan soha Vegart qonuniga o'xshash tarzda, tarkibga chiziqli yoki ozgina parabola shaklida bog'liq:

$$E_g(x) = x E_g(ZnS) + (1-x) E_g(CdS) - b x(1-x)$$

Natijalar shuni ko'rsatadiki:

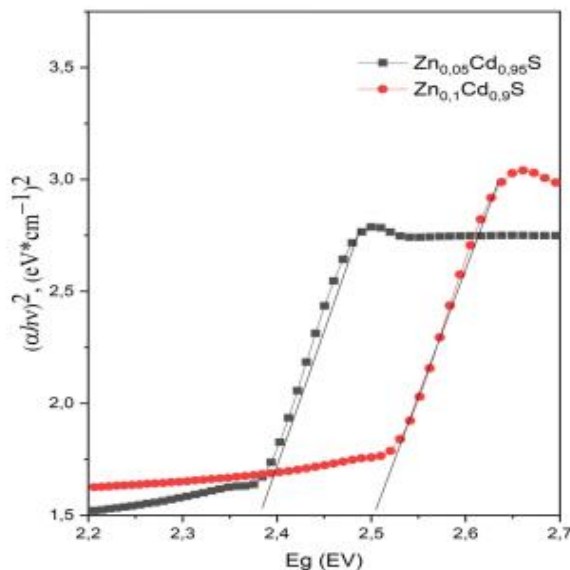
$x = 0.05$  da  $E_g \approx CdS$  ga juda yaqin;

$x = 0.1$  da sezilarli oshish mavjud.

Optik o'tishlarning turi: Chiziqli sohaning mavjudligi va Tauc grafigi to'g'ridan to'g'ri o'tish (direct allowed) uchun tuzilganligi  $Zn_xCd_{1-x}S$  ning bu tarkibi uchun to'g'ri o'tishli yarimo'tkazgich ekanini tasdiqlaydi. Bu uning quyosh elementlari, fotodetektorlarda ishlatilishga mos kelishini ko'rsatadi.

Yupqa qatlam qattiq qotishma  $Zn_xCd_{1-x}S$  Zn tarkibi oshishining fizik sababi: ZnS tarkibi ortganda, panjara doimiy o'zgaradi, valent va o'tkazuvchanlik zonalari orasidagi energiya farqi kengayadi, materialning adsorbsiya chegarasi yuqori energiyaga siljiydi. Natijada  $E_g$  qiymati

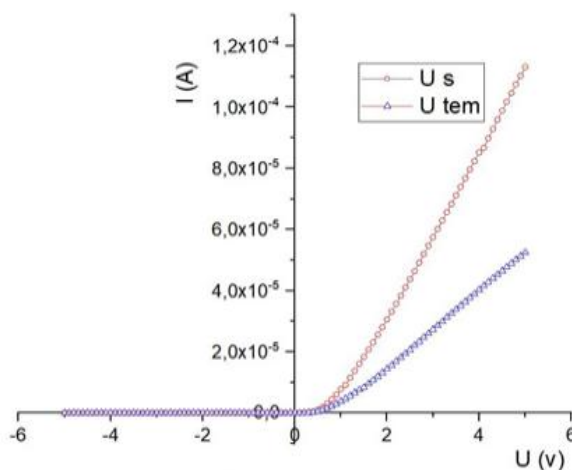
ortadi. Bu o'sish Vegart qonuni bilan mos keladi, ya'ni ZnS–CdS qattiq eritmalarda taqiqlangan soha chiziqli tarzda o'zgaradi.



1-rasm.  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamlarining  $(\alpha h\nu)^2$  ning bog'liqligi

Tahlili natijalari quyidagilardan iborat: Zn qo'shilishi  $Zn_xCd_{1-x}S$  yupqa qatlamlarining optik taqiqlangan zona kengligini sezilarli oshiradi; Tauc grafigi to'g'ri chiziqli mintaqalarning mavjudligi materialning to'g'ridan to'g'ri optik o'tishga ega yarimo'tkazgich ekanini tasdiqlaydi; Zn konsentratsiyasining 0.05 dan 0.1 ga oshishi  $E_g$  ni  $\sim 0.15$  eV ga oshirgan. Bu xususiyatlar  $Zn_xCd_{1-x}S$  ni UV–Vis diapazonli optoelektron qurilmalar, jumladan: fotoelektrika fotoelementlar, foton detektorlar uchun istiqbolli material ekanini tasdiqlaydi. Au -  $Zn_xCd_{1-x}S$  tuzulmasiga ega Shottki to'siqli fotoqabullagichining xususiyatlari tadqiq qilindi.

$Zn_xCd_{1-x}S/Au$  asosidagi geterostruktura uchun o'lchangan volt-amper xarakteristikalarining (VAX) tahlili ushbu tizimning fototashuvchilar generatsiyasi va barer o'tishlariga sezgir ekanligini ko'rsatadi. Grafikdan ko'rinib turibdiki, qorong'ulik sharoitida ( $U_q$ ) o'lchangan tok qiymatlari juda past bo'lib, butun diapazon bo'ylab deyarli o'zgarmaydi. Bu holat Au–ZnCdS interfeysida Schottky tipidagi to'siq (barer) mavjudligini va uning teskari yo'nalishda tokni samarali ravishda cheklab turishini anglatadi. Yorug'lik ta'sirida ( $U_{yo}$ ) olingan VAX chizig'i esa keskin o'zgarishga ega bo'lib, musbat kuchlanishlar diapazonida tokning sezilarli oshishi kuzatiladi (2-rasm).



2-rasm.  $Zn_xCd_{1-x}S/Au$  asosidagi geterostruktura volt-amper xarakteristisi

Bu oshish  $Zn_xCd_{1-x}S$  yarimo'tkazgich qatlamida fotoinduksiyalangan elektron-kovak juftlarining hosil bo'lishi va ularning tashqi maydon ta'sirida ajralib chiqishi bilan bog'liq. Yorug'lik natijasida to'siq balandligining pasayishi (fotomodulyatsiya) termoemissiya va tunnellanish jarayonlarini kuchaytiradi, natijada tok qiymati qorong'ilikdagiga nisbatan bir necha baravar ortadi.

Tokning musbat kuchlanish tomonida ko'proq oshishi, manfiy tomonda esa past qiymatlarda qolishi struktura to'liq ommik emas, balki to'g'rilovchi (diodsimon) xususiyatga ega ekanligini bildiradi. Bunday asimmetriya Au metalining yuqori ishchi funksiyasi tufayli  $ZnCdS$  bilan to'siq hosil bo'lishiga xos bo'lgan tabiiy natijadir.

#### ADABIYOTLAR

- [1]. K.T.R.Reddy and P.J.Reddy, J.Phys.D: 25, 1345. [2]. B.M.Basol, J.Appl.Phys, 55,601  
[3]. P. Кабулов, О. Атабоев, Ф. Акбаров, Световые вольтамперные характеристики  $Au-Zn_xCd_{1-x}S$ -Мо структурных фотоприемников с широким спектром фоточувствительности, International Conference "Fundamental and Applied Problems of Physics", September 22-23, 2020, стр-210-212

#### YUPQA a-Si:H NANOQATLAMLI TUZILMALAR OLIISH VA MODELLASHTIRISH

**R.M. Jalalov, A.A. Abdug'affarov, U.N. Abduqaxxorov**

*Namangan davlat universiteti, [rjalolov79@mail.ru](mailto:rjalolov79@mail.ru)*

Gidrogenizatsiyalangan (vodorod kiritilgan) amorf kremniy (a-Si:H) asosidagi nanoqatlamli tuzilmalar fotosensorlar, yupqaplyonka tranzistorlar va quyosh elementlarida keng qo'llaniladi [1-2]. Nanoqalinlik ( $L \approx 5-30$  nm) diapazonida interfeys noteksligi, lokallashgan holatlar va kvant sathlarning diskretligi effektlari optik tirqish va tok tashuvchilar xususiyatlarini sezilarli o'zgartiradi. Ushbu tezisda PECVD usulida a-Si:H nanoqatlamlarni olishning texnologik parametrlari,  $U_V-V_{is}$  spektroskopiya orqali optik tirqishni Tauc usulida aniqlash, haroratga bog'liq harakatchanlik tirqishini Boze-Eynshteyn modeli bilan tasvirlash hamda  $L$  bo'yicha tirqish siljishini samarali massa yaqinlashuvida baholash ko'rsatib berildi. Sintetik (namunali) hisoblashlar asosida  $E_g(T)$  kamayishi va  $L$  kamayganda  $E_g(L)$  oshishi tendensiyalari grafiklar va jadvallar orqali ifodalandi.

a-Si:H materialining asosiy xususiyati kristall tuzilmaning yo'qligiga qaramay, vodorod passivatsiyasi hisobiga elektron holatlar zichligining (DOS) bir qismi barqarorlashishi va "harakatchanlik tirqishi" tushunchasi orqali zonalarga yaqinlashtirib tasvirlanishidir. Nanoqatlamli a-sistemalarda ( $L=30$  nm) interfeysdagi defektlar, Urbax dumlari va kuchli lokallashuv transportni cheklaydi; bir vaqtning o'zida geometriya cheklanishi sabab kvantlashuv energiyasi ham kirib keladi.

**Olish texnologiyasi (PECVD).** a-Si:H nanoqatlamlar past haroratli plazmali kimyoviy bug'lantirish (PECVD) orqali shisha yoki Si tagliklarda  $150-250$  °C atrofida o'sitiriladi. Tajribaviy ishlarda quyidagi parametrlar tirqish va defektlar zichligiga hal qiluvchi ta'sir



ko'rsatadi: gazlar nisbati  $R=H_2/SiH_4$ , plazma quvvati  $P_{RF}$ , bosim  $p$ , o'sish tezligi  $v$  va substrat harorati  $T_s$ . Vodorod miqdori ortishi defektlarni passivlab, optik tirqishni kattalashtirishi mumkin.

**1-jadval. a-Si:H nanoqatlam olish uchun namunaviy PECVD parametrlari.**

| № | $T_s$<br>(°C) | $p$<br>(mTopp) | $P_{RF}$<br>(BT) | $R=H_2/SiH_4$ | $L$ (nm) |
|---|---------------|----------------|------------------|---------------|----------|
| 1 | 200           | 500            | 20               | 10            | 30       |
| 2 | 200           | 500            | 20               | 20            | 15       |
| 3 | 200           | 500            | 20               | 30            | 7        |
| 4 | 180           | 400            | 15               | 20            | 10       |

Optik tirqishni aniqlash uchun  $U_V-V_{is}$  spektrdan yutilish koeffitsiyenti  $\alpha(\lambda)$  hisoblanadi. Yupqaqatlam uchun soddalashtirilgan holda  $\alpha \approx (1/d) \cdot \ln(1/\sigma)$  (bu yerda  $d$  – qatlam qalinligi,  $\sigma$  – o'tkazuvchanlik) deb olish mumkin. Amorf yarimo'tkazgichlarda Tauc munosabati qo'llanadi:

$$\sqrt{\alpha h \omega} = \beta (h\nu - E_g) \quad (1)$$

bu yerda  $E_g$  – optik tirqish (odatda yarimo'tkazgichlarda taqiqlangan zona tushunchasi ishlatiladi, bu zonada elektron bo'lmaydi, qachonki taqiq zona kengligiga teng bo'lgan energiya berilsa, elektron valent zonadan o'tkazuvchanlik zonasiga chiqadi. Agar elektr maydoni bo'lsa elektronlar harakatlandi. Amorf yarimo'tkazgichlarda esa taqiqlangan zonada ham nuqsonlar hisobiga energetik holatlar bo'ladi va bu joyda elektronlar lokalashgan holatda mavjud bo'ladi. Maydon ta'sirida elektronlar harakatlanmaydi, chunki ular lokallashgan holatda bo'ladi. Shunga ko'ra odatda ilmiy adbiyotlarda bu sohani harakatchanlik tirqishi deb yuritiladi. Agar elektronlar valent zona dumidan, o'tkazuvchanlik zon dumiga yorug'lik ta'sirda o'tsa, bu sohani optik tirqish deb yuritiladi)  $\beta$  – doimiy,  $h\nu$  – foton energiyasi.

Haroratga bog'liq tirqish o'zgarishini fononlar bilan o'zaro ta'sir hisobidan Bose–Eynshteyn modeli bilan ifodalanadi.

PECVD usulida a-Si:H nanoqatlamlarni olishda gazlar nisbati, plazma quvvati va taglik harorati optik tirqish va defektlar zichligini boshqaruvchi asosiy omillar ekani ta'kidlandi. UV–Vis asosida Tauc tahlili orqali  $E_g$  ni aniqlash va haroratga bog'liq  $E_g(T)$  ni Bose–Eynshteyn modeli bilan tasvirlash nanoqurilmalar uchun parametrlarni tizimli optimallashtirish imkonini berdi.

### **Foydalanilgan adabiyotlar**

1. G.D. Cody, T. Tiedje, B. Abeles, B. Brooks and Y. Goldestein. Disorder and the Optical-Absorption Edge of Hydrogenated Amorphous Silicon. Physical Review Letters, V 47, N 20, (1981), pp. 1480-1483. <https://doi.org/10.1051/jphyscol:1981463>
2. S. Zainobidinov, R.G. Ikramov, R.M. Zhalalov, and M.A. Nuritdinova, "Distribution of electron density of states in allowed bands and interband absorption in amorphous semiconductors," Optics and spectroscopy, **110**(5), 762–766 (2011). <https://doi.org/10.1134/S0030400X11030271>

## МОНОКРИСТАЛЛ КРЕМНИЙНИНГ ХОССАЛАРИГА ТЕРБИЙ (Тb) ВА ТУЛИЙ (Тm) ИОНЛАРИНИНГ ТАЪСИРИ

Я.А.Сайдимов, Ф.Б.Умаров

*Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги яримўтказгичлар физикаси ва  
микроэлектроника институти*

Тербий (Тb) ва тулий (Тm) каби ноёб тупроқ элементларининг кремнийга таъсирини ўрганишнинг долзарблиги шундаки, нафақат улардаги заряд ташувчиларнинг концентрацияси ва ҳаракатчанлигини назорат қилиш, балки ундаги назорат қилиб бўлмайдиган (оптик фаол кислород ва углерод) аралашмалар таркибини сезиларли даражада камайтириш натижасида микроэлектроника компонентларнинг самарадорлиги ва барқарорлигини ошириш ўта муҳимдир [1]. Бундан ташқари, нодир ер элементларини кристалл панжарага киритилиши натижасида унда, Тb ва Тm ионлари, кремний атомларининг панжара узелларини эгалламайди чунки, уларнинг ион радиуслари ва валентликлари мос келмаслиги сабабли кристалл панжаранинг бўш ҳажмларида ёки кислород ва нуқсонлар билан комплекс ҳосил [2] қилган ҳолда жойлашади. Бу ҳолат кремнийнинг электрон тузилишига, оптик ва люминесцент хоссаларига ҳамда рекомбинация жараёнларига сезиларли таъсир кўрсатади. Бу эса олдиндан белгиланган параметрларга эга бўлган, янги яримўтказгичли қурилмаларни ишлаб чиқиш имкониятларини очади.

Монокристалл кремний (Si) замонавий микроэлектроника ва фотоникада асосий материал ҳисобланади. Унинг функционал хоссаларини кенгайтириш мақсадида кремний кристаллига нодир ер элементлари (НЕЭ), жумладан тербий [3-4] (Тb<sup>3+</sup>) ва тулий (Тm<sup>3+</sup>) ионлари киритилади. Тb<sup>3+</sup> ионининг 4f-қатламлари билан боғлиқ f-f электрон ўтишлари (айниқса  $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ ) кремнийда ёрқин яшил фотолюминесценция пайдо бўлишига олиб келади. Ушбу ўтишлар асосан магнит-диполь (M1) табиатга эга бўлиб, ташқи муҳитга нисбатан барқарор ва узоқ яшовчи (миллисекунд тартибда) нурланиш билан характерланади. Тm<sup>3+</sup> ионлари эса кремнийда яқин инфрақизил ( $\approx 1.47-1.8 \mu m$ ) диапазонда люминесценция намоён қилади. Бу нурланиш телекоммуникация тўлкин узунликларига яқин бўлгани учун амалий жиҳатдан муҳимдир. Тm<sup>3+</sup> билан легирланган кремнийда энергия узатилиши, мультифонон релаксация (бу заряд ташувчилар, электронлар ва тешиклар ҳамда кристалл панжара тебранишлари-фононлар ўртасида энергия узатиш ва сочилиш) ва кросс-релаксация (ядролараро спинлар боғлиқ релаксация жараёнлари муҳим роль ўйнайди).

Тb ва Тm ионларини киритиш кремнийда:

- локал энергия сатҳларининг пайдо бўлишига,
- радиацион ва безрадиацион рекомбинация каналларининг ўзгаришига,
- люминесценция самарадорлиги ва спектрал таркибининг ўзгаришига олиб келади.

Шунингдек, легирлаш даражаси ва технологик шароитларга боғлиқ ҳолда кремнийнинг электр ўтказувчанлиги ва ташувчиларнинг яшаш вақти қисқариши мумкин, бу эса нуқсонлар билан боғлиқ ҳолатлар таъсири билан изоҳланади.

Хулоса қилиб айтганда, тербий ва тулий ионлари билан легирланган монокристалл кремний оптоэлектрон ва фотон қурилмаларини яратиш учун истиқболли материал ҳисобланади. Ушбу ионларнинг таъсирини чуқур ўрганиш кремний асосида янги люминесцент ва интеграл фотон тузилмаларини ишлаб чиқиш имконини беради.

### Адабиётлар

1. Kaleli, B., Kulakci, M., & Turan, R. (2012). *Mechanisms of light emission from terbium ions (Tb<sup>3+</sup>) embedded in a Si-rich silicon oxide matrix*. Optical Materials, 34(11), 1935–1939. [ScienceDirect](#)
2. Lourenço, M. A., et al. (2010). *Photoluminescence study of thulium-doped silicon substrates for light emitting diodes*. Optical Materials, 32(12), 1597–1600. [ScienceDirect](#)
3. Kenyon, A. J. (2002). *Recent developments in rare-earth doped materials for optical applications* [Review]. Journal/Book Chapter. [projects.itn.pt](#)
4. Richards, O. B., et al. (2019). *Luminescence properties of Yb<sup>3+</sup>-Tb<sup>3+</sup> co-doped amorphous silicon oxycarbide thin films*. Optical Materials, 92, 16–21. [ScienceDirect](#)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ Si, ЛЕГИРОВАННОГО Ni

Р.М.Турманова

Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники  
при НУУЗ, Узбекистан, Ташкент  
e-mail: [raymashmaxmutovna@gmail.com](mailto:raymashmaxmutovna@gmail.com)

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. Исходя из этой актуальности, нами были проведены исследования по изучению морфологии примесных скоплений, которые формируются в объеме образцах. Результаты этих исследований подробно описаны в данном параграфе.

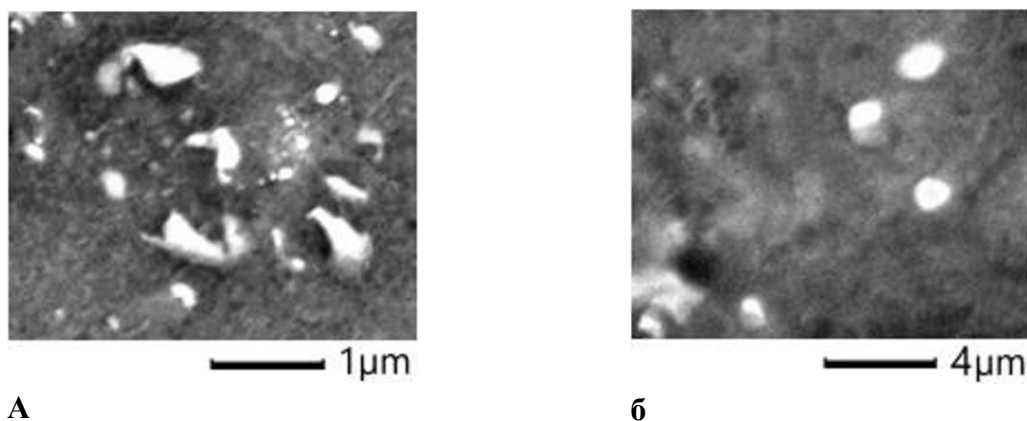
В качестве исходного образца для экспериментов использовали монокристаллический кремний марки КЭФ, выращенный по методу Чохральского, с удельным сопротивлением,  $\rho=0,3$  Ом·см. Изготовленные образцы имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 10x5x2 мм<sup>3</sup>, предварительно были очищены химическими методами. Диффузию элементов меди и никеля в кремний проводили при температуре  $T=1473$  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 ( $v_{охл}=200$  К/с) и медленного ( $v_{охл}=1$  К/с) охлаждения.

С помощью сканирующего электронного микроскопа марки JSM-IT200 изучались структурное строение, химический состав примесных скоплений атомов в образцах n-Si<Ni> и n-Si<Cu>.

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.

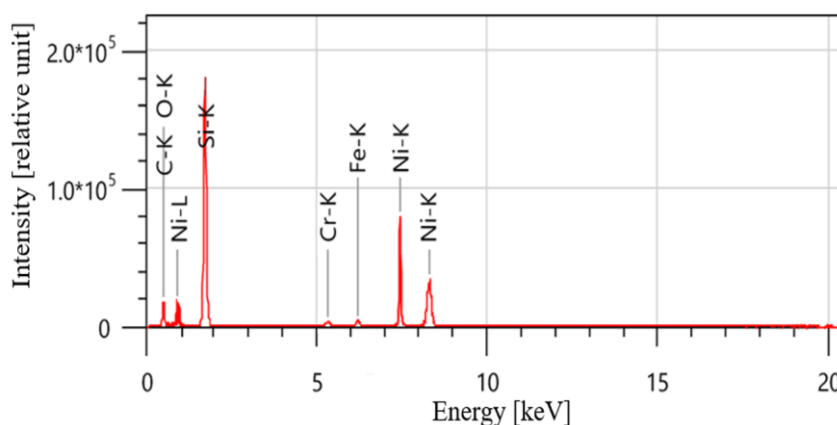
Как показали результаты экспериментальных исследований, в зависимости от скорости охлаждения после диффузионного отжига, в объеме образцов Si<Ni>

наблюдаются примесные скопления различных форм и размеров (рис.1.). 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)).



**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)**

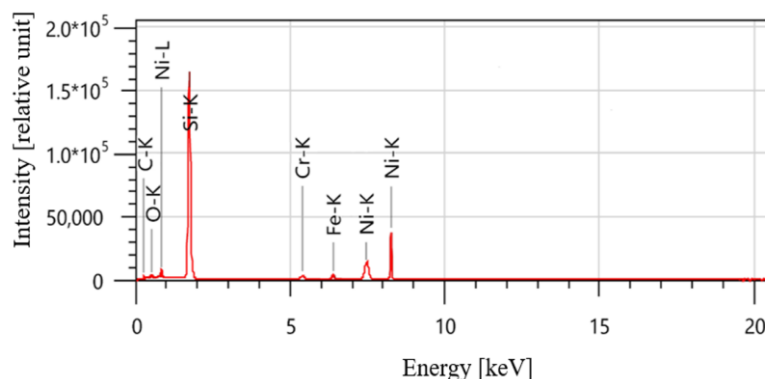
На рис. 2 представлены результаты анализа химического состава линзообразного примесного скопления размером  $\sim 700$  нм, образовавшегося в объеме быстро охлажденного образца n-Si<Ni> после диффузии. Как видно, процентное содержание атомов Ni в объеме скоплений составляет 23,23%, атомов Si - 75,42%, атомов железа - 0,26%, атомов хрома - 0,31%, атомов кислорода - 0,43%, атомов углерода - 0,35%. Как оказалось, по всему объему данного скопления эти показатели существенно не отличаются.



**Рис.2. Полный спектр элементного состава линзообразного микровключения размером  $\sim 700$  нм в быстро охлажденном образце n-Si<Ni>.**

Результаты анализов химического состава, проведенных на медленно охлажденных образцах Si<Ni>, позволили определить количественные параметры сферического примесного скопления, размер которого достигает  $\sim 2$  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). Анализ химического состава этого скопления показал, что процентное содержание атомов Ni в его центральной области составляет

52,58%, атомов Si - 45,38%, атомов железа - 0,42%, атомов хрома - 0,31%, атомов кислорода - 0,73%, атомов углерода - 0,58%.



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

В приповерхностной области микровключений процентное содержание атомов Ni составляет 24,44%, атомов кремния - 74,14%, атомов железа - 0,31%, атомов хрома - 0,24%, атомов кислорода - 0,55%, атомов углерода - 0,32%. Это свидетельствует о том, что количество атомов основных и технологических примесей в центральной части и в приповерхностной области данного микровключения имеет разные значения. Эти значения уменьшаются в направлении от центра к поверхности микровключения.

#### **Список использованной литературы**

1. Nakatsuka O. et al. Formation and crystalline structure of Ni silicides on Si (110) substrate // Japanese Journal of Applied Physics. 2014, Vol.53, No.5S2, pp. 05GA12.
2. Turgunov N.A., Berkinov E.Kh., Turmanova R.M. The effect of thermal annealing on the electrophysical properties of Samples n-Si<Ni,Cu> // East European Journal of Physics. 2023, 3, pp.287-290.
3. Turgunov N.A., Berkinov E.Kh., Turmanova R.M. Accumalations of impurity Ni atoms and their effect on the electrophysical properties of Si // E3S Web of Conferences. 2023, 402, 14018, pp.1-8.

## **ZOL-GEL METODI ORQALI Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> YUPQA PLYONKALARINI O'STIRISH**

**A.A. Meyliyeva\*, Sh.U. Yuldashev**

*Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy Universiteti (O'zMU) Fizika fakulteti*

*Yarimo'tkazgichlar va polimerlar fizikasi kafedrası*

*100174, Toshkent shahri, Olmazor tumani, Universitet ko'chasi, 4- uy*

[anorameyliyeveva5@gmail.com](mailto:anorameyliyeveva5@gmail.com)

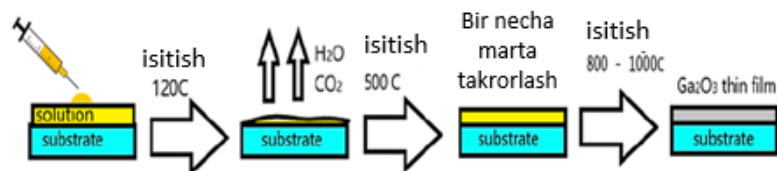
Keng taqiqlangan zonali (taqiqlangan zona kengligi > 2.2 eV) yarimo'tkazgich materiallari, masalan, SiC (3.25 eV), GaN (3.4 eV), ZnO (3.37 eV) ularning yuqori optik va elektr xususiyatlari sababli yorug'lik chiqarish, optik xotira, yuqori chastota va yuqori kuchlanishli elektron qurilmalarda keng qo'llaniladi [1–4]. Ultra-keng taqiqlangan zonali (taqiqlangan zona kengligi > 4 eV) yarimo'tkazgich materiallari, masalan, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4.2–5.0 eV), olmos (5.5 eV), va AlN (6.2



eV) katta taqiqlangan zona kengligi bilan yuqori fizik xususiyatlarga ega. Jumladan, yuqori buzilish elektr maydoni kuchi, mukammal dielektrik doimiysiga egaligi, barqaror yuqori haroratlarda ishlashi va past energiya yo'qotilishi [5-7].

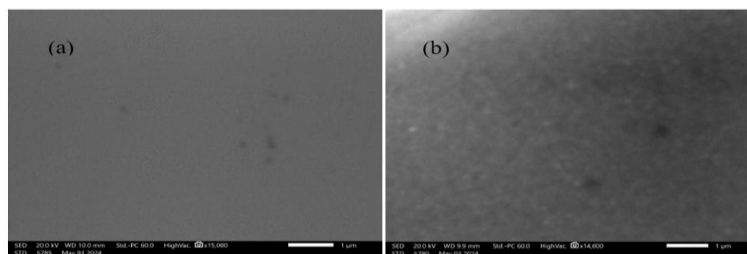
Bu ilmiy izlanishda  $Ga_2O_3$  yupqa qatlami kremney tagligida eng qulay usul, zol-gel qoplash usuli yordamida o'stirildi. Jarayon uch bosqichdan tashkil topdi.

Kremniy tagliklarni tayyorlash va tozalash jarayonida taglikni DI suvda 10 min (chang, yengil ifloslanishdan qutulish); Atsetonda 15 min (organik birikmalar va yog'larni olib tashlash); Hidroflorid kislota (HF) 10 % suvda 2-3 daqiqa (oksid qatlamni olib tashlash); DI suvda 15 min (HF qoldiqlarini olib tashlash); Kerakli aralashmani (Gel) tayyorlash jarayonida galiy nitrat dixidrat  $[Ga(NO_3)_3 \cdot 2H_2O]$  moddasining kerakli miqdori 2-metoksietanolga qo'shildi. Keyin, monoetanolamin ( $C_2H_7NO$ ) barqarorlashtiruvchi sifatida aralashmaga qo'shildi. Monoetanolaminning galiy nitrat gidratga nisbatan molyar nisbati 1:1 etib qo'shildi. Butun aralashma  $60^\circ C$  da 1 soat davomida magnit aralashtirgichda aralashtirildi va to'liq shaffof holatga keltirildi. Keyin, 36 soat davomida xona haroratida gel tayyor bo'lguncha qoldiriladi.



### 1-rasm. Spin qoplash va issiqlikda ishlov berish jarayonlari.

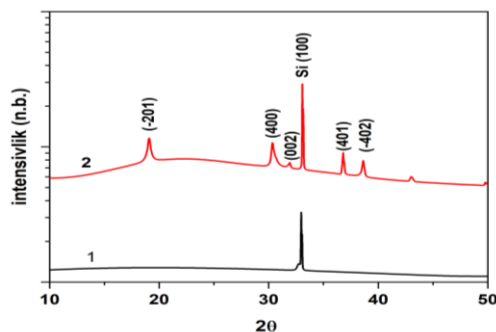
Qoplash jarayonida, tayyorlangan prekursor eritmasi taglik yuzasiga tomizilib, 3000 aylanish/min (rpm) tezlikda 30 soniya davomida spin-qoplash (spin-coating) jarayoni bajarildi. Bu bosqichda eritma taglik yuzasida bir xilda tarqalib, yupqa plyonka hosil qilishi ta'minlandi. Spin-qoplamadan so'ng, hosil bo'lgan plyonka  $120^\circ C$  haroratda issitkich (hot plate) ustida 10 daqiqa davomida quritilib, ortiqcha erituvchilar bug'lantirildi. Bu jarayonda suv va boshqa tez bug'lanuvchi organik birikmalar chiqib ketadi. Keyingi bosqichda plyonka mufel pechida  $500^\circ C$  haroratda 15 daqiqa davomida oldindan issiqlik bilan ishlov berildi. So'nggi bosqichda, tayyorlangan plyonkalar havo muhitida  $500^\circ C$  da va  $1000^\circ C$  gacha bo'lgan haroratlarda 120 daqiqa davomida pechda isitildi. Ushbu texnologik jarayonlar natijasida olingan  $Ga_2O_3$  asosidagi yupqa qatlamlarning umumiy qalinligi taxminan 80 nm dan 150 nm gacha bo'ldi, bu esa spin-qoplama sikllar soni va haroratga bog'liq bo'lganligini ko'rsatadi. 2-rasmda keltirilgan elektron mikroskopi (SEM) tasvirlari galliy oksidi yupqa plyonkalarining yuzasida aniq tuzilish farqlarini ko'rsatadi.



**2- rasm. Galiy oksidi yupqa plyonkalarining SEM tasvirlari: a)  $500^\circ C$  va b)  $1000^\circ C$  haroratda 120 daqiqa isitilgandan so'ng.**

$500^\circ C$  da issitilgan (2-rasmda chap tomonda) namunada hech qanday nanokristallar aniqlanmagan. Biroq, o'ng tomondagi rasmda butunlay boshqacha manzara ko'rinadi.  $1000^\circ C$

haroratda 120 daqiqa davomida isitilganidan so'ng,  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  nanokristallari paydo bo'lgani kuzatildi. Ularning o'lchami taxminan 30 nm ga teng.



3- rasm. Olingan namunalarning XRD o'lchashlar natijasi

XRD o'lchash natijalari (3-rasm)dan ko'rinib turibdiki, o'sish jarayonidagi 500 °C temperaturada issitilganda faqatgina Si (100) taglikiga tegishli bo'lgan intensivlik qayt qilindi. Biroq, 1000 °C da 120 daqiqa isitilgandan keyin plyonka turli xil XRD piklarini ko'rsatadi, ular  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  fazasiga tegishli bo'lib rasmda mos hkl qiymatlari bilan ajratilgan.

Xulosa qilib aytganda, Zol-gel texnologiyasi yordamida kremniy tagliklarda o'stirilgan  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  yupqa plyonkalarining tuzilishi, fazaviy holati va morfologiyasi ishlov berish haroratiga bevosita bog'liqligi aniqlandi. Spin-qoplash orqali olingan dastlabki plyonkalar past haroratlarda amorf holatda bo'lib, 500 °C da tayyorlangan namunalar sirtida nanokristallar shakllanmagani SEM tasvirlari orqali tasdiqlandi. Biroq, 1000 °C da 120 daqiqa davomida issiqlik bilan ishlov berilganda  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  ning  $\beta$ -fazasi hosil bo'lib, taxminan 30 nm o'lchamli nanokristallar paydo bo'lgani kuzatildi. XRD natijalari ham aynan ushbu yuqori haroratda kristall  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  fazasining shakllanishini tasdiqladi. Umuman olganda, o'tkazilgan tadqiqotlar sol-gel usuli orqali olingan  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  yupqa plyonkalarining kristallanish jarayoni va sirt morfologiyasi haroratga sezgir ekanini ko'rsatib, optimal issiqlik ishlovi yuqori sifatli,  $\beta$ -fazali galliy oksidi plyonkalarini olish uchun muhim omil ekanini namoyon qildi.

#### FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. N. Stath, V. Härle, J. Wagner. The status and future development of innovative optoelectronic devices based on III-nitrides on SiC and on III-antimonides, Materials Science and Engineering: B, 2001, vol. 80, no. 1–3, pp. 224–231.
2. K.A. Denault, M. Cantore, S. Nakamura, S.P. DenBaars, R. Seshadri. Efficient and stable laser-driven white light-ing, AIP Advances, 2013, vol. 3, no. 7, art. no. 072107.
3. J. Millán, P. Godignon, X. Perpiñà, A. Pérez-Tomás, J. Rebollo. A survey of wide bandgap power semiconductor devices, IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, vol. 29, no. 5, pp. 2155–2163.
4. Y. Li, X. Xiu, Z. Xiong, X. Hua, Z. Xie, P. Chen, B. Liu, T. Tao, R. Zhang, Y. Zheng, Single-crystal GaN layer converted from  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  films and its application for free-standing GaN, CrystEngComm, 2019, vol. 21, no. 8, pp. 1224–1230.
5. S. Fujita, Wide-bandgap semiconductor materials: For their full bloom, Japanese Journal of Applied Physics, 2015, vol. 54, no. 3, art. no. 030101.
6. B.J. Baliga, Fundamentals of power semiconductor devices, Springer New York, NY, 2008.
7. H. Shiomi, Y. Nishibayashi, N. Fujimori, Field-effect transistors using boron-doped diamond epitaxial films, Japanese Journal of Applied Physics, 1989, vol. 28, no. 12A, pp. L2153–L2154.

## SPEKTROSKOPIK USUL BILAN ETILBENZOL MOLEKULASINI TADQIQ QILISH

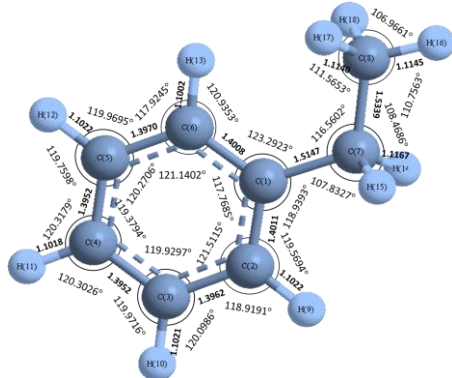
Sh. Allaquliyeva<sup>1</sup>, Sh. Otajonov<sup>2</sup>, F. Mannonova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Toshkent davlat transport universiteti, Toshkent shahar Mirobod tumani Temiryo'lichilar  
ko'chasi 1- uy, 100000.

<sup>2</sup>O'zbekiston Milliy universiteti Fizika fakulteti Fotonika kafedrası, Toshkent shahar  
Olmazor tumani Universitet ko'chasi 4- uy, 100174.  
e-mail: [shahloallquliyeva@gmail.com](mailto:shahloallquliyeva@gmail.com)

Hozirgi kunda quyosh energetikasi uchun yangi samarali yarimo'tkazgichli materiallarni yaratishda molekulyar darajadagi tebranma jarayonlarni chuqur o'rganish muhim ahamiyat kasb etmoqda. Ushbu tadqiqot ishining maqsadi etilbenzol ( $C_8H_{10}$ ) molekulasida tarkibidagi atomlarning tebranma harakati bilan bog'liq bo'lgan optik spektrlarning namoyon bo'lish qonuniyatlarini yorug'likning kombinatsion sochilish (YKS) spektrlari yordamida tadqiq qilishdan iborat. Sababi, etilbenzol aromatik uglevodorodlar tarkibiga kiruvchi molekula bo'lib, uning tebranma harakat spektrlari molekulaning mikroskopik parametrlariga bevosita ta'sir qiladi. Bu esa yarimo'tkazgich materiallar uchun organik komponent tanlashda juda muhim. Etilbenzol – ko'plab organik elektronika materiallarining tarkibida uchraydi yoki analog material sifatida ishlatiladi. Molekulaning tebranma harakati zaryad tashuvchilarning harakatchanligiga, valent va deformatsion tebranma chastotalari yarimo'tkazgichlardagi rekombinatsiya jarayonlarini tushuntirishda model sifatida qo'llaniladi.

Ko'p atomli molekulalardagi tebranma spektrlarning namoyon bo'lish qonuniyatini tahlil qilish murakkab hisoblanadi. Chunki, atomlar bir vaqtning o'zida bir nechta tebranishlarda ishtirok etadi. Molekulaning ichidagi atomlarning harakati murakkab jarayon hisoblanib, nohiziqli molekula N ta atomdan tashkil topgan bo'lsa, tebranma erkinlik darajalari soni  $3N-6$  ga teng bo'ladi. Etilbenzol molekulasida 18 ta atomdan tashkil topgan bo'lib, u holda  $(3 \cdot 18 - 6 = 48)$  48 ta tebranma spektr hosil bo'lishi kerak. Lekin, tajribada olingan etilbenzol molekulasining tebranma harakatidan hosil bo'lgan YKS spektrida intensivligi nisbatan kattaroq bo'lgan 12 ta spektr qayd etildi. Sababi, biz tajribani YKS spektrining stoks komponentasi qismini olganmiz, antistoks intensivligi stoks intensivligidan kichik bo'lganligi uchun. Yorug'likning muhitlardan kombinatsion sochilish spektrining intensivligi juda kichik. Molekula tarkibidagi atomlarning tebranma harakatidan sochilish spektrini kuzatilishini e'tiborga olsak, tebranish amplitudasining kattaligi sezilarsiz darajada tebranish bo'lganligi uchun sochilish spektrining intensivligi nihoyatda kichik bo'ladi. Shuning uchun ham tajribada YKS spektrining stoks qismi olindi.



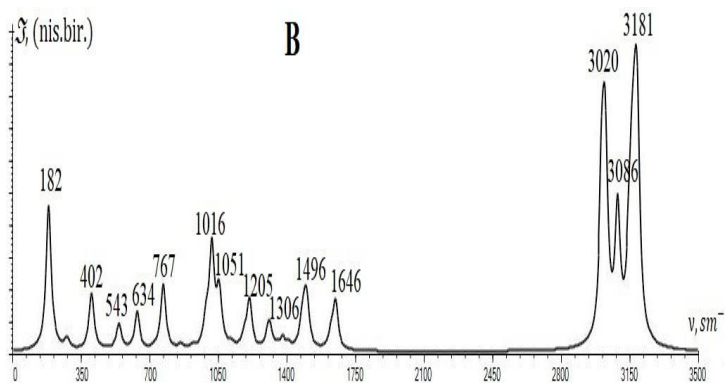
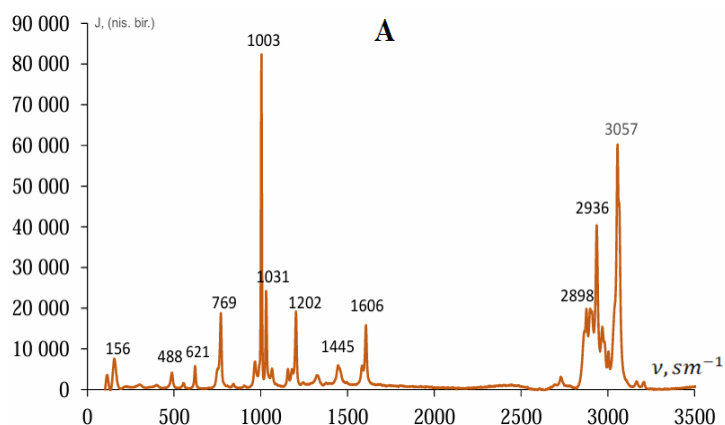
1-rasm. Etilbenzol molekulasida uchun  
kvant-kimyoviy hisoblashlar natijasida  
olingan elektron strukturasi

Nazariy yo'l bilan molekullarning elektron tuzilishini tasvirlashda, YKS nazariy hisoblangan spektrini olishda kvant-kimyoviy hisoblashlar olib borilib, molekulaning fazoviy strukturasi HF/6-311G\*\* Hartri-Fok modeli yordamida kompyuterda modellashtirildi (1-rasm) va atomlarning bog'lanish uzunligi va ular orasidagi burchaklar aniqlandi.

2-rasmda etilbenzol molekulasini uchun chastotaning 0-3500  $\text{sm}^{-1}$  diapozondagi YKS spektrining umumiy ko'rinishi berilgan. 2-rasmda tajribadan olingan YKS spektridagi masalan, 769  $\text{sm}^{-1}$ , 1003  $\text{sm}^{-1}$ , 3057  $\text{sm}^{-1}$  chastotali spektral chiziqlarga kvant-kimyoviy usul bilan nazariy hisoblangan YKS spektrida 767, 1016, 3181  $\text{sm}^{-1}$  chastotali spektral chiziqlar mos tushar ekan. Demak, etilbenzol molekulasining tajribadan olingan YKS spektrlari soni kvant-kimyoviy usul bilan hisoblangan YKS spektrlari soni tajriba xatoligi doirasida deyarli bir xil natijalar kuzatilgan. Bu esa YKS spektrining chastota bo'yicha taqsimotini tajriba o'tkazishdan oldin aniqlash imkoniyatini beradi.

YKS spektrini C-H tebranishi molekullararo H-bog'lanish tebranishlari bilan bog'liq. Ko'p atomli murakkab molekullarning potensial chuqurligini aniqlash uchun kvant-kimyoviy hisoblashlar yordamida takomillashtirilgan yarim emperik usuldan foydalanildi [1]. Kvant-

kimyoviy hisoblashlarga asosan etilbenzol molekulasini uchun vodorod atomlari o'rtasidagi o'zaro ta'sirlashuv energiyasi kattaligi quydagi ko'rinishga ega:



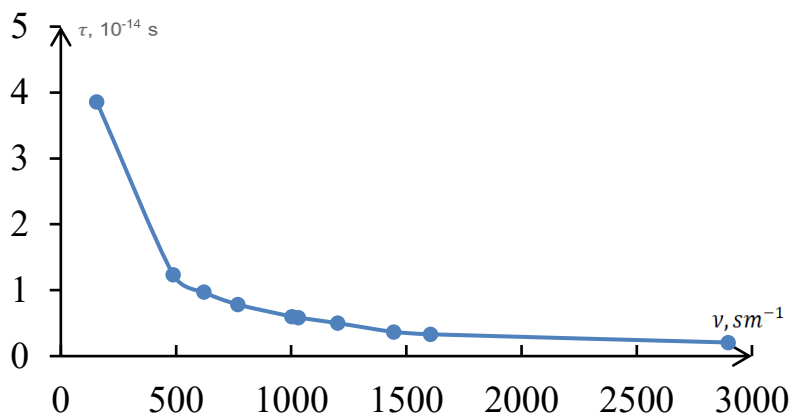
**2-rasm. Etilbenzol molekulasini uchun: A-tajribadan olingan YKS spektri, B- kvant-kimyoviy usul bilan hisoblangan YKS spektri**

$$U = 950,5 \exp(-1,98r) - 1995 \exp(-3,7r)$$

bu yerda r-uglerod-vodorod atomlari orasidagi angstremlarda ifodalangan masofani xarakterlab, 1-rasmdan olindi. Ushbu energiya H-bog'lanishning energiyasiga proporsional bo'lib, uning qiymatini bilgan holda, H-bog'lanishning yashash vaqti  $\tau = \tau_0 \times \exp(U/kT)$  tenglamadan nazariy hisoblandi.  $\tau_0 = \frac{1}{2\pi\nu c}$  ga teng bo'lib, molekulaning tebranish chastotasini xarakterlovchi

vaqt,  $\nu$  – molekulaning tebranish chastotasi (2A-rasmdagi YKS spektriga tegishli intensivlikning maksimal qiymatlariga to'g'ri kelgan chastota).

Etilbenzol molekulasiga tegishli turli xil YKS spektrining chastotalari uchun C-H bog'lanishning yashash vaqtlari 3-rasmda keltirilgan.



**3-rasm. Etilbenzol molekulasi uchun C-H bog'lanishning yashash vaqtini tebranish chastotasiga bog'liqligi**

3-rasmda qayd etilgan qonuniyatni tahlili shuni ko'rsatmoqdaki, tajribada kuzatilgan YKS spektri intensivligining maksimal qiymatlariga to'g'ri kelgan molekulaning tebranish chastotasini oshib borishi bilan etilbenzol molekulasining C-H bog'lanishi bilan bog'liq bo'ladigan tebranishlarning yashash vaqti kamayib borishi kuzatildi. Jumladan,  $3.8 \times 10^{-14}$  s dan  $0.2 \times 10^{-14}$  s gacha kamayib borgan. Xulosa o'rinda aytish lozimki, kvant-kimyoviy hisoblashlar yordamida aniqlanadigan molekulyar parametrlarning qiymatlarini modellashtirish orqali, ishlab-chiqarish uchun zarur bo'lgan moddalarni sintez qilishga hamda potensial chuqurlik balandligining nazariy hisoblangan qiymatlari termodinamik hisoblashlarda foydalanishga tavsiyalar berish imkonini beradi. Olingan natijalar yangi fotoaktiv materiallarni ishlab chiqishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi.

### **Adabiyotlar**

1. Aston J., Isserow S., Szasz G., Kennedy R. Empirical correlation and method of calculation of barriers hindering internal rotation // Journal of Chemical Physics, 1944, Vol.12, p.336-344.



## 2 – SHO'BA. QUYOSH ENERGETIKASI UCHUN YANGI YARIMO'TKAZGICHLI TUZILMALARNI ISHLAB CHIQISH VA ULARNI TADQIQ QILISH

### ПРИМЕНЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ КРИСТАЛЛИТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭФФЕКТИВНЫХ КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Э.З. Имамов<sup>1</sup>, Х.Н. Каримов<sup>1</sup>, А.Э. Имамов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский университет информационных технологий - ТУИТ

<sup>2</sup>Академия МВД Республики Узбекистан, E-mail: [azizimamov@mail.ru](mailto:azizimamov@mail.ru)

Альтернативная энергетика для Узбекистана, базирующая на ВИЭ, это солнечная энергетика. Суммарную установленную мощность всех электростанций мира (порядка  $3 \cdot 10^{12}$  Вт) можно получить с помощью СЭС с площади  $640000 \text{ км}^2$ , что составляет всего 0,165% площади всей Земли ( $1,29 \cdot 10^7 \text{ км}^2$ ).

Преобразование этой энергии осуществляется фотоэлектрическим методом и созданием стабильных в эксплуатации, дешевых и высокоэффективных солнечных элементов (СЭ).

Перечислим основные преимущества солнечной энергетики:

- прямое преобразование солнечной энергии в электрическую;
- неограниченность запаса солнечной энергии по сравнению с текущими потребностями человечества ( $10^5$  раз);
- возможность децентрализованного производства энергии (через сокращение протяженности линий электропередач);
- экологическая безопасность;
- возможность интеграции в строения (стены, крыши);
- высокая надежность;
- не имеют движущихся частей, что упрощает обслуживание и увеличивает срок службы;
- не требуют высокой квалификации обслуживающего персонала;
- пригодны для создания установок практически любой мощности.

Альтернативная энергетика для Узбекистана, базирующая на ВИЭ, это солнечная энергетика. На м<sup>2</sup>, каждую секунду Земля получает от Солнца 1353 джоулей энергии (полная мощность интегрального потока солнечного излучения составляет порядка  $2 \cdot 10^{17}$  Вт).

Проблема поиска наиболее эффективных материалов для солнечных энергетических устройств является актуальной проблемой современности. Сравните цифры по населению в мире:

1900 год – **1,8 млрд.**, 1957г. - 3,3 млрд., 1982г. – 4,0 млрд., 1995г.– 5,5 млрд., 2001г. – 6,0 млрд., 2008 г. – 7,0 млрд., 2016 г. – 8,0 млрд., на конец октября 2025 года - **8,8 миллиардов** человек. (В последнее время ежегодный прирост населения в мире составляло порядка 350÷400 миллионов человек!). Из цифр видно, что за **125 лет население Земли увеличилось почти в 5 раз!**

А как растёт потребление энергии в мире? В прошлом столетие (с 1900 по 2000 год) потребление энергии (особенно электроэнергии) увеличилось почти 50 раз, то есть многократно (9-10 раз) опережает рост населения.

А в 21-ом веке – потреблении энергии по сравнению с 1900 годом увеличилась почти 80 раз! (то есть уровень потребления энергии в мире теперь не 9-10, а 16 раз превышает рост численности населения).

Раньше потребляли, в основном, углеводородную энергию (уголь, газ, нефть), а теперь ориентир на них хотя и сохранился почти, но в наше время появилась осторожность с их потреблением, поскольку запасы углеводородов на Земле постепенно

исчерпываются. Они для массового потребления скоро практически закончатся (нефть через 20-30 лет; газ через 70-90; уголь через 150-300). Кроме того, от массового потребления углеводородов портится сильно экология Земли. Огромные площади приходят в негодность для трудовой и производственной деятельности – это тоже представляет значительную опасность, внося дискомфорт в жизнь человечества.

Надо думать о будущем человечества, о жизни наших детей, внуков и правнуков.

Поэтому в мире не прекращается поиск других эффективных видов энергии, ведутся интенсивные научные исследования новых, альтернативных к углеводородам, источников энергии.

В инновационном отношении это ВИЭ – возобновляемые источники энергии, к которым относится солнечная энергия (в особенности в Узбекистане).

Как источник - солнечная энергия, безусловно, хороша – она неисчерпаема, бесплатна, нескончаема.

Но в техническом плане обладает очень непростым свойством трансформироваться в электричество – получать электричество из неё в больших масштабах обходится весьма дорого (с помощью кремниевых солнечных панелей) .

Исследования по совершенствованию солнечной энергетики охватывают широкий спектр его проблем, таких как:

- подготовка кадров (ДЕПСЕУз);
- производства (контракты по строительству и строительство СЭС);
- эксплуатации (пуск и вклад СЭС в энергосистему страны);
- разработки новейших устройств и объектов постоянного тока (переориентация продукции многих предприятий на потребности солнечной энергетики).

При этом аппарат научных исследований по проблемам солнечной энергетики коренным образом начал повсеместно применять новейшие нано-технологические подходы и методики.

В последнее время о проблемах солнечной энергетики стали интересоваться и ВО учреждениях, которые и раньше занимались решением научных исследований энергетических проблем.

В научном плане ведутся исследования, которые смогли бы значительно снизить стоимостные показатели солнечной энергетики. Одним из подобных направлений является максимальное удешевление эксплуатации солнечных панелей на кремниевой основе.

Для этого мы применили нано-технологический подход в сочетании с применением гораздо более дешевого некристаллического бесструктурного технического Si (из-за наличия достаточно большой концентрации в них LDES).

Именно, богатое содержание LDES в техническом Si способствует возникновению многих нано-масштабных электрических контактных полей, что оказалось важнейшим и необходимым условием для формирования нано-гетеро-перехода. Исследования с ACM

различных неоднородностей и дефектных состояний в пористом техническом кремнии выявили множество ( $10^{23} \div 10^{24} \text{ м}^{-3}$ ) случайных локальных c-Si с линейными размерами от 5 до 20 нм. Малые размеры c-Si до нано-частиц приводит к изменению его оптических, электрических и электронных свойств

Кроме того, подобные качества некристаллического Si проявляются в нано размерном состоянии только в сочетании с халькогенидами свинца.

Контактное поле формируется за счет самоорганизующегося роста «островков» кристаллических нано-включений c-PbX там, где он сам естественным образом находит кремниевый нано-кристаллит

(c-Si с практически идентичной кристаллической структурой).

В этом и заключается особенность самоорганизующегося роста! с последующим образованием нано-гетеро-перехода (c-Si::c-PbX).

Нано-гетеро-структурные компоненты солнечного элемента позволяют:

- ускорить процессы генерации и рекомбинации заряда в многочисленных нано-размерных приповерхностных контактных полях солнечного элемента;
- существенно замедлить процессы деградации в техническом Si ;
- оптимизировать поглощение солнечного света в широком спектральном диапазоне;
- повышать добротность;
- увеличивать срок службы солнечного элемента, так как гарантированный срок его службы определяется скоростью деградационных явлений на поверхности технического Si, которая существенно ниже, чем у кристаллического Si.

- Это и обуславливает их длительный срок службы;
- использование технического Si позволяет снизить стоимость и повысить до 30÷35% эффективность солнечных панелей

Нано-технологии применение технического Si в качестве подложки солнечных элементов является перспективным методом повышения эффективности кремниевых СЭ.

Именно нанотехнологический подход позволяет надеяться на успешные результаты в значительном повышении эффективности кремниевых солнечных панелей.

Свойства контакта и контактного поля определяются:

- работой выхода контактирующих материалов,
- электроёмкостью инородного нано-включения PbX, его формой, размером,
- однородностью полупроводниковой подложки

(гомогенизацией Si, когда дополнительная технологическая обработка, обеспечивает равномерное распределение всех дефектов:

как мелких остаточных доноров, уплотняющих его состав, уменьшающих пористость, так и уменьшающих степень, как случайности, так и неоднородности в распределении дефектов по всему объёму Si).

Узбекистан вместе с другими странами должен быть наиболее заинтересован в разработке и применении как у себя, так и в других, прежде всего соседних, странах экологически безопасных и эффективных источников Солнечной электрической энергии.

### **Заключение**

Варьируя геометрическими параметрами и отдельными структурными свойствами используемых материалов СЭ, можно управлять и улучшать их электрофизические свойства реагирования на внешние воздействия.

Подобные положительные преобразующие электрофизические свойства характерны для многих полупроводников в нано-размерном состоянии, если энергетический спектр их электронов окажется подобным спектру его собственного нано-кристалла.

Рассмотрена актуальная проблема применимости нано-структурированных кристаллических полупроводников при создании устройств солнечной энергетики.

### Литература

[1] G. Springholz и G. Bauer // Молекулярно-лучевая эпитаксия гетеро- и наноструктур IV–VI / Phys. stat. sol. (b) 244, № 8, 2752–2767 (2007). DOI:10.1002/pssb.200675616

[2] Джанан Саддама, Мунир Х. Джадуал,\* // Разработка и изготовление многопереходной гибридной гетероструктуры на основе ZnO/CuO/PS/Si для современных оптоэлектронных приложений // Журнал исследований солнечной энергии, том 10, номер 1, зима (2025), с. 2161–2175. DOI:10.22059/jser.2025.398689.1599

[3] Хассан, Х. Дж., Джабер, А. А. и Тамер, А. (2025). Синтез наностержней ZnO гидротермальными методами: исследование оптических свойств и характеристик обнаружения газа. Журнал наноструктур, 15(3), 820–830. <https://doi.org/10.22052/JNS.2025.03.001>.

[4] Хоанг, М. Т., Нгуен, В. Х., Ле, Т. К., Фам, К. Н. и Тран, Д. Л. (2025). Пористый кремниевый микрорезонатор, декорированный наночастицами серебра, как высокопроизводительная подложка SERS для сверхчувствительного обнаружения следовых количеств молекул. Наноматериалы, 15, статья 1007. <https://doi.org/10.3390/nano15131007>

[5] Абдулла, С., Джадуаа, М. и Абд, А. Н. (2021). Получение гетероперехода наночастицы оксида висмута/PSi/Si простым химическим методом для применения в солнечных батареях. В Journal of Physics: Conference Series (т. 1853, № 1, с. 012045). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1853/1/012045>

[6] Булутай, К. и Оссичини, С. / Электронные и оптические свойства кремниевых нанокристаллов. - СТАМПА. -(2010), с. 5-42. [DOI: 10.1002/9783527629954.ch2]

[7] Чэнь, К., Чжан, И., Ван, С., Лю, Х. и Ли, М. (2025). Фотокатализ для устойчивой энергетики и защиты окружающей среды в строительстве: обзор по технологии поверхностной инженерии и новым методам синтеза. Журнал экологической химической инженерии, 13(5), статья 117529. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09941-3>

[8] Станку В., Пентиа Э., Голденблум А. и др. // Румынский журнал информационной науки и технологий. 2007. Т. 10. № 1. С. 53–66.

[9] Р.Д. Шаллер, В.И. Климов / Phys. Rev. Lett. 92, 186601 (2004); Шаллер Р.Д. Петрушка М.А. Климов В.И. // Appl. Phys. Lett. 87, 253102 (2005); В.Климов // Журнал физики и химии. В2006,110, 16827–16845; Р.Д. Шаллер, М. Сикора, Дж.М. Петрыга, В.И. Климов // Nano Lett., Т. 6, № 3, 2006, 424–429.

[10] Э. З. Имамов, Т. А. Джалалов, Р. А. Муминов // Электрофизические свойства новой контактной структуры «нанообъект—полупроводник» / Техническая физика, 2015, т. Т. 60, № 5, стр. 740-745 © Pleiades Publishing, Лид., 2015/ ISSN 1063-7842

[11] Т.А.Джалалов, Лиза М.Портер, Э.З.Имамов, Р.А.Муминов //Теория электростатического поля в наноразмерных p-n переходах //УзЖФ - Узбекский физический журнал //Том 17 (№3), 2015 г. С. 131-139

[12] Э.З.Имамов, Т.А.Джалалов, Р.А.Муминов, Х.Х.Рахимов //Теоретическая модель новой контактной структуры «нанообъект-полупроводник» //Ж. «Вычислительная нанотехнология». Декабрь 2015, №4, стр.58-63

[13] М.А. Аскарлов, Э.З. Имамов, Х.Н. Каримов, Исследование электрофизических процессов в кремниевом солнечном элементе с большим количеством поверхностных наногетеропереходов. Журнал наноэлектронной физики, 17, № 1, 01007 (2025). [doi.org/10.21272/jnep.17\(1\).01007](https://doi.org/10.21272/jnep.17(1).01007)

[14] М.А. Аскарлов, Э.З. Имамов, Х.Н. Каримов, Физика высокоэффективного кремниевого солнечного элемента с нановключениями халькогенидов свинца. Журнал наноэлектронной физики, 16, № 1, 01030 (2024). doi.org/10.21272/jnep.16(1).01030

[15] Р.А. Муминов, Э.З. Имамов, Р.Х. Рахимов, М.А. Аскарлов // Факторы эффективной генерации электроэнергии в солнечном элементе с наногетеропереходами. Журнал вычислительной нанотехнологии 10. № 1. 119–127 (2023). DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-1-119-127

[16] Аскарлов М.А., Имамов Э.З., Муминов Р.А. Электрофизические свойства солнечного элемента с нетрадиционными контактными структурами. Журнал вычислительной нанотехнологии 10. № 4. 110–121 (2023). doi.org/10.33693/2313-223X-2023-10-4-110-121

[17] E.Z. Imamov, R.A. Muminov, M.A. Askarov, , Kh.N. Karimov // / Determination of Contact Field Parameters of a Solar Cell with Multiple Nanoheterojunctions/ Journal of nano- and electronic physics журнал нано- та електронної фізики Vol. 17 No 5, 05017(5pp) (2025) Том 17 № 5, 05017(5cc) (2025)

## РАМАНОВСКИЕ СПЕКТРЫ КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ПАЛЛАДИЕМ И ОБЛУЧЕННОГО ГАММА-ЛУЧАМИ

**Ш.Б. Утамурадова, Д.А. Рахманов**

*Научно-исследовательский институт физики полупроводников и микроэлектроники  
при НУУз, г. Ташкент, 100057 Узбекистан*

*\*e-mail: dilmurod-1991@bk.ru*

Одним из эффективных подходов к модификации свойств кремния является легирование его переходными металлами, такими как палладий (Pd). Палладий способен образовывать устойчивые комплексы с дефектами решётки (вакансиями, межузельными атомами), выполняя функцию геттерирования и снижая концентрацию радиационных повреждений. Кроме того, внедрение Pd может влиять на электронные и оптические характеристики материала, изменяя плотность состояний и параметры рассеяния носителей заряда. Однако избыточное количество Pd или высокая температура диффузии могут вызывать образование фаз PdSi и локальные нарушения структуры, что требует детального экспериментального анализа [1].

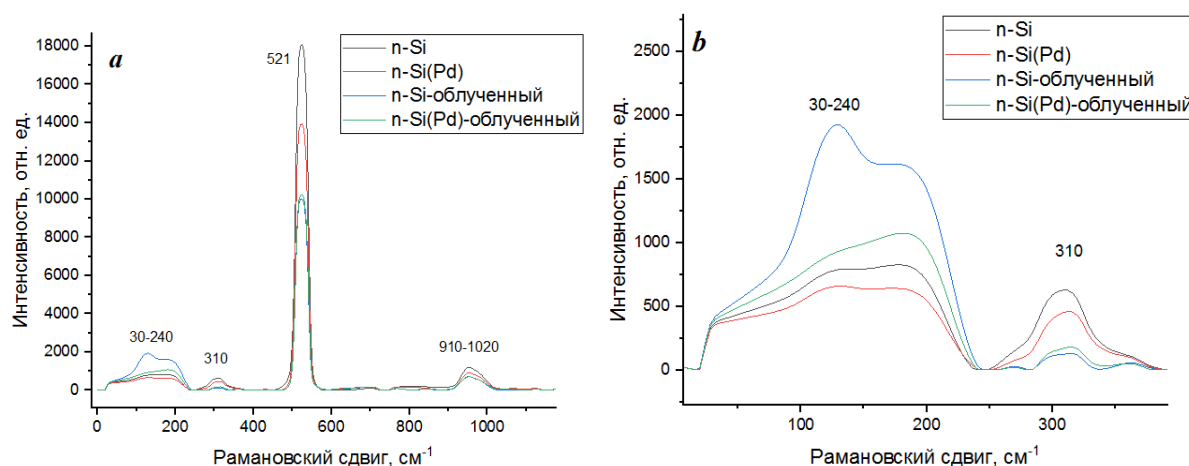
Для изучения структурных изменений, вызванных легированием и радиационным воздействием, одним из наиболее информативных и неразрушающих методов является комбинационное рассеяние света (КРС), или Рамановская спектроскопия. Этот метод позволяет регистрировать фононные моды кристаллической решётки и чувствителен к изменению её упорядоченности, дефектности и внутренним напряжениям. Анализ сдвига, уширения и асимметрии Raman-пиков даёт возможность выявлять микроскопические процессы, происходящие в материале под действием легирования и облучения [2].



В качестве объекта исследования использовался кремний n-типа проводимости (n-Si) с удельным сопротивлением 40 Ом•см, полученный методом Чохральского. Легирование кремния палладием осуществлялось диффузионным методом путем нанесения атомов палладия на поверхность кремния в откачанных кварцевых ампулах при температурах 1200 °С в течение 3 часов. Исходные (n-Si) и легированные образцы (n-Si<Pd>) облучались гамма-квантами с энергией 1,25 МэВ дозой  $10^7$  рад с использованием  $^{60}\text{Co}$  источника в гамма-установке Института ядерной физики АН РУз.

Исследования образцов проводились методом комбинационного рассеяния света (КРС) с использованием современного Raman-спектрометра «Ocean Optics» с возбуждающим лазером на длине волны 785 нм. Измерения выполнялись в диапазоне 0–2000  $\text{см}^{-1}$ , что позволило зарегистрировать как основные фононные моды кристаллического кремния, так и низкочастотные колебания, связанные с дефектами и фазами палладия в решётке.

На рисунке 1 представлены Рамановские спектры исходного кремния (n-Si), легированных образцов (n-Si<Pd>) и образцов, подвергнутых облучению. В спектре исходного кремния наблюдаются характерные пики при 310 и 521  $\text{см}^{-1}$ , а также широкий диапазон полос в области 910–1020  $\text{см}^{-1}$ , соответствующие колебаниям, типичным для кубической структуры кремния [3]. Raman-спектры всех исследованных образцов демонстрируют наличие основного пика в области  $\sim 521 \text{ см}^{-1}$ , соответствующего поперечной оптической (ТО) моде кристаллического кремния. Сохранение положения этого пика во всех случаях указывает на то, что даже после диффузии палладия и  $\gamma$ -облучения кристаллическая структура кремния в целом остаётся стабильной и не претерпевает полного разрушения. Однако изменения интенсивности, ширины пика и низкочастотных компонент свидетельствуют о существенных процессах, происходящих в решётке на микроуровне [4].



**Рис.1. Рамановские спектры кремния, легированного палладием и облученного гамма-квантами**

При повышении температуры диффузии до 1200 °С наблюдается увеличение ширины пика (FWHM) и небольшое смещение его положения в сторону меньших волновых чисел. Это указывает на появление внутренних механических напряжений и частичное нарушение периодичности решётки. При таких температурах становится возможным образование фаз

палладиевых силицидов ( $\text{PdSi}$ ,  $\text{Pd}_2\text{Si}$ ), что подтверждается появлением слабых дополнительных полос в области  $30\text{--}240\text{ см}^{-1}$  (рис.1б.). Наличие этих фаз приводит к локальному искажению кристаллической решётки кремния, повышению концентрации дефектов и изменению распределения носителей заряда, что в совокупности отражается на форме Раман-пика.

Известно, что  $\gamma$ -кванты обладают высокой энергией и при взаимодействии с кристаллом кремния создают первичные радиационные дефекты — вакансии, межузельные атомы, а также их комплексы (например,  $\text{V-Si}_i$ ,  $\text{V}_2$ , и т.д.) [5]. Образование таких дефектов приводит к нарушению дальнего порядка и появлению локализованных вибрационных мод (LVM), что проявляется в усилении низкочастотной составляющей Раман-спектра. В области  $30\text{--}240\text{ см}^{-1}$  возникают широкие и несимметричные полосы, характерные для дефектных и частично аморфизированных участков кристалла. Увеличение FWHM основного пика до  $5.5\text{ см}^{-1}$  также подтверждает рост степени беспорядка [6].

Особый интерес представляет анализ образцов, в которых палладий был внедрён до  $\gamma$ -облучения. Наблюдается заметное снижение интенсивности дефектных полос в области  $30\text{--}240\text{ см}^{-1}$  по сравнению с чистым облучённым кремнием. Это означает, что палладий оказывает стабилизирующее воздействие на структуру. Атомы Pd способны «захватывать» вакансии и межузельные атомы, образуя устойчивые комплексы типа  $\text{Pd-V}$  или  $\text{Pd-Si}_i$ . Такие комплексы обладают меньшей подвижностью и препятствуют развитию дефектных кластеров и аморфных областей [7].

Таким образом, Pd не только участвует в легировании, но и способствует снижению радиационной чувствительности кремния, что важно для применения материала в радиационно-стойких полупроводниковых устройствах.

### **Литература**

1. Sh.B. Utamuradova, D.A. Rakhmanov, A.S. Doroshkevich, I.G. Genov, P.L. Tuan, and A. Kirillov. Eurasian physical technical journal, 20(3), P.35-42 (2023).
2. A.B. Muchnikov, V. P. Markevich, Palladium-related defects in silicon: electrical and optical properties. // Semiconductors, 2009. — Vol. 43, No. 8. — P. 1020–1027.
3. Sh.B. Utamuradova, D.A. Rakhmanov, P.L.Tuan, A.S. Doroshkevich, R.Sh. Isayev, A.S. Abiyev. Advanced Physical Research, 6(2). Pp.83-89.(2024).
4. В. П. Киселёв, Раман-спектроскопия как метод исследования дефектов в кремнии. // ФТП (Физика и техника полупроводников), 2015. — Т. 49, №9. — С. 1253–1260.
5. В. Н. Шелудько, Радиационные дефекты в кремнии и методы их пассивации. — Киев: Наукова Думка, 2017. — 280 с.
6. И. С. Тихонов, Применение Раман-спектроскопии для анализа структуры монокристаллического кремния. // Журнал технической физики, 2019. — Т. 89, №3. — С. 422–428.
7. С. В. Новиков, Физические основы радиационной стойкости полупроводников. — Москва: МИФИ, 2011. — 318 с.

## KREMNIY MONOKRISTALLI ASOSIDAGI $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$ GETEROSTRUKTURASINI OLISH METODI

**Z. T. Azamatov, A. B. Baxromov**

*O‘zMU huzuridagi yarimo‘tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti*

*e-mail: [abrorbaxromov0101@gmail.com](mailto:abrorbaxromov0101@gmail.com)*

So‘nggi yillarda elektronika sanoatida kremniy (Si) texnologiyalarini segnetoelektrik materiallar bilan integratsiyalash, xususan kremniy tagliklarda plyonkali va nozik plyonkali segnetoelektrik strukturalarni yaratish tendensiyasi kuchaymoqda. Ma‘lumki, hajmiy materiallarning xossalari ko‘p hollarda nozik plyonkalar xossalariidan sezilarli darajada farq qiladi. Plyonka elektrofizik xossalariga avvalo cho‘ktirish/o‘sish sharoitlari (gaz tarkibi, bosim, quvvat, harorat, tezlik), taglik (substrat)ning tarkibi va sifati, shuningdek elektrod materiali kuchli ta’sir ko‘rsatadi. Nozik plyonkali strukturalarning hajmiy materiallardan farqlari va ularning parametrlariga turli texnologik omillarning ta’siri hanuz to‘liq o‘rganilmagan masalalardan biri bo‘lib qolmoqda.

Mikroelektronikaning jadal rivoji va miniaturizatsiya talablari segnetoelektrik tabiatli materiallar, xususan niobat litiy ( $\text{LiNbO}_3$ , LN) asosida mikro- va nanomasshtabli strukturalarni yaratish va tadqiq etishni dolzarb qiladi. Shu nuqtai nazardan,  $\text{LiNbO}_3$  asosidagi plyonkali strukturalarni kremniy texnologiyalari bilan qo‘llash hamda metal-oksid-yarimo‘tkazgich (MOS) turkumidagi heterotuzilmalarni o‘rganish istiqbolli yo‘nalish hisoblanadi: bunday integratsiya elektro-optik, akusto-optik va integrallashgan fotonika qurilmalarida yuqori funksional ko‘rsatkichlarga erishish uchun zarur bazani yaratadi.

Litiy niobat ( $\text{LiNbO}_3$ ) o‘zining elektro-optik hamda optoakustik xossalari tufayli turli qurilmalar - xotira elementlari, optoakustik tizimlar uchun pyezoelektrik o‘zgartkichlar, optik va akustik to‘lqin o‘tkazgichlar va boshqa ko‘plab funksional tuzilmalarni yaratishda istiqbolli materiallardan biri hisoblanadi. Integrallashgan elektronikaning muhim tarkibiy qismi bo‘lgan yupqa  $\text{LiNbO}_3$  plyonkalari turli turdagi tagliklarda bir qator texnologiyalar yordamida shakllantiriladi: suyuq fazali epitaksiya, bug‘ fazasidan kimyoviy cho‘ktirish (CVD-jarayoni), impulsli lazerli cho‘ktirish, sol–gel usuli, polimer prekursorini kuydirish/issiqlik bilan ishlov berish hamda diskret issiqlik bug‘latish. Radiochastotali magnetron purkash (RFMS) murakkab oksidlar plyonkalarini o‘stirishda, boshlang‘ich element tarkibini saqlab qolgan holda, samarali usullardan biri sifatida qaraladi [1-3]. Shu bilan birga, RFMS va boshqa metodlar uchun gaz tarkibi va bosimi hamda taglik harorati kabi texnologik sharoitlar hal qiluvchi ahamiyatga ega [4].

Ko‘rsatib o‘tilganki, yupqa plyonkalarda  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiNb}_3\text{O}_8$  va  $\text{Li}_3\text{NbO}_4$  kabi turli fazalarning yuzaga kelishi o‘sish sharoitlariga qat’iy bog‘liq. Boshqa tomondan,  $\text{LiNbO}_3$  plyonkalari asosidagi turli geterotuzilmalarning elektr xossalari nafaqat plyonkaning o‘z xususiyatlari, balki “taglik–plyonka” geterobirikmasi sohasidagi (interfeysdagi) holatlarga ham sezilarli darajada ta’sirchan bo‘ladi. Maqsadga qarab,  $\text{LiNbO}_3$  asosidagi geterotuzilmalar tayyorlashda Si, sapfir, ZnO, GaN kabi tagliklar qo‘llaniladi va shu sababli taglik– $\text{LiNbO}_3$  plyonkasi interfeys xossalarini modifikatsiya qilish uchun turli yondashuvlar taklif etilgan.

Taglik kristall panjarasining  $\text{LiNbO}_3$  qatlamlari bilan mukammal mos kelmasligiga qaramay, kremniy (Si) yuzasida feroelektrik  $\text{LiNbO}_3$  plyonkalarini shakllantirish imkoniyati o‘ta jozibador ilmiy-texnologik vazifa bo‘lib qolmoqda, chunki bu faol elementlarni bevosita elektron chipga

integratsiyalashga yo‘l ochadi. Si–LiNbO<sub>3</sub> interfeysi sifatini yaxshilash va vakansiyalarsiz (xususan, kislorod bo‘shliqlarisiz) plyonkalar olish maqsadida reaktiv purkash gaz tarkibini juda ehtiyotkorlik bilan muvozanatlash talab etiladi, chunki u geterotuzilma xossalariga bevosita ta‘sir ko‘rsatadi. Ayrim tadqiqotchilar ushbu nuqtai nazardan Ar + O<sub>2</sub> gaz aralashmasini istiqbolli muhit sifatida qayd etganlar [5].

RFMS usulida kutilgan natijaga erishish uchun Ar/O<sub>2</sub> nisbatining bir necha optimal qiymatlari tavsiya qilingan. Masalan, [6] ishda Ar va O<sub>2</sub> ning qisman bosimlari deyarli teng bo‘lganda, c-yo‘nalishda orientatsiyalangan LiNbO<sub>3</sub> plyonkalari hajmiy (bulk) materialga yaqin xossalarga ega holda cho‘ktirilishi aniqlangan. Boshqa mualliflar [7] turli Ar/O<sub>2</sub> nisbatlarida hosil qilingan LiNbO<sub>3</sub> plyonkalarini o‘rganib, interfeys tuzoqlari zichligi past bo‘lgan Si–LiNbO<sub>3</sub> geterotuzilmalarini shakllantirish uchun Ar(60%) + O<sub>2</sub>(40%) gaz aralashmasini eng maqbul sharoit sifatida qat‘iy tavsiya qilganlar.

Magnetron purkash (RFMS) usulida LiNbO<sub>3</sub> yupqa qatlamlarini o‘stirish jarayonida diametri 50 mm va qalinligi 0,5 mm hamda 0,1 mm bo‘lgan mis kontaktli targetdan foydalandik. Ushbu target 99,99% tozalikka ega bo‘lgan LiNbO<sub>3</sub> materialidan tayyorlangan keramik shaklida bo‘lib, yuqori sifatli va barqaror plyonkalar olish uchun ideal sharoit yaratdi. Targetning yuqori tozaligi va aniq tuzilishi, o‘shish jarayonida kerakli material xossalarini saqlab qolishga imkon berdi.

Shunga qaramay, reaktiv gaz aralashmasining LiNbO<sub>3</sub> plyonkalari hajmiy xossalariga hamda Si–LiNbO<sub>3</sub> geterobirikmasiga kuchli ta‘siri haqida ma‘lumotlar yetarli darajada emas. Bundan tashqari, mazkur ta‘sirning “harakatlantiruvchi kuchi” (ya‘ni asosiy fizik-mexanizmi) ham to‘liq ravshan emas. Ushbu maqolaning maqsadi - kislorodning mavjudligi Si–LiNbO<sub>3</sub> geterotuzilmalarining to‘siq (barrier) xossalari, tarkibi hamda turli elektr va feroelektrik parametrlariga qanday ta‘sir ko‘rsatishini batafsil tadqiq etishdan iborat.

Qalinligi 0,3 μm gacha bo‘lgan plyonkalar ion-yordamli sharoitlarda monokristalli LiNbO<sub>3</sub> nishonini radiochastotali magnetron purkash (RFMS) usuli bilan olish orqali tayyorlandi. Purkash jarayoni Ar(60%) + O<sub>2</sub>(40%) gaz muhitida, bosim  $1,5 \times 10^{-1}$  Pa bo‘lganda va magnetron quvvati 100 W qiymatida olib borildi. RFMS jarayonida tagliklar nishonning eroziya zonasi ustida joylashtirildi. Ya‘ni taglik yuzasini yuqori chastotali plazma ion razryadi ionlari bilan bombardimon qilish sharoiti ta‘minlandi. Plyonka o‘shish tezligi nishon bilan taglikning pastki qatlami orasidagi masofa 4,0–5,0 sm bo‘lganda taxminan 10 nm/min ni tashkil etdi.

Taglik sifatida (001) yo‘nalishda orientatsiyalangan, n-tip o‘tkazuvchanlikka ega va solishtirma elektr qarshiligi 3,6 Ω·cm bo‘lgan monokristalli kremniy plastinalari qo‘llanildi. Plyonka sintezi jarayonida tagliklar kamida 550 °C gacha qizdirildi.

Ushbu tezisda RFMS usulida Si(001) tagliklarda LiNbO<sub>3</sub> nozik plyonkalarini o‘stirish imkoniyati va uning Si–LiNbO<sub>3</sub> geterotuzilma xossalariga bog‘liqligi yoritildi. Asosiy xulosa shuki, Ar/O<sub>2</sub> nisbatini to‘g‘ri tanlash va o‘shish rejimlarini optimallashtirish plyonkaning fazaviy barqarorligi, vakansiyalar miqdori hamda interfeysning to‘siq va elektr xossalarini sezilarli belgilaydi.

Umuman olganda, LiNbO<sub>3</sub>–Si integratsiyasi integrallashtirilgan elektro/akusto-optik hamda fotonika qurilmalari uchun istiqbolli yo‘nalishdir. Yuqori sifatli interfeys va barqaror elektr-feroelektrik parametrlar esa RFMS jarayonida texnologik sharoitlarni (gaz tarkibi, bosim, quvvat va harorat) aniq boshqarish orqali ta‘minlanadi.

### Adabiyotlar:

1. T.-H. Lee, F.-T. Hwang, C.-T. Lee, H.-Y. Lee, Mater. Sci. Eng. 136 (2007) 92.
2. T. Nishida, M. Shimizu, T. Horiuchi, T. Shiosaki, K. Matsushige, Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) 5113.
3. V. Iyevlev, A. Kostyuchenko, M. Sumets, V. Vakhtel, J. Mater. Sci. Mater. Electron. 22 (2011) 1258
4. S. Margueron, A. Bartasyte, V. Plausinaitiene, A. Abrutis, P. Boulet, V. Kubilius, Z. Saltyte, Proc. SPIE 8626 (2013) 862612.
5. F.J. Gordillo-Va'zqueza, C.N. Afonso, J. Appl. Phys. 92 (2002) 7651.
6. T. Cholapranee, F. Fabiny, Applications of Ferroelectrics: 6th IEEE Int. Symp. on. (Bethlehem, PA, USA, 8–11 June, 1986), 1986, p. 585.
7. D.G. Lim, B.S. Jang, S.I. Moon, C.Y. Yi, J. Won, Solid State Electron. 45 (2001) 1159.

## ПРИРОДА ФЕРРОМАГНЕТИЗМА МАГНИТНЫХ КЛАСТЕРОВ В КРЕМНИИ

О. К. Кувандиков, Э.У. Арзикулов, Ж. Т. Рузимуродов

Самаркандский государственный университет имени Ш. Рашидова  
[ruzimurodovjalol90@gmail.com](mailto:ruzimurodovjalol90@gmail.com)

В образцах сильно компенсированного  $Si\langle B, Mn \rangle$  из-за флуктуации распределения примесей образуются сгустки примесей, в которых расстояние между примесями меньше, чем среднее расстояние между равномерно распределенными примесями. Таким образом, можно считать, что образцы по объему покрыты центрами с более уплотненными примесями – кластерами разными по размерам и расстояниям между собой. В следствие этого, значения энергии обменного взаимодействия, зависящей от расстояния между примесями, составляет множества значений энергий обменного взаимодействия, изменяющихся в определенном интервале. Внутреннее взаимодействие в кластере описывает внутрикластерное обменное взаимодействие, а также существует межкластерное обменное взаимодействие.

Сопоставив внутрикластерное ( $J^i$ ) и межкластерное ( $J^e$ ) обменные взаимодействия с сверхтонким взаимодействием кластеров примесей их можно разделить на «сильные» и на «слабые» магнитные кластеры.

В «слабых» кластерах внутренние обменные взаимодействия  $J^i \approx A$  проявляются появлением фонового спектра ЭПР при концентрациях примесей  $N_D = (1-5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  [1]. В сильных кластерах внутрикластерное обменное взаимодействие  $J^i \gg A$ , и имеет место слабое межкластерное взаимодействие  $J^e \approx A$ .

При  $J^e \approx J^i \gg A$  - еще более сильных межкластерных взаимодействиях, происходит слияния кластеров в более крупные кластеры в ферромагнитные домены, и переход от локализации к делокализации с обобщением электронов примесей.

Согласно [1] можно предположить, что в кластерах имеется взаимодействие, которое проявляется в макроскопических свойствах материала, например в транспорте заряда, магнетосопротивлении, в магнитных свойствах. В работе [3] исследовано обменное



взаимодействие между кластерами при концентрации примесей в кремнии  $N_D = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а в работе [4] - до концентрации  $N_D = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

В нашем случае в сильнокомпенсированных образцах  $Si<B,Mn>$  в состав кластера входят  $Mn^{+2}$ ,  $Mn^{+4}$  (или в общем случае  $Mn^{+n}$ ) и при концентрациях  $N_D = 5 \cdot 10^{17} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  атомы примесей образуют кластеры, состоящие из трех или намного большего числа атомов. По спектрам ЭПР приведенными в работе [5] можно констатировать, что примитивный кластер в образцах кремния ионно - легированных марганцем состоит из четырех ионов  $Mn^{+4}$  (или в общем виде  $(M^{+}-An-M^{+})^{4+}$ , где  $An$  - анион, в образцах же  $Si<B,Mn>$  ионы  $B^{+}$  или дефект кристаллической решетки). Более сложный кластер имеет вид  $(M^{4+}-An-M^{4+})_n$ , а также  $nMn^{n+}$ .

На основании экспериментальных данных мы пришли к выводу, что невозможно описать только одной теорией внутрикластерное и межкаластерное обменные взаимодействия:

- состав магнитного кластера с большим магнитным моментом оказывается не однородным и по составу, и по среднему расстоянию между примесями;
- имеются флуктуации концентрации атомов примесей, где возможно существование даже прямого обмена;
- в образцах кремния выращенного по методу Чохральского имеется кислород в очень больших концентрация, и это может привести к образованию комплексов, состоящих из примесных атомов типа  $(M^{+}-O-M^{+})_n$ .
- в высокоомном сильно компенсированном кремнии имеются акцепторы бора с концентрацией порядка  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , которые сопутствуют образованию центров  $(B^{-}-Mn^{+})^0$ .
- по спектрам ЭПР выявлено [5] что, в легированном марганцем кремнии, после отжига марганец склонен к накоплению  $Mn^{+4}$ .

При построении теоретической модели внутрикластерного обменного взаимодействия надо учитывать вышеизложенные факты, и можно утверждать, что такая модель имеет сложный характер. Гамильтониан для внутрикластерного обменного взаимодействия имеет следующий вид:

$$H_C = H_1 + H_2 + H_3 \quad (1)$$

Здесь-  $H_1$  - гамильтониан прямого обмена между атомов примесей  $Mn$  где  $r < 2a_B$  т.е. волновая функция электронов примесей перекрывается,  $H_2$  - гамильтониан комплексов состоящих из примесных комплексов типа  $(M^{+}-O-M^{+})_n$ ,  $H_3$  - гамильтониан обменного взаимодействия центров  $(B^{-}-Mn^{+})^0$ .

$H_1$  - гамильтониан прямого обмена между атомов примесей  $Mn$  где  $r < 2a_B$  где волновая функция электронов примесей перекрывается и описывается теорией РККИ.

$H_2$  - гамильтониан комплексов, состоящих из примесных комплексов типа  $(M^{+}-O-M^{+})_n$  описываемых теорией [6].

$H_3$  - гамильтониан обменного взаимодействия центров  $(B^{-}-Mn^{+})^0$ , описываемых теорией Зингера.

В этой модели рассматривается две электронные подсистемы с коллективизированными электронами проводимости (s - электроны) и локализованные d(f) - электроны. Гамильтониан в этой модели имеет следующий вид:

$$H_I = H_M + H_A + H_B, \quad (2)$$

где  $H_M$  — гамильтониан магнитной подсистемы (обычно берется в гейзенберговском виде  $H_M = J_{ij}S_iS_j$ ; здесь  $J_{ij}$  — обменный интеграл для  $i$ -го и  $j$ -го атомов,  $S_i, S_j$  — соответствующие спиновые операторы),  $H_A$  — описывает обмен между электронами проводимости и спинами магнитных ионов,  $H_B$  — гамильтониан подвижных носителей заряда (электронов, дырок).

Таким образом, для описания межкластерных взаимодействий наиболее предпочтительно использовать гамильтониан (2).

Литература.

1. В. Б. Гнодман. Труды ФИ им П. Н. Лебедева АН СССР. Т. 104, ст. 54, 1978 г.
2. Cullis P. R. Marko I. R. Phys. Rev., 1970, 1, p. 632 B.
3. Р.Б. Моргунов, А.И. Дмитриев. Физика твердого тела, 2009, том 51, вып. 10
4. М.В. Красинкова. ЖТФ. 2002, том 72 вып. 5.
5. Мастеров В.Ф. Глубокие центры в полупроводниках. ФТП., том 18, вып. 1, 1984 г.
6. C. Zener. Phys. Rev. 81, 440 (1951).

## **KREMNIY KRISTALL PANJARASIDA BOR VA FOSFOR ATOMLARINING BIRIKMALARINI SHAKLLANISH MAXANIZMI**

**N. F. Zikrillayev<sup>1</sup>, G. H. Mavlonov<sup>1</sup>, S. N. Srajev<sup>2</sup>, A. A. Usmonov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent shari, Universitet ko‘chasi 2-uy, 100095.*

<sup>2</sup>*Samarqand davlat universiteti, Samarqand shahri, Universitet xiyoboni 15-uy, 140104.*

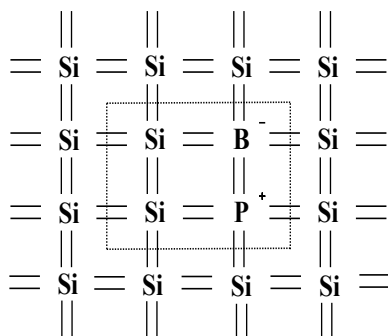
*e-mail: [u-anvarjon@mail.ru](mailto:u-anvarjon@mail.ru)*

So‘ngi yillarda kremniy hajmida va sirtida kirishma atomlarni yoki birikmali yarimo‘tkazgichlarning shakllanishi asosida boshlang‘ich kremniy materialining fundamental xususiyatlarini o‘zgartirishga bag‘ishlangan ilmiy tadqiqotlarga ko‘plab olimlar va mutaxassislar tomonidan qiziqish bo‘lmoqda. Shu nuqtai nazardan, elektronika uchun asosiy material bo‘lgan kremniy hajmida bor va fosfor kirishma atomlarni birikmalarini shakllanish mexanizmlarini va olingan materialning elektrofizik, fotoelektrik va optik xususiyatlarini tadqiq qilish dolzarb masalalaridan biri hisoblanadi. Yarimo‘tkazgich materialning kristall panjarasida kirishma atomlarining elementar birikmalari shakllanishi hamda bunday materiallarning yangi elektrofizik va optik xususiyatlarini tadqiq etish katta qiziqish uyg‘otadi [1-2].

Bor va fosfor kirishma atomlarining elementar birikmalarini hosil bo‘lishi nanostrukturali kremniy ishlab chiqarish texnologiyasini yaratish uchun asos bo‘lib xizmat qiladi. Shuning uchun kremniydagi, ayniqsa  $(BP)_xSi_{1-x}$  turdagi birikmalarda kirishma atomlari konsentratsiyasini nazorat qilish katta ilmiy va amaliy qiziqish uyg‘otadi. Bor va fosfor kiritilganda kirishma atomlarining birikmalari hosil bo‘lishida yuqori konsentratsiyada ishtirokini ta‘minlash uchun ushbu kirishma atomlarining sirt va sirt oldi qatlamida deyarli bir xil konsentratsiyada taqsimlanishi uchun zarur termodinamik sharoitlarni aniqlash kerak [2, 3].

Cheksiz manbadan diffuziya sharoitida kremniyda fosfor va bor atomlarining diffuziya koeffitsiyentlari va eruvchanligini hisobga olgan holda konsentratsiya taqsimotining nazariy hisoblari shuni ko‘rsatdiki, bunday termodinamik shartlarni bajarish juda nozik va murakkab texnologik bosqichlarni talab qiladi [4-5].

Kvazineytral  $[P^+B^-]$  binar birikmalar, bor va fosfor kirishma atomlari kremniy panjarasidagi ikkita eng yaqin tugunlarda joylashsa hosil bo'lishi tajriba natijalari va nazariy hisoblashlar asosida aniqlandi. Kremniy kristall panjarasida bunday binar birikmalarni shakllanishi  $Si_2P^+B^-$  turidagi elementar (binar birikmani) yacheykalarni hosil bo'lish ehtimolini oshirishiga olib keladi (1-rasm).



**1-rasm. Kremniyda  $Si_2P^+B^-$  turidagi elektroneytral binar birikmaning modeli.**

Bunday  $Si_2P^+B^-$  turidagi binar birikmalar kremniyning elementar yacheykasidan farqli o'laroq, qisman ionli va kovalent bog'lanishga ega bo'lib, energiya tuzilishi ham farq qiladi.

#### **Adabiyotlar ro'yxati**

1. М. К. Бахадирханов, С.Б. Исамов. Физические основы формирования гетероваризонной структуры на основе кремния, ЖТФ, 91 (11), 1678 (2021).
2. Н. Ф. Зикриллаев, О.Б. Турсунов, М. М. Шоабдурахимова. Фотоэлектрические свойства варизонных структур на основе кремния с нанокластерами примесных атомов Zn и Se, Физика полупроводников и мик-роэлектроника, 2 (2), 15 (2020).
3. М. К. Бахадирханов, З. Т. Кенжаев, С.В. Ковешников, А.А. Усмонов, Г.Х. Мавлонов. Образование комплексов примесных атомов фосфора и бора в кремнии, Неорг. матер., 58 (1), 3 (2022).
4. М.К. Бахадирханов, Н.Ф. Зикриллаев, С.Б. Исамов, Х.С. Турекеев, С.А. Валиев. Влияние наличия достаточно высокой концентрации фосфора на концентрационное распределение галлия в кремнии, ФТП, 56 (2), 199 (2022).
5. Х. Ф. Зикриллаев, Қ. С. Аюпов, Г. Х. Мавлонов, А. А. Усмонов, М. М. Шоабдурахимова, Особенности электрофизических параметров кремния, легированного последовательно примесными атомами фосфора и бора, ФТП, 2022, том 56, вып. 6 DOI: 10.21883/00000000000

## **THERMODYNAMIC STABILITY OF MOLECULAR GaP SUBSTITUTION IN SILICON-BASED SOLID SOLUTIONS**

**A. Saidov<sup>1</sup>, Sh.Usmonov<sup>1</sup>, Sh.Masharipov<sup>2\*</sup>, U. Asatova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Physical-Technical Institute, Academy of Sciences Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Urgench State University, Khamid Olimjan street.14, Urgench 220100, Uzbekistan

\*e-mail: [shahzodbekmasharipov6@urdu.uz](mailto:shahzodbekmasharipov6@urdu.uz)

The integration of III–V semiconductors into silicon technology remains one of the key challenges for the development of efficient silicon-based optoelectronic devices. Recent experimental studies have demonstrated the epitaxial growth of  $(Si_2)_{1-x}(GaP)_x$  films with a graded

band gap on Si(111) substrates. These films exhibit single-crystalline quality and room-temperature photoluminescence, indicating the presence of an underlying metastable phase stability in this material system [1]. Such results highlight the potential of molecularly substituted Si–GaP solid solutions for silicon-based optoelectronic applications.

In this work, the thermodynamic stability and phase stability of a continuous solid solution  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$  formed via molecular substitution, in which GaP structural units replace pairs of Si–Si atoms in the crystalline silicon lattice, are investigated. Formation energies calculated using density functional theory (DFT) confirm the possibility of experimental realization of stable  $(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{GaP})_x$  solid solutions.

Density functional theory (DFT) calculations were performed within the plane-wave pseudopotential framework using the Quantum ESPRESSO package [2-3]. Norm-conserving SG15 pseudopotentials constructed with the PBEsol exchange–correlation functional were employed, and the electronic wave functions were expanded using a plane-wave basis with a kinetic-energy cutoff of 90 Ry, which was kept fixed for all systems to ensure consistent total-energy comparisons. Brillouin-zone integrations were carried out using Monkhorst–Pack k-point meshes, with a  $12 \times 12 \times 12$  grid for the conventional Si unit cell and a  $6 \times 6 \times 6$  grid for the corresponding  $2 \times 2 \times 2$  supercell, maintaining an equivalent k-point density. The chosen computational parameters follow commonly used values in the literature and provide a reasonable balance between accuracy and computational efficiency.

Formation energy is a fundamental quantity for evaluating the thermodynamic stability of materials, defined as the total-energy difference between a compound or defect-containing system and its constituent elements in their reference states. It is calculated using total energies and chemical-potential terms, with more negative values indicating greater stability. Formation-energy analysis is widely applied to assess phase stability, predict new materials, and study defects in crystalline solids. In the present work, contributions related to the Fermi level and finite-size charge corrections are neglected, as the focus is on relative stability trends among different substitution configurations rather than on absolute defect formation energies. General expressions for neutral and charged defect formation energies are provided for reference.

Formation energy of a neutral defect  $D^0$  is defined as:

$$E_{for}(D^0) = E_{tot}(D^0) - E_{tot}(bulk) + \sum n_i \mu_i \quad (1)$$

Where:  $E_{tot}(D^0)$  and  $E_{tot}(bulk)$  are the total energy of the defective and pristine respectively supercell,  $n_i$  is the number of atoms added (positive) or removed (negative),  $\mu_i$  is the chemical potential of species  $i$ .

Formation energy of a neutral defect  $D^q$  is defined as:

$$E_{for}(D^q) = E_{tot}(D^q) - E_{tot}(bulk) + \sum n_i \mu_i + qE_F + E_{corr} \quad (2)$$

Where:  $q$  is the charge state of the defect,  $E_F$  is the Fermi level referenced to the valence-band maximum,  $E_{corr}$  is the electrostatic finite-size correction.

Table 1 summarizes the DFT total energies and corresponding bulk chemical potentials of the elemental and compound reference phases used in the formation-energy analysis. Energies are given for conventional unit cells of Si,  $\alpha$ -Ga, black P, and GaP, with chemical potentials normalized per atom or per GaP formula unit and used as references for Ga-, P-, and GaP-related substitutions in Si.

Table 1

| System            | $E_{\text{tot}}$ of system, [eV] | Bulk chemical potential $\mu$ [eV/atom or eV/GaP] |
|-------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|
| Silicon           | -858.978121113504                | -107.372265139188                                 |
| $\alpha$ -Gallium | -14249.3184707808                | -1781.1648088476                                  |
| Black Phosphorus  | -1436.52742138857                | -179.565927673571                                 |
| Gallium Phosphide | -7846.431915535                  | -1961.60797888375                                 |

Table 2 lists the DFT total energies of pristine and doped  $2 \times 2 \times 2$  Si supercells together with the corresponding formation energies. The pristine  $\text{Si}_{64}$  supercell serves as the reference, while doped configurations include single Ga or P substitutions, isolated Ga–P atomic substitutions, and a bonded GaP pair replacing two neighboring Si atoms. Formation energies are obtained from total-energy differences between doped and pristine supercells. All values are reported in electronvolts for fully relaxed structures.

Table 2

| System                                         | $E_{\text{tot}}$ of pristine $2 \times 2 \times 2$ -supercell, [eV] |                                           |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $\text{Si}_{64}$                               | -6871.82524986559                                                   |                                           |
| System                                         | $E_{\text{tot}}$ of doped supercell, [eV]                           | $E_{\text{for}}$ of doped supercell, [eV] |
| $\text{Si}_{63}\text{Ga}_1$                    | -8538.89143773582                                                   | 6.72635583818169                          |
| $\text{Si}_{63}\text{P}_1$                     | -6950.59821239791                                                   | -6.57929999793257                         |
| $\text{Si}_{62}\text{Ga}_1\text{P}_1$ (atomic) | -8617.6584368929                                                    | 0.147055840249124                         |
| $\text{Si}_{62}(\text{GaP})_1$                 | -8618.04560974477                                                   | -0.234153636387276                        |

Although isolated P substitution in Si is found to be energetically favorable, this configuration is not expected under liquid-phase epitaxy conditions. At the growth temperature ( $\sim 970^\circ\text{C}$ ), P is present in the melt predominantly in the form of GaP units rather than as isolated atoms. Consequently, the relevant incorporation pathway is molecular GaP substitution, which is also found to be energetically favorable in our calculations.

The obtained results provide important insights into the thermodynamic stability of the observed phases and serve as a foundation for the development of synthesis strategies for new semiconductor solid solutions. In particular, the analysis clarifies the role of molecular substitution and charge compensation in stabilizing GaP incorporation within the silicon lattice under experimentally relevant growth conditions.

## References

1. A. S. Saidov, D. V. Saparov, Sh.N. Usmonov, A.Kutlimratov, J.M. Abdiev, M. Kalanov, A.Sh. Razzakov, and A.M. Akhmedov Advances in Condensed Matter Physics Volume 2021, 8 pp., <https://doi.org/10.1155/2021/3472487>.
2. P. Giannozzi et al., J. Phys.: Condens. Matter 21, 395502 (2009).
3. P. Giannozzi et al., J. Phys.: Condens. Matter 29, 465901 (2017).



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$

С.М. Отажонов\*, К.А.Ботиров, Ж.М. Бокиров.

*Ферганский государственный университет  
150100, город Фергана, улица Мураббилар, 19.*

\*e-mail: [otajonov\\_s@mail.ru](mailto:otajonov_s@mail.ru)

В условиях глобального роста потребления энергии и необходимости снижения углеродных выбросов особое значение приобретает развитие фотовольтаических технологий. Среди различных тонкопленочных солнечных элементов структуры на основе CdTe занимают одно из ведущих мест благодаря оптимальной ширине запрещенной зоны ( $\sim 1,45$  эВ), высокому коэффициенту поглощения и относительной технологической простоте изготовления [1].

Использование гетероструктур CdS–CdTe является классическим подходом, однако внедрение дополнительного контактного слоя на основе  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$  позволяет улучшить сбор носителей заряда и снизить контактные потери [2]. Нестехиометрический сульфид меди  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$  характеризуется высокой концентрацией дырок и может эффективно использоваться в качестве  $p^+$ -контактного слоя, формирующего благоприятные энергетические условия на границе раздела [3].

Несмотря на значительное количество исследований, влияние параметра  $x$  в соединении  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$  на эффективность солнечных элементов  $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$  остается недостаточно изученным, что и определяет актуальность данной работы.

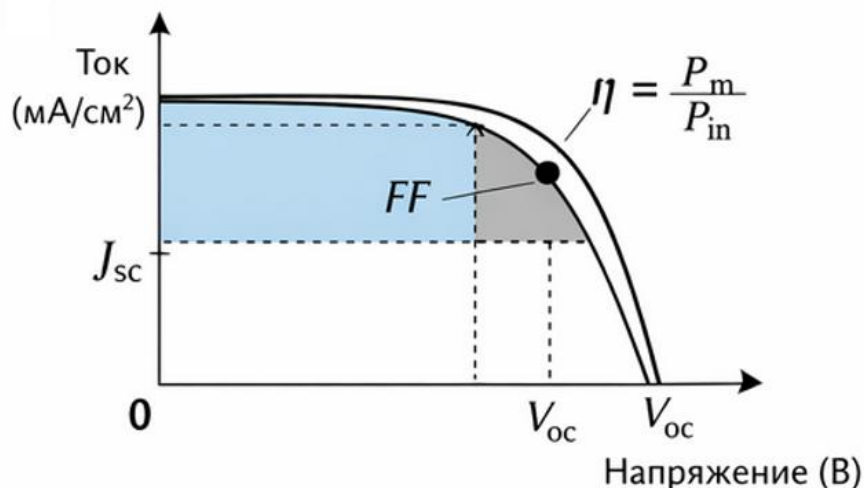
Солнечные элементы на основе гетероструктуры  $\text{Cu}_{2-x}\text{CdS}-\text{CdTe}$  были изготовлены методом последовательного осаждения тонких пленок. Подложкой служило стекло с нанесенным прозрачным проводящим оксидом ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ). Слой CdS осаждался методом химического осаждения из раствора, что обеспечивало высокую однородность и контролируемую толщину порядка 80–100 нм [4].

Пленка CdTe формировалась методом термического испарения с последующей хлоридной обработкой ( $\text{CdCl}_2$ ), направленной на улучшение кристаллической структуры и уменьшение плотности дефектов [5]. Верхний контактный слой  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$  наносился методом ионного обмена с контролем нестехиометрии путем изменения времени обработки и концентрации реагентов.

Фотоэлектрические параметры солнечных элементов исследовались при стандартных условиях освещения AM1.5 ( $100 \text{ мВт/см}^2$ ). Измерялись вольт-амперные характеристики, на основе которых определялись значения напряжения холостого хода ( $V_{oc}$ ), тока короткого замыкания ( $J_{sc}$ ), коэффициента заполнения ( $FF$ ) и КПД.

Экспериментальные исследования показали, что изменение нестехиометрии слоя  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}$  оказывает существенное влияние на фотоэлектрические характеристики солнечных элементов. При оптимальном значении  $x \approx 0,15$  наблюдалось максимальное увеличение  $V_{oc}$  и  $FF$ , что связано с формированием более стабильного и однородного потенциального барьера на границе  $\text{Cu}_{2-x}\text{S}/\text{CdS}$  [6].

Увеличение концентрации вакансий меди способствует росту концентрации дырок, однако при чрезмерном отклонении от стехиометрии усиливаются рекомбинационные потери на межфазных дефектах. Это приводит к снижению  $J_{sc}$  и общей эффективности устройства. Максимальное значение КПД, достигнутое в данной работе, составило около 14,2%, что сопоставимо с результатами, приведенными в современных исследованиях



тонкопленочных CdTe солнечных элементов [7].

Полученные данные свидетельствуют о том, что слой  $Cu_{2-x}S$  играет ключевую роль в оптимизации энергетической диаграммы гетероструктуры и повышении эффективности переноса носителей заряда.

В работе показано, что солнечные элементы на основе гетероструктуры  $Cu_{2-x}CdS$ –CdTe обладают высоким потенциалом для применения в тонкопленочной фотовольтаике. Установлено, что оптимизация нестехиометрии слоя  $Cu_{2-x}S$  является эффективным инструментом управления фотоэлектрическими параметрами устройства.

Определено оптимальное значение параметра  $x$ , при котором достигается максимальный КПД солнечных элементов. Результаты исследования могут быть использованы при разработке высокоэффективных и технологически устойчивых солнечных элементов нового поколения.

### Список использованной литературы

1. Green M.A. *Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice-Hall, 1982.
2. Romeo A., Terheggen M., Abou-Ras D. et al. *Development of thin-film Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> and CdTe solar cells*. Prog. Photovolt., 2004.
3. Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor Heterojunctions*. Pergamon Press, 1974.
4. Mahdi M.A., Hassan Z. *Chemical bath deposition of CdS thin films*. Thin Solid Films, 2010.
5. Durose K., Edwards P.R., Halliday D.P. *Materials aspects of CdTe/CdS solar cells*. J. Cryst. Growth, 2000.
6. Al-Douri Y., Hashim U. *Effect of copper deficiency in  $Cu_{2-x}S$  layers on photovoltaic performance*. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2015.
7. Wu X. *High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells*. Sol. Energy, 2004.

## **MUJASSAMLANGAN QUYOSH NURI TASIRIDA RUX OKSIDINING KARBOTERMIK QAYTARILISHI**

**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-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 81ptic81a 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 H<sub>2</sub>O 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 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 projektorlar sinfiga tegishli (8 yoki undan ko‘p yoy daqiqalaridagi noaniqliklar), energiya xususiyatlarini hisoblash uchun 81ptic81a 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),  $\operatorname{erf}$  – 81pti 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.

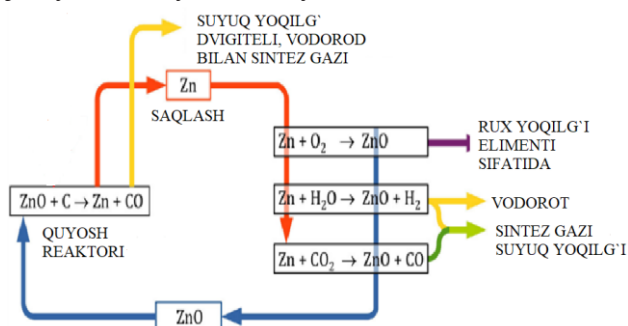
Ushbu ilmiy ishda  $H_2O$  ni termokimyoviy parchalash orqali  $H_2$  olish texnologiyasiga ustuvor ahamiyat beriladi. Bu termokimyoviy usulning ikki bosqichdan iboratligi bilan bog'liq. Masalan,  $ZnO/Zn$  tizimi uchun dastlab  $ZnO$  dissotsilanish jarayoni sodir bo'ladi va 82ptic  $Zn$  olinadi. Bu reaksiyada erkin  $O_2$  chiqib ketadi. Keyingi bosqichda 82ptic  $Zn \sim 350 - 450^\circ C$  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 82ptic82al 82ptic 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 .



**1-rasm –  $ZnO$ 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.

### ABIYOTLAR

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. CO<sub>2</sub> splitting via two-step solar thermochemical cycles with Zn/ZnO and FeO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 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 H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>- splitting thermochemical cycles with Zn/ZnO and FeO/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> redox reactions // Chem. Mater. -2010. -Vol. 22. -P. 851 - 859.

## EXPANSION OF THE SPECTRAL REGION OF PHOTSENSITIVITY BY BINARY ELEMENTARY CELLS IN SILICON

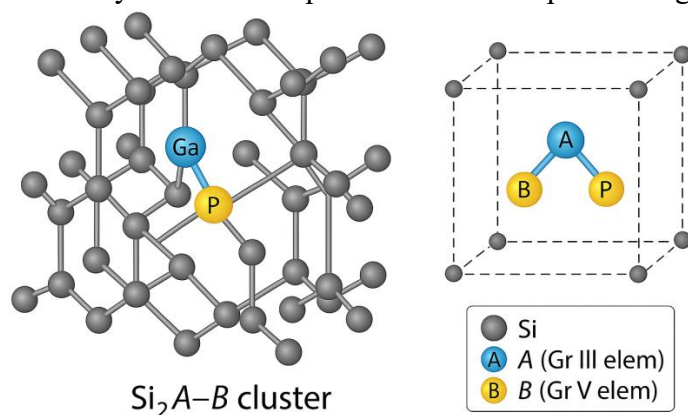
Kh.M. Iliyev, N.F. Zikrillayev, U.Kh. Sodikov\*

*Tashkent State Technical University*

*Uzbekistan, Tashkent, 100131, st. University, 2*

\*e-mail: [sodikovusmonhoja@gmail.com](mailto:sodikovusmonhoja@gmail.com)

The paper is devoted to expansion of the spectral region of photosensitivity by binary elementary cells, e.g. interaction of impurity atoms (elements III (B, Al, Ga, Zn) and V (P, As, Sb) groups) of varying nature, as binary elementary cells (BEC) in silicon. It was shown, these atoms under certain thermodynamic and doping conditions formed unique donor-acceptor complexes, actually electrically neutral cells in the silicon lattice in volume, as well as on the surface likely to assemble. It should be noted, the crystal, while maintaining its tetrahedral covalent structure, contains a certain concentration of the BEC as a form Si<sub>2</sub>AB. By controlling the concentration of BECs in the lattice, can be modulate the structure of this grids and get controllable structures with BEC. As a result it is possible to significantly expand the spectral sensitivity of silicon. The formation of BEC s of A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> semiconductor compounds in the silicon lattice significantly changes the emissivity of the material, be created a new class of semiconductor material with unique functionality for modern optoelectronics and photoenergetics (Fig.1).



**Fig.1. Model of a BEC with  
the  $\text{Si}_2\text{GaP}^+$  ( $\text{Si}_2\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ )  
structure in the silicon lattice.**



Today the demand for energy resources is changing structurally, especially in the renewable sources, the development of green energy is becoming a topical issue. At the same time, in the context of climate change, every country has problems with ensuring an efficient energy resources and accelerating industrialization and population growth are significantly increasing the economy's need. To strengthen the energy security of the country, it is necessary to expand the use of renewable energy sources and create the necessary conditions for the science's work in this direction, strengthening the scientific potential of this sector. Renewable energy, as clean energy comes from natural sources or processes that are constantly replenished. Appreciating the country's considerable solar energy potential, region is convenient to use it.

By the Sun's light produced photovoltaic energy for the generation of electricity. As is known, a low of efficiency of modern industrial silicon photovoltaics (up to 20%) is associated with inefficient use irradiation of solar energy in the region of the spectrum with range  $\lambda = 1.15 \div 3 \mu\text{m}$  (about 40% of the solar irradiation) and also with the effect thermalization of photogenerated charge carries associated with the absorption quants of light with energy  $h\nu > E_g$  [1-2], i.e. to the deterioration parameters of the photovoltaic (PV) cells. In place this factor determines prices and large-scale ground-based use of them in photoenergetics. According to the authors of [3], in optical silicon cells optical losses associated with the above effects are about 50%.

However, the existing technology and functionality of semiconductor materials, including silicon, which is now widely used in photoenergetics, do not allow finding a solution for previously problems. And the recent use of multicascade PV cells based on semiconductor compounds  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  can not substantially solve the problem of large-scale use of such PV cells in terrestrial conditions due to rather complicated technological conditions of their manufacture and high cost of such structures.

Therefore, a successful solution of this problem requires the substantiation of the physical foundations and the development of technological conditions that allow the spectral region of silicon sensitivity to be expanded both in the direction of the IR region and in the direction of the visible and UV spectral regions. In this paper we proposed an original solution to this problem, consisting in a substantial expansion of the spectral region of silicon sensitivity, as a result of the formation of fundamentally new elementary cells participating atoms of groups III and V in the silicon lattice. It should be noted that such new elementary cells act as a new class of quantum structures with unique and yet unexplored functionalities with a managed compose, structure, concentration, and distribution in the silicon lattice.

## REFERENCE

1. Зикриллаев Н.Ф., Ковешников С.В., Турекеев Х. С., Исмайлов Б.К.. Состав кремния, совместно легированного атомами галлия и фосфора // Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2024, – № 1, – С. 84–89.
2. Содиков У.Х. Свойства бинарных нанокластеров примесных атомов в кремнии // International Journal of Education, Social Science & Humanities. Finland Academic Research Science Publishers. – 2023. – V. 11, Is.6. – P. 1435-1437. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8097440>
3. Бахадирханов М.К., Исамов С.Б. Физические основы формирования гетероваризонной структуры на основе кремния // Журнал технической физики. – 2021, Т-91, – С. 1678-1682. DOI: 10.21883/JTF.2021.11.51528.60-21

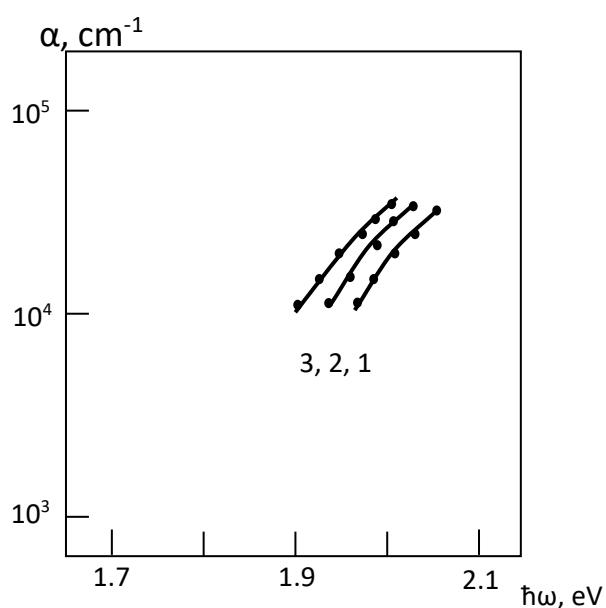
4. Bakhadyrhanov M. K., Sodikov U. Kh., Melibayev D.. Silicon with Clusters of Impurity Atoms as a Novel Material for Optoelectronics and Photovoltaic Energetics // Journal of Materials Science and Chemical Engineering. – 2018, 06(04). – P.180-190. DOI: 10.4236/msce.2018.64017

5. Saparov, D.V., Saidov, M.S. & Saidov, A.S. Expansion of the spectral sensitivity range of the silicon photocells by growing a solid  $(Si_2)_{1-x}(GaP)_x(0 \leq x \leq 1)$  solution // Appl. Sol. Energy. – 2016. – V.52. – P.236–237. <https://doi.org/10.3103/S0003701X16030154>

### ПАСТ ТЕМПЕРАТУРАЛАРДА a-Si:H НИНГ ХАРАКАТЧАНЛИК ТИРҚИШИНИ ЭНЕРГЕТИК КЕНГЛИГИНИ ТЕМПЕРАТУРАГА БОҒЛАНИШИНИ БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙИН ФОРМУЛАСИДАН ҲИСОБЛАШ

<sup>1</sup>Икрамов Р.Ғ., <sup>1</sup>Муминов Х.А., <sup>1</sup>Умаров С. С., <sup>1</sup>Султонов Б. Қ., <sup>1</sup>Нуриддинова  
М.А., <sup>2</sup>Жалалов Р.М.

<sup>1</sup>Наманган давлат техника университети, <sup>2</sup>Наманган давлат университети  
[rgikamov@mail.ru](mailto:rgikamov@mail.ru)



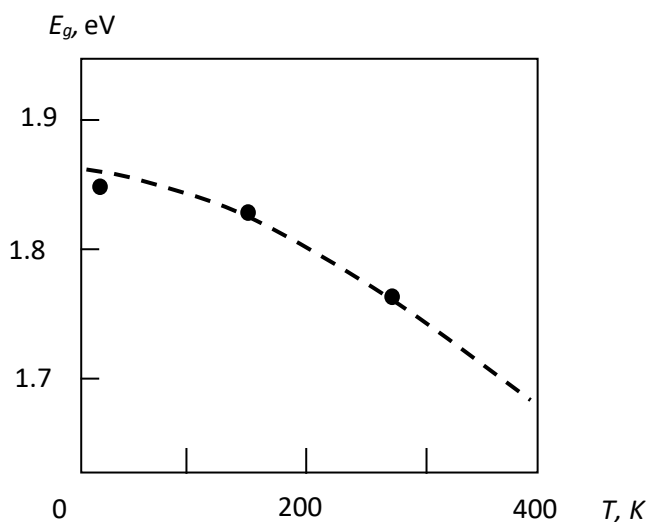
1 – расм. [1] ишдаги зоналараро ютилиш спектри учун тажриба 1- $T=12.7$  К, 2-  $T=151$  К, 3-  $T=293$  К ва (1) формуладан олинган ҳисоблаш натижалари (туташ эгри чизиқлар).

ифода олинган:

$$\alpha_2(\hbar\omega) = \frac{B}{4\hbar\omega E_g} \left[ 2(\hbar\omega - E_g) \sqrt{E_g \hbar\omega} - (E_g - \hbar\omega)^2 \arctg \left( \frac{E_g - \hbar\omega}{2\sqrt{E_g \hbar\omega}} \right) \right]. \quad (1)$$

Одатда аморф кремнийда ички фотоэффект содир бўлиши учун, (тақиқланган зона ҳосил қилиш учун) унга водород киритилади. Киритилган водорад атомлари узилган боғлар билан бирикади ва тақиқ зона ҳосил бўлади. Аморф яримўтказгичлардаги тақиқланган зона аниқ бир қийматга эга бўлмаганлиги учун бу соҳани ҳаракатчанлик тирқиши деб юритилади.

[1] ишда аморф гидрогензацияланган (водород киритилган) кремний (a-Si:H) нинг зонлараро оптик ютилиш коэффициентининг температурага боғлиқлигини тажрибалардан аниқланган қийматлари келтирилган (1-расм). [2] ишда эса зоналараро ютилиш спектри учун назарий усулда Дэвис-Моот яқилашиш усулига кўра ёзилган Кубо-Гринвуд формуласидан қуйидаги



2-расм. Аморф гидрогенизацияланган кремнийнинг ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглигини температурага боғланиши учун Бозе-Эйнштейн формуласидан олинган натижалар - нуқталар эксперимент.

Бу ерда  $B$  - ютилган фотонларни энергиясига боғлиқ бўлмаган пропорционаллик коэффиценти,  $E_g$  - a-Si:H ни ҳаракатчанлик тирқишининг энергетик кенглиги. (1) ифодадан зоналараро ютилиш спектрини ҳисоблаш учун, бу формуладаги  $B$  ва  $E_g$  ни аниқлаш керак. Бунинг учун 1 - расмда келтирилган тажриба натижаларига (1) формуладаги  $B$  ва  $E_g$  ларни мослаштирувчи параметр сифатида қараб, ҳисоблаш натижаларини тажриба натижаларига мослаштирамиз. Тажриба ва ҳисоблаш натижалари бир-бирига мос келиши учун  $B$  ва  $E_g$  лар учун олинган натижалар 1- расм (чизиқлар) 1 жадвалда келтирилган.

1 жадвал

| № | T, K | $E_g$ ,<br>eV | $B$ , $\text{cm}^{-1}$ |
|---|------|---------------|------------------------|
| 1 | 12.7 | 1.861         | $3.647 \cdot 10^5$     |
| 2 | 151  | 1.841         | $3.745 \cdot 10^5$     |
| 3 | 293  | 1.793         | $3.861 \cdot 10^5$     |

[3] ишда

яримўтказгичларни таққ зонаси энергетик кенглигини температурага боғланиши аниқловчи ифода:

$$E_g(T) = E_{g0} - 2\alpha_B / (\exp(\theta/T) - 1) \quad (2)$$

қўринишда бўлиши келтирилган (Бозе-Эйнштейн тенгламаси). Бу ерда  $E_g(T)$  - таққ зона энергетик кенглиги температурага боғлиқ равишда ўзгариши,  $E_{g0}$  -  $T = 0$  К бўлганда аморф гидрогенизацияланган кремнийни ҳаракатчанлик тирқишини энергетик кенглиги,  $\alpha_B$  - таққ зонанинг температура коэффиценти,  $\theta$  - ўзгармас катталиқ. Ҳаракатчанлик тирқишини температурага боғланиши аниқлаш учун 1 жадвалдаги  $B$  ва  $E_g$  ларни (2) формулага қўйиб бажарилган ҳисоблашлар  $\alpha_B = 2.57 \cdot 10^{-2}$  eV,  $\theta = 191$  K,  $E_{g0} = 1.856$  eV га тенг бўлганда, бу қийматлар (2) формулага мос келишини кўрсатди. Бу натижалар 2 - расмда келтирилган.

Шундай қилиб ушбу ишда аморф гидрогенизацияланган кремнийни ҳаракатчанлик тирқиши энергетик кенглигини температурага боғланиши, тажриба ва назарий ҳисоблаган зоналараро ютилиш спектрларидан фойдаланиб тадқиқ қилинди. 1 жадвалдан қўринадики, a-Si:H ни ҳаракатчанлик тирқиши энергетик кенглиги температура ортиши билан

кичиклашиб борар экан. 1 жадвалдаги  $E_g$  ни қийматлари а-Si:H ни ҳаракатчанлик тирқиши энергетик кенглиги температура боғланиши Бозе – Эйнштейн формуласига мос келиши кўрсатилди.

Фойдаланилган адабиётлар

3. G.D. Cody, T. Tiedje, B. Abeles, B. Brooks and Y. Goldestein. Disorder and the Optical-Absorption Edge of Hydrogenated Amorphous Silicon. Physical Review Letters, V 47, N 20, (1981), pp. 1480-1483.

4. Зайнобидинов С., Икрамов Р.Г., Жалалов Р.М., Нуритдинова М.А. Распределения плотности электронных состояний в разрешенных зонах и межзонные поглощения в аморфных полупроводниках. //Оптика и спектроскопия. (2011), Т. 110, № 5. С. 813-818.

5. Qixin Guo, Akira Yoshida. Temperature Dependence of Band Gap Chang in InN and AlN. Pn.J.appl. Phys. Vol.33 (1994) pp. 2453-2456.

## ACTIVE METAL ION IMPLANTATION EFFECTS ON SEMICONDUCTOR SURFACE PROPERTIES

**B.E. Umirzakov, J.B. Khujaniyozov\*, A.A. Abduvayitov, I.Q. Qodirova,  
Z.A. Tursunmetova**

*Tashkent State Technical University Named after Islam Karimov  
Uzbekistan, Tashkent, 100095, Universitet St. 2.*

*\*e-mail: [KhujaniyozovJB@mail.ru](mailto:KhujaniyozovJB@mail.ru)*

We have investigated the influence of  $Ba^+$  and alkaline ion implantation on properties of monocrystalline Si, GaAs and GaP by low-energy electron diffraction (LEED) and second electron emission spectroscopy (SEES) methods. A possibility of production of thermosensitive structures on the base of ion-implanted Si(111) samples is demonstrated.

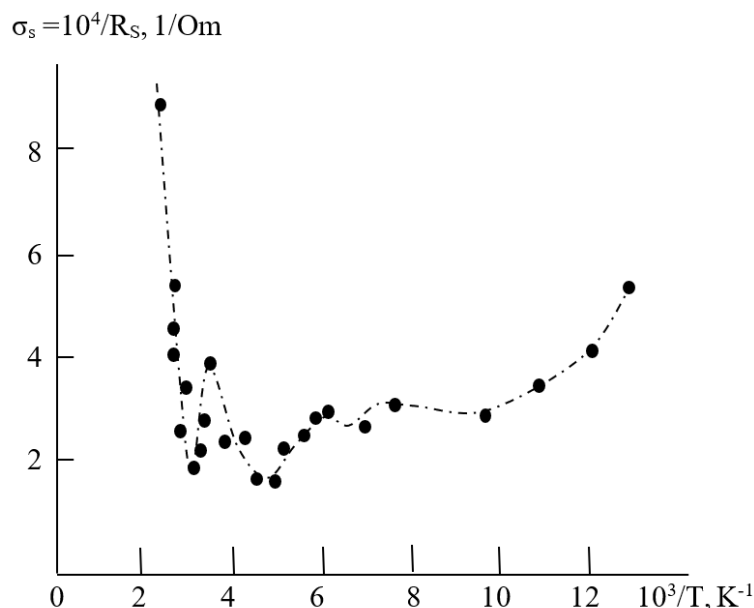
The properties of semiconductors are known to be quite sensitive to different influences. This is widely used in designing of different detectors [1]. Thermosensitive elements on the base of Si are reported in [2]. For example, a material with high thermosensitivity was obtained by diffusive Mn doping of Si. But in all known works the temperature range that can be measured was limited up to 350-380 K. This can be explained by impurity atom ionization at such temperatures and arising of the Si intrinsic conductivity. Another deficiency of Si thermoelements is its nonlinear temperature characteristics. The goal of this work is to investigate the influence of different ion implantation on the structure and properties of Si, GaAs and GaP monocrystals ( $Ba^+$  and  $P^+$  ions are under investigation). Experiments were carried out in ultrahigh-vacuum chamber with quasi spherical analyser with three grids, in vacuum  $5 \cdot 10^{-7}$  Pa. The monocrystalline samples of p-GaAs, p-GaP and Si(111) with specific resistance  $\rho = 6000 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$  were treated thermally for a long time at  $T = 1200 \text{ K}$  and for a short time at  $T = 1450 \text{ K}$ . GaAs and GaP samples were treated by  $Ar^+$  ion bombardment and further heating at  $T = 700 \text{ K}$ .

Cleaning of Si(111) surface was controlled by Auger electron spectroscopy (AES) and LEED methods. To remove the impurities of  $O_2$ , S, C, the implantation of  $Ba^+$  ions with energy  $E_0 = 0,5 \div 1 \text{ keV}$  and further heating at  $1350 \text{ K}$  are used [3]. In such a treatment  $Ba^+$  ions are removed

from Si forming compounds with impurity atoms, and only Si spectrum could be seen in AES and LEED pictures demonstrating the reversible structures of Si(111)  $7\times 7$  and Si(111)  $1\times 1$ . The surface conductivity,  $\sigma_s$ , of  $Ba^+$  implanted Si was measured by four probe method. Observing the Si(111)  $1\times 1$  surface state under  $Ba^+$  ion implantation we have found the minimal radiation doze when surface amorphisation takes place. The values of these dozes at different  $Ba^+$  ion energies are shown in Table. Minimal values of dozes caused the Si(111) surface amorphization under  $Ba^+$  ion irradiation.

| $Ba^+$ ion energy<br>( $E, eV$ )       | 500              | 1000             | 2000             | 3000             | 4000             | 5000             |
|----------------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Amorphization<br>doze ( $D, cm^{-2}$ ) | $4\cdot 10^{15}$ | $1\cdot 10^{15}$ | $8\cdot 10^{14}$ | $6\cdot 10^{14}$ | $2\cdot 10^{14}$ | $8\cdot 10^{13}$ |

One can see that for the Si(111) surface the amorphization doze decreases with increasing of ion energy.  $Ba^+$  and alkaline ion implantation into Si(111) results in overlapping of atomic wave functions of basic and dopant elements. As a result, sufficient change in density of valent electron states and the contraction of energy gap take place and silicides of dopant elements are formed [4, 5].



**Figure 1. Temperature dependence of the surface resistivity  $\sigma_s$  of BaSi.**

Our investigation has shown that  $Ba^+$  and alkaline ion implantation at low energies ( $E < 5 keV$ ) into Si(111) results in the decreasing of surface resistivity. Heating of ion implanted Si leads to the gradual increase in surface resistivity due to the desorption of injected impurity out of the adjoining surface region. According to AES data the last is related with both chemically bound and unbound injected impurity atoms in adjacent area. So the thermal dependence of the surface conductivity of ion implanted Si becomes unstable. The short (5-7min) heating of Si samples implanted with  $Ba^+$  ions under high doze at  $T = 700 K$  allows the monocrystalline BaSi silicide to be created with high sensitivity up to  $T = 550 K$ . The LEED pictures of such samples show the formation of the Si(111)  $1\times 1$  Ba superlattice. The investigation of thermal dependence of BaSi surface resistivity,  $\sigma_s$ , revealed its thermal sensitivity (Fig.1). In the range of  $T < 100 K$   $\sigma_s$  is quite



similar to the metal *Fig. 1*. The dependence of surface resistivity on  $10^3/T$  for BaSi films produced by thermal annealing of ion implanted Si. one but at  $T > 330\text{ K}$  BaSi exerts the greatest thermal sensitivity and becomes a semiconductor. Such a sample can be used as a detector in the temperature range  $T > 370\text{ K}$  in which the use of Si detectors is limited. Moreover, in the range  $550 < T < 370\text{ K}$  the dependence  $\sigma_s = 10^4/R_s$  is linear and this fact allows such a detector to be used in automatic systems of control and management.

The analysis of silicide properties shows that bulk BaSi is more thermostable than pure silicon. So, it is obvious, that one can shift the upper level of measuring temperature by widening silicide layer. It can be produced by  $\text{Ba}^+$  ion implantation with gradual lowering of their energy. In such a case the value of implantation dose must be chosen to reach uniform and gradual distribution of injected impurity (if possible).

### REFERENCES:

1. H. Schaumburg. Pseudo-Hall-Effect and its Application in Sensor Technology // Montag, 1996, 540 p.
2. Yu.V. Zaytsev, V.S. Gromov, T.S. Grigorash. Poluprovodnikovye Termoelektricheskie Preobrazovateli // Radio i Svyaz, Moskva, 1985
3. Rysbaev A.S., Khujaniyozov J.B., Bekpulatov I.R., Rakhimov A.M. // Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2017. V. 11. № 2. P. 474.
4. A.S. Rysbaev, J.B. Khujaniyozov, A.M. Rakhimov, I.R. Bekpulatov // Technical Physics, 2014, Vol. 59, №. 10, pp. 1526–1530.
5. M.T. Normuradov, A.S. Risbaev, J.B. Khujaniyozov, D.A. Normuradov // Journal of surface investigation: X-ray, synchrotron and neutron techniques. 2020. V. 14. № 5. pp. 1066-1071.

### MONOKRISTALLI KREMNIY: ISHLAB CHIQARISH, NUQSONLAR VA QUYOSH PANELLARIDAGI SAMARADORLIKNI OSHIRISH USULLARI

**A.R.To‘rayev, R.R.Burxonov**

*O‘zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Nanotexnologiyalarni rivojlantirish markazi  
O‘zbekiston, Toshkent shahar, Olmazor tumani, 100174, Universitet ko‘chasi, 4-uy  
e-mail: mypostrasul@bk.ru*

Monokristalli kremniy yarimo‘tkazgichli qurilmalar (masalan, tranzistorlar va integrallashgan sxemalar) hamda quyosh panellarining asosiy materiali hisoblanadi. U yuqori tozalik va struktura bir xilligi tufayli yuqori samaradorlikka ega, ammo ishlab chiqarish jarayonidagi nuqsonlar uning elektrofizik xususiyatlarini pasaytirishi mumkin[1].

Choxralskiy usuli monokristalli kremniy ishlab chiqarishning sanoatdagi asosiy usuli bo‘lib, uning soddaligi va yuqori sifatli kristallarni olish imkoniyati bilan ajralib turadi. Jarayon quyidagicha:

1. Tayyorlash: Polikristalli kremniy eritiladi va kvars tigelga solinadi. Eritma harorati taxminan  $1420^\circ\text{C}$  ga yetkaziladi, chunki kremniyning erish nuqtasi  $1414^\circ\text{C}$ .

2. Kristall o'stirish: Kremniy urug' (oldindan tayyorlangan monokristall bo'ladi) eritmaga botiriladi va asta-sekin tortib chiqariladi. O'sish tezligi odatda 0.5-2 mm/soat oralig'ida bo'ladi. Urug' va tigel qarama-qarshi yo'nalishda aylanadi, bu kristallning radial bir xilligini ta'minlaydi va termik fluktuatsiyalarni kamaytiradi.

3. Natija: Diametri 200-450 mm va uzunligi 2 m gacha bo'lgan monokristall hosil bo'ladi.

Ushbu usulning afzalligi – yuqori mahsuldorlik (kuniga bir necha kristall), ammo kamchiliklari – tigel ifloslanishi va energiya sarfi yuqori (taxminan 100-200 kVt-soat/kg). Alternativ usullar, vertikal zonali eritish usuli (Float-Zone, FZ-usul) usuli, kamroq kislorod aralashmasiga ega, lekin qimmatroq va kremniyning diametri cheklangan (150 mm gacha) [2].

Kremniy sifati va nuqsonlar. Kremniy sifati legirlovchi va fon aralashmalari konsentratsiyasi, shuningdek, ularning radial va aksial taqsimlanishiga bog'liq. Legirlovchi elementlar (bor-p-tipi, fosfor-n-tipi) kristallning elektr o'tkazuvchanligini belgilaydi, fon aralashmalari esa ifloslantiruvchilar (kislorod, uglerod, o'tkazuvchi metall elementlar (temir, oltin, mis) ni o'z ichiga oladi [3].

Aralashma konsentratsiyalari: Uglerod odatda  $10^{16}$ – $10^{17}$   $\text{sm}^{-3}$ , kislorod  $10^{17}$ – $10^{18}$   $\text{sm}^{-3}$  oralig'ida bo'ladi. Bu elementlar eritma va tigeldan (kvarts  $\text{SiO}_2$  dan kislorod) kiradi. O'tish metallari konsentratsiyasi  $10^{12}$ – $10^{14}$   $\text{sm}^{-3}$  gacha bo'lib, tigel materialidagi qo'shimchalardan (masalan, metall ionlari) kelib chiqadi [4].

Taqsimlanish notekisligi: Segregatsiya koeffitsienti (k) tufayli legirlovchi va fon aralashmalar kristall bo'ylab bir xil tarqalmaydi (masalan, bor uchun  $k \approx 0.8$ , kislorod uchun  $k \approx 1.25$ ). Bu aksial (uzunlik bo'ylab) va radial (kesim bo'ylab) notekislikka olib keladi.

Struktura nuqsonlari: Kristall o'sishi jarayonida o'sish bantlari (growth bands) shakllanadi – bu qatlamli yoki radial tuzilishdagi o'zgarishlar bo'lib, termik fluktuatsiyalar va aylanish tezligi tufayli paydo bo'ladi. Bundan tashqari, dislokatsiyalar ( $10^3$ – $10^5$   $\text{sm}^{-2}$ ) va vakansiyalar hosil bo'ladi.

Ushbu nuqsonlar rekombinatsiya markazlarini (Shockley-Read-Hall modeli bo'yicha: rekombinatsiya tezligi:

$$R = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)},$$

bu yerda  $\tau$  – umr vaqti) hosil qiladi. Natijada kamchilik zaryad tashuvchilar (masalan, p-tipi kremniyda elektronlar) umri qisqaradi (odatda 1 ms dan 100  $\mu\text{s}$  gacha pasayishi mumkin), bu quyosh panellarida fotovoltaik samaradorlikni 1-5% ga kamaytiradi. Yarimo'tkazgichli qurilmalarda esa bu signal shovqinini oshiradi.

**1-jadval. Asosiy aralashmalar va ularning ta'siri**

| Aralashma turi      | Konsentratsiya ( $\text{sm}^{-3}$ ) | Taqsimlanish koeffitsienti (k) | Quyosh panellariga ta'siri                                     | Yarimo'tkazgichlarga ta'siri    |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| <b>Kislorod (O)</b> | $10^{17}$ – $10^{18}$               | 1.25                           | Rekombinatsiya markazlari, umr qisqarishi (BOR-O komplekslari) | Termik donorlar, stress         |
| <b>Uglerod (C)</b>  | $10^{16}$ – $10^{17}$               | 0.07                           | Vakansiyalar bilan bog'lanib, tuzoqlar hosil qiladi            | Elektr o'tkazuvchanlikni buzadi |
| <b>Temir (Fe)</b>   | $10^{12}$ – $10^{14}$               | $8 \times 10^{-6}$             | Yuqori rekombinatsiya tezligi, samaradorlik 2-3% pasayishi     | Quvvat sarfini oshiradi         |

|                |                               |     |                                                                          |                             |
|----------------|-------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <b>Bor (B)</b> | $10^{15}-10^{16}$<br>(dopant) | 0.8 | p-tipi o'tkazuvchanlik,<br>lekin notekislik<br>rekombinatsiyani oshiradi | Rezistivlikni<br>boshqaradi |
|----------------|-------------------------------|-----|--------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|

Nuqsonlarni tozalash va passivatsiya qilish samaradorlikni oshirish uchun muhim. Quyidagi usullar tavsiya etiladi, ularning natijalari eksperimental ravishda tasdiqlangan [3]:

1. Termik ishlov berish: Kristallni  $800-1200^{\circ}\text{C}$  da 1-10 soat ishlov berish orqali kislorod va uglerod diffuziyasi rag'batlantiriladi. Bu nuqsonlarni kamaytiradi va minoritet tashuvchilar umrini 2-3 barobar oshiradi.

2. Sirt passivatsiyasi: Sirt rekombinatsiyasi (SRV – sirt rekombinatsiya tezligi)ni kamaytirish uchun  $\text{SiO}_2$  (qalinligi 10-100 nm) yoki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (yorug'likni qaytaruvchi qoplama sifatida) qatlamlari qo'llaniladi. Bu elektron va teshiklarning sirt orqali yo'qolishini 10-100 barobar kamaytiradi.

3. Bosim ostida ishlov berish: Yuqori bosim (10-100 MPa) da ishlov berish aralashmalarni bir tekis tarqatadi, dislokatsiyalarni ( $10^5$  dan  $10^3 \text{ sm}^{-2}$  gacha) kamaytiradi va **o'sish bantlarini** yo'q qiladi. Bu elektron harakatini yaxshilaydi.

4. Qo'shma element optimallashtirishi: Qo'shma element zichligini ( $10^{15}-10^{16} \text{ sm}^{-3}$ ) va taqsimlanishini boshqarish uchun bosim va termik usullar qo'llaniladi. Qo'shimcha: Aralashmalarni yig'ish (masalan, fosfor orqali aralashmalarni yig'ish).

5. Yangi usullar: "Gidrogenlash yoki ion implantatsiyasi – bu fon aralashmalarini neytrallash uchun ishlatiladi. PERC (Passivatsiya qilingan emitter va orqa qatlamli quyosh elementi) texnologiyasi quyosh panellarida samaradorlikni 22-25% gacha oshiradi [4].

Ekologik va iqtisodiy jihatdan Choxralskiy usuli chiqindilar (kvars tigel chiqindilari) va energiya sarfini oshiradi, ammo barqarorlikni yaxshilash uchun qayta ishlash texnologiyalari (masalan, kerf-less cutting) ishlatilmoqda. Xarajat: 1 kg monokristall uchun 10-20 USD, lekin samaradorlik oshishi bilan o'zini oqlaydi.

Monokristalli kremniydagi nuqsonlar quyosh panellarining samaradorligini (odatda 20-25%) pasaytiradi, ammo tozalash usullari orqali bu muammoni hal qilish mumkin. Kelajakda perovskite-kremniy gibrid panellari (samaradorlik 30% gacha) va SI bilan boshqariladigan o'stirish jarayonlari kutilmoqda [3]. Ushbu yondashuvlar quyosh energetikasini yanada samarali qiladi va global energiya muammolarini hal etishga yordam beradi.

## ADABIYOTLAR

1. Mathew J., Arian B., Aslan S., Bugeja R., La Fata D., Magro J. i dr. Understanding the Effect of Grown-in Defects in Silicon on Solar Cell Efficiency // SiliconPV Conference Proceedings.—2025.—Vol.2.
2. Rizwan M., Khan W.S., Aleena S. Monocrystalline silicon solar cells // Mater. Sol. Cell Technol. — 2021. — 88. — 148 p.
3. Mule C., Mulder D., Chen K., Nemeth W. i dr. Defect characterization of monocrystalline silicon solar cells with polysilicon passivated contact using EDMR spectroscopy // NREL/PO-5900-87262. — 2023.
4. Shi C., Shi J., Guan Z., Ge J. Surface Cleaning and Passivation Technologies for the Fabrication of High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells // Materials (Basel). — 2023. — 16(8): 3144.

## ESP32 ASOSIDA CNC PLAZMA KESISH QURILMASINI ISHLAB CHIQISH VA HARAKAT TRAYEKTORIYASINI MODELLASHTIRISH

R.M. Jalalov, A.A. Abdug'affarov, U.N. Abduqaxxorov

Namangan davlat universiteti, [rjalolov79@mail.ru](mailto:rjalolov79@mail.ru)

CNC (computer Numerical Control-kompyuter orqali raqamli boshqaruv) plazma kesish tizimlari metallga yuqori tezlikda ishlov berishda arzon va texnologik yechim hisoblanadi [1-2]. Ushbu ishda ESP32 mikrokontrolleri asosida qurilma arxitekturasini, G-koddan trayektoriya generatsiyasi, STEP/DIR impulsini real vaqtda shakllantirish hamda Torch Height Control (THC) orqali mash'ala balandligini kamon kuchlanishi bo'yicha barqarorlashtirish prinsiplari bayon etildi. Pozitsiyalash aniqligini ta'minlash uchun steps/mm hisoblash formulasi va namunaviy hisoblar keltirildi. Kesish rejimi uchun issiqlik kirishi  $Q = \eta UI/v$  munosabati asosida texnologik parametrlarni tanlash usuli ko'rsatildi. Taklif etilgan yondashuv mahalliy sharoitda plazma kesish uskunalari arzonlashtirish va ishonchlashtirishga xizmat qiladi.

Metall detallarga shakl berishda lazerli CNC tizimlar yuqori aniqlik bersa-da, quvvati va narxi jihatidan chegaralangan. Plazma kesishda elektr kamon yordamida gaz ionlashtirilib, yuqori haroratli plazma oqimi metallni kesadi; shu sabab quvvat manbai sinfiga qarab qalin metallar bilan ishlash imkoniyati paydo bo'ladi. Arzon va ixcham mikrokontrollerlar (ayniqsa ESP32) taymer/interrupt resurslari va simsiz aloqa imkoniyati hisobidan 'kam xarajatli, modulli' CNC plazma platformalarini qurishga yo'l ochadi.

**Qurilma arxitekturasini.** Tizim mexanik qism (karkas, relslar, uzatma), elektr quvvat qismi (24 V logika/drayverlar va plazma manbai), boshqaruv qismi (ESP32 + drayverlar) hamda texnologik qism (plazma konsoli va mash'ala)dan iborat. Signallar odatda G-kod ko'rinishida qabul qilinib, ESP32 tomonidan trayektoriya segmentlarga ajratiladi va STEP/DIR impulsini orqali motorlarga uzatiladi. THC sistemasi kamon kuchlanishini o'lchab, Z-o'qni dinamik to'g'irlaydi.

### 1-jadval. Tizim modullari va tavsiya etiladigan parametrlar.

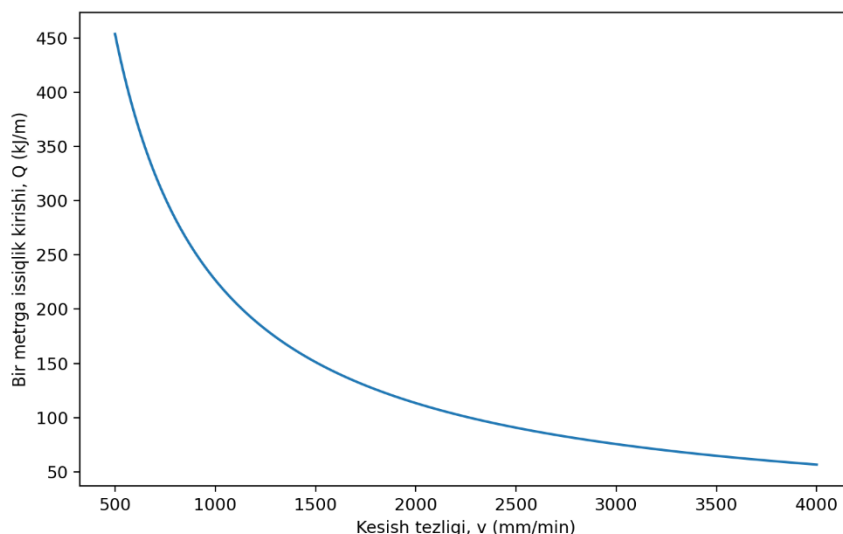
| Modul     | Misol                | Parametr                | Izoh            |
|-----------|----------------------|-------------------------|-----------------|
| Boshqaruv | ESP32                | taymer/interrupt, Wi-Fi | G-kod + stepgen |
| Drayver   | TMC2209/DRV8825      | microstep 1/16-1/32     | tok nazorati    |
| Motor     | NEMA17/NEMA23        | 200 qadam/aylanish      | moment tanlovi  |
| Uzatma    | GT2 remen            | 40 mm/aylanish          | tez va arzon    |
| THC       | V arc delitel+ADC    | 0-3.3 V                 | filtr+PID       |
| Sensorlar | limit, probe, ARC-OK | NO/NC                   | EMI himoya      |

**Kesish rejimi: issiqlik kirishi bo'yicha baholash.** Plazma kamondagi quvvat  $P \approx U \cdot I$  bo'yicha baholanadi. Birlik uzunlikka tushadigan issiqlik kirishi kesim sifatiga ta'sir qiluvchi muhim ko'rsatkich bo'lib, sodda yaqinlashuvda:

$$Q = \eta \cdot U \cdot I / v$$

bu yerda  $\eta$  – samaradorlik,  $v$  – kesish tezligi (m/s). Misol:  $U=120$  V,  $I=45$  A,  $\eta=0.7$ ,  $v=1500$  mm/min (0.025 m/s) bo'lsa  $Q \approx 151$  kJ/m (151 J/mm).  $Q$  ni haddan oshirish kesim kengayishi va shlak ko'payishiga, haddan kamaytirish esa 'to'liq kesmaslik'ka olib kelishi mumkin.

**1-rasm.  $Q=\eta UI/v$  bo‘yicha  
Q ning v ga bog‘liqligi.**



**EMI/shovqin va ishonchliligi.** Plazma konsolidagi yuqori chastotali yondirish va katta toklar kuchli elektromagnit shovqin keltirib chiqaradi. Shuning uchun signal simlarini ekranlash, yerlashni to‘g‘ri tashkil qilish, datchik kirishlarida optik izolyatsiya, kamon kuchlanishi zanjirida TVS/varistor himoyasi va apparatli avariya uzgich (E-STOP) talab qilinadi. Dasturiy darajada watchdog va avariya holatlarini jurnallash tizimni barqarorlashtiradi.

ESP32 asosida CNC plazma qurilmasini qurishda trayektoriya planlash, real-taym impuls generatsiyasi va THC orqali Z-o‘qni barqarorlashtirish asosiy injenerlik vazifalar ekani ko‘rsatildi. Steps/mm va  $Q=\eta UI/v$  munosabatlari loyiha parametrlarini tez baholash hamda texnologik rejimlarni asoslash uchun amaliy modellar sifatida taklif etildi.

#### **Foydalanilgan adabiyotlar**

1. Rodríguez M.E. Design And Construction Of A Cutting Machine Plasma CNC. SAN LUIS POTOSI, S.L.P SEPTEMBER 2021.
2. CAD/CAM Analysis 1998 Mexico Prentice Hall.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТРУКТУР Si<Yb> МЕТОДАМИ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ И СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

**М.Б. Бекмуратов**

*Институт физики полупроводников и микроэлектроники при Национальном  
университете Узбекистана, ул. Янги Алмазар, 20, Ташкент, 100057, Узбекистан  
e-mail: [mans-bek@mail.ru](mailto:mans-bek@mail.ru)*

Разработка и совершенствование материалов для полупроводниковой электроники остаются ключевыми направлениями в современной науке и технике [1-5]. Кремний, являющийся основным материалом для полупроводниковых приборов, обладает уникальными свойствами [2-8]. Однако для его дальнейшего совершенствования необходимо использовать различные методы легирования. Введение в кристаллическую решетку кремния атомов других элементов позволяет существенно изменять его свойства и открывает новые возможности для создания высокоэффективных электронных приборов.



Особое внимание уделено редкоземельным элементам (РЗЭ), таким как иттрий, диспрозий и иттербий, которые могут существенно влиять на структурные и физические свойства кремния. Легирование кремния иттербием (Yb) представляет собой область повышенного исследовательского интереса и перспективу для разработки новых полупроводниковых материалов. Этот интерес обусловлен уникальными физико-химическими свойствами иттербия, включая его низкую химическую активность и стабильное двухвалентное состояние, что делает его многообещающим кандидатом для достижения контролируемых электрических и оптических характеристик в кремниевой матрице. Как редкоземельный элемент, иттербий недостаточно изучен с точки зрения его влияния на кристаллическую структуру кремния. Однако предварительные исследования показывают, что легирование кремния иттербием может привести к значительным изменениям в его микроструктуре, включая образование дефектов, нанокристаллов и изменение фазового состава материала. Эти структурные превращения играют важную роль в определении физических свойств кремния, таких как проводимость и устойчивость к воздействию радиации.

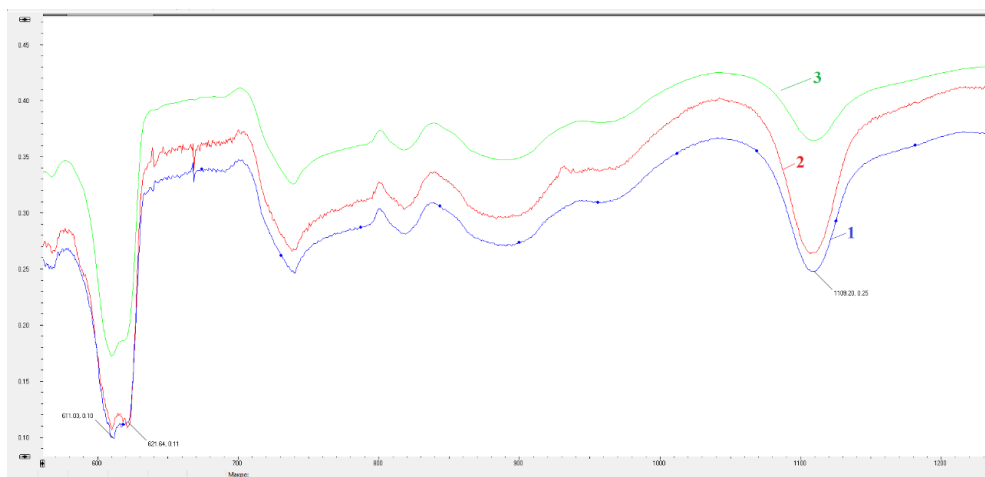
В исследовании использовались методы инфракрасная фурье-спектроскопия (ИКФС) и рамановской спектроскопии (RAMAN) для изучения фазовых изменений и распределения примесей в кремнии. Эти методы выявили снижение концентрации оптически активного кислорода, образование новых фаз и нанокристаллов, а также оценку внутренних напряжений в кристаллической решетке.

Таким образом, данное исследование направлено на углубление знаний о структурных изменениях в легированном иттербием кремнии и их влиянии на физико-химические свойства материала.

Для анализа химического состава и изучения молекулярных колебаний в легированных образцах, инфракрасная Фурье-спектроскопия (ИКФС). Спектры поглощения ИКФС были получены с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра ФСМ 2201, работающего в диапазоне от 380 до 7800  $\text{см}^{-1}$ . Метод инфракрасная фурье-спектроскопия (ИКФС) позволил определить концентрацию оптически активного кислорода  $N_O^{opt}$  в кремнии и выявить влияние иттербия на химический состав и структуру образцов. Спектральный анализ показал, что легирование иттербием снижает концентрацию  $N_O^{opt}$  на 30-40% в зависимости от концентрации введенных примесей.

Инфракрасный анализ показал, что сравнение полученных данных свидетельствует о существенном снижении концентрации оптически активного кислорода  $N_O^{opt}$  после диффузии иттербия (см. рис. 1). Легирование иттербием снижает концентрацию оптически активного кислорода на 30-40% в зависимости от концентрации добавленного элемента.

Спектры поглощения регистрировались в диапазоне от 380 до 7800  $\text{см}^{-1}$ . Концентрации кислорода и углерода определялись по интенсивности соответствующих пиков в ИК-спектрах: 1106  $\text{см}^{-1}$  для кислорода и 605  $\text{см}^{-1}$  для углерода. В исходном образце кремния по сравнению с контрольным образцом наблюдалось увеличение интенсивности пика при 1106  $\text{см}^{-1}$  на 5,74%, что указывает на небольшое увеличение концентрации кислорода. В то же время образец кремния, легированный иттербием, показал снижение интенсивности пика на 42,64% по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует о значительном уменьшении концентрации кислорода после легирования. Сравнение кремния, легированного иттербием, с исходным кремнием также выявило снижение интенсивности пика на 34,90%, что дополнительно подтверждает снижение концентрации кислорода из-за легирования.



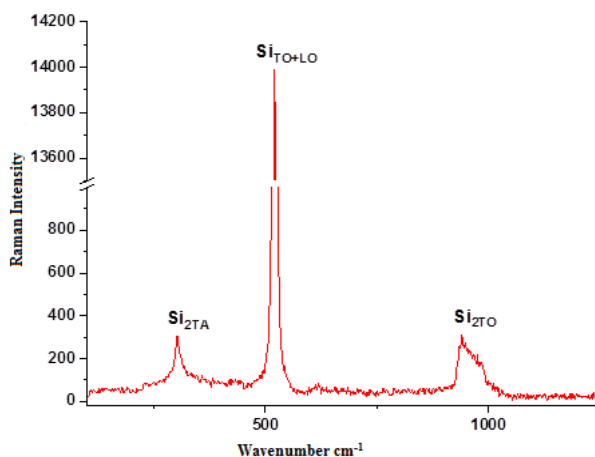
**Рис.1. Инфракрасный спектр кремниевых образцов n-типа, легированного примесью Yb. 1. контрольный; 2. исходный; 3. n-Si<Yb>.**

По сравнению с контрольным образцом исходный кремний показал небольшое увеличение интенсивности пика на  $2,66\%$  при  $605\text{ см}^{-1}$ , что указывает на небольшое увеличение концентрации углерода. Однако кремний, легированный иттербием, продемонстрировал снижение интенсивности пика углерода на  $32,45\%$ , что означает существенное снижение концентрации углерода после легирования. Сравнение легированного кремния с исходным образцом также показало снижение интенсивности пика на  $29,01\%$ , что подтверждает дальнейшее снижение концентрации углерода из-за легирования.

Исследования показывают, что вольт-емкостные характеристики структур МДП на основе кремния, легированного иттербием, демонстрируют сдвиг в сторону положительных напряжений смещения. Этот сдвиг связан с уменьшением плотности поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>, что указывает на изменение электрических свойств структуры.

Спектры комбинационного рассеяния исходного образца Si<P> показаны на рис.4. В спектре наблюдается высокий пик в области  $521\text{ см}^{-1}$  с шириной на полувысоте  $8\text{--}12\text{ см}^{-1}$ . Интенсивность рассеяния первого порядка при  $521\text{ см}^{-1}$  обусловлена поперечными (TO) и продольными (LO) оптическими фононами. В отличие от основного пика, можно наблюдать рассеяние на акустических фононах второго порядка при  $303\text{ см}^{-1}$  (TA). Некоторые авторы предполагают, что этот пик соответствует модам LA, но точного подтверждения этому факту нет. Вероятно, мы наблюдаем суперпозицию поперечных и продольных акустических мод. Также имеется широкий пик между  $920\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ , который обусловлен рассеянием нескольких поперечных оптических фононов  $\sim 2\text{TO}$  фононов. На сегодняшний день нет единого мнения о происхождении широкого пика. Некоторые авторы утверждают, что этот пик образован суперпозицией двух или более оптических мод.

В образцах, легированных иттербием (красная линия), наблюдается значительное увеличение интенсивности пиков в диапазоне от  $200$  до  $300\text{ см}^{-1}$  по сравнению с контрольными образцами (черная линия). Это может указывать на структурные изменения, вызванные легированием, такие как увеличение количества дефектов или образование новых фаз в материале.



**Рис.2. Спектр комбинационного рассеяния исходного кремния. Колебательные моды: Si 2TA – 303  $\text{cm}^{-1}$ , Si TO+LO – 521  $\text{cm}^{-1}$ , Si 2TO – 920-1000  $\text{cm}^{-1}$**

Также можно отметить, что образцы, легированные иттербием, демонстрируют сдвиги пиков по сравнению с контрольными образцами. Это явление может быть связано с изменениями межатомных расстояний и внутренних напряжений в кристаллической решетке, вызванными введением иттербия. График показывает, что различные методы легирования или обработки образцов (например, распыление, диффузия) приводят к различным интенсивностям пиков, что указывает на различия в структуре и распределении иттербия в кремниевой матрице.

Легирование также приводит к заметному снижению концентрации оптически активного кислорода на 30-40%, что свидетельствует о влиянии иттербия на химический состав и взаимодействие атомов кремния с кислородом и углеродом. Образование новых фаз и нанокристаллов в легированных образцах сопровождается сдвигами в спектрах и увеличением интенсивности пиков, что отражает существенные изменения межатомных взаимодействий и наличие внутренних напряжений в кристаллической решетке.

Более того, рассчитанный коэффициент диффузии иттербия в кремнии показывает относительно низкое значение, что указывает на медленный процесс диффузии, типичный для редкоземельных металлов. Изменения электрических характеристик материала проявляются в снижении плотности поверхностных состояний на границе Si-SiO<sub>2</sub> и наличии глубоких уровней с энергией ионизации  $E_c = 0,32$  эВ.

В целом полученные результаты свидетельствуют о комплексном влиянии легирования иттербием на структуру и свойства кремния. Это делает метод перспективным для использования в полупроводниковой электронике и оптоэлектронике. Полученные данные открывают новые возможности для дальнейших исследований и оптимизации технологических процессов при разработке новых полупроводниковых материалов с улучшенными характеристиками.

### Литература

1. L.T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers," Appl. Phys. Lett. 57, 1046-1990. <https://doi.org/10.1063/1.103561>
2. F. Huisken, H. Hofmeister, B. Kohn, M.A. Laguna, and V. Paillard, "Laser production and deposition of light-emitting silicon nanoparticles," Appl. Surf. Sci. 154-155, 305 (2000). [https://doi.org/10.1016/s0169-4332\(99\)00476-6](https://doi.org/10.1016/s0169-4332(99)00476-6)
3. V. Vinciguerra, G. Franzo, F. Priolo, F. Iacona, and C. Spinella, "Quantum confinement and

- recombination dynamics in silicon nanocrystals embedded in Si/SiO<sub>2</sub> superlattices,” J. Appl. Phys. 87, 8165 (2000). <https://doi.org/10.1063/1.373513>
4. F. Koch, and V. Petrova-Koch, “Light from Si-nanoparticle systems - a comprehensive view,” J. Non-Cryst. Solids, 198–200, 840 (1996). [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(96\)00067-1](https://doi.org/10.1016/0022-3093(96)00067-1)
  5. Zh. Ma, X. Liao, J. He, W. Cheng, G. Yue, Y. Wang, and G. Kong, “Annealing behaviors of photoluminescence from SiO<sub>x</sub>:H,” J. Appl. Phys. 83, 7934 (1998). <https://doi.org/10.1063/1.367973>
  6. M. Zaharias, H. Freistdt, F. Stolze, T.P. Drusedau, M. Rosenbauer, and M. Stutzmann, “Properties of sputtered a-SiO<sub>x</sub>:H alloys with a visible luminescence,” J. Non-Cryst. Solids, 164–166, 1089 (1993). [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(93\)91188-9](https://doi.org/10.1016/0022-3093(93)91188-9)
  7. U. Kahler, and H. Hofmeister, “Silicon nanocrystallites in buried SiO<sub>x</sub> layers via direct wafer bonding,” Appl. Phys. Lett. 75, 641 (1999). <https://doi.org/10.1063/1.124467>
  8. S. Zhang, W. Zhang, and J. Yuan, “The preparation of photoluminescent Si nanocrystal–SiO<sub>x</sub> films by reactive evaporation,” Thin Solid Films, 326, 92 (1998). [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)00532-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)00532-X)

## PHASE COMPOSITION OF THE SURFACE OF p-Si DOPED WITH Er AND Cr

**Kh.J. Matchonov**

*Institute of Semiconductor Physics and Microelectronics at the National University of  
Uzbekistan*

*e-mail: [husniddin94\\_04@bk.ru](mailto:husniddin94_04@bk.ru)*

Currently, solid-state electronic devices are used worldwide in virtually all fields of science and technology. It has been shown in detail in the literature that the phase state and local coordination of Er<sup>3+</sup> (silicide phases such as ErSi<sub>2-x</sub>, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oxides, Er<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and Er<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> silicates, as well as Er centers in Si shells of nanoclusters) critically affect the nature and quantum yield of luminescence, as well as the stability of emission at high pump densities [1-2]. At the same time, the possibility of implementing controlled Er<sup>3+</sup> emission centers in nanophotonic structures based on Si and SOI platforms, up to single quantum emitters in resonant nanodisks, microdisk lasers, and integrated waveguides, has been demonstrated [3]. Chromium (Cr) in the silicon–metallide system is traditionally considered as a component that forms the semiconductor silicide CrSi<sub>2</sub> with a narrow band gap and pronounced thermoelectric and contact properties. Thin layers of CrSi<sub>2</sub> and ensembles of CrSi<sub>2</sub>/Si(111) nanocrystallites are used as low-resistance ohmic contacts, thermoelectric elements, and infrared-sensitive structures.

In this study, we investigated single-crystal p-type silicon samples. A series of samples with varying doping levels were prepared from these samples. These included initial p-Si (N. 1), control p-Si after annealing (N. 2, 6), p-Si<Cr> (N. 3, 7), p-Si<Er> (Nos. 4, 8), and p-Si<Er,Cr> (N. 5, 9).

Table 1 presents the summary results of EDS analysis of the composition of the near-surface layers of samples 1–9 (weight fractions of elements, wt %). Changes in the contents of Si, Er, Cr, O, and C are shown for pairs of samples differing in the type of alloying and cooling mode; the observed enrichment levels in heavy components and oxygen are comparable with the

characteristic ranges for the forming Er-containing and  $\text{CrSi}_2$ -like phases in the Si:Er:O and Si:Cr systems.

Table 1.

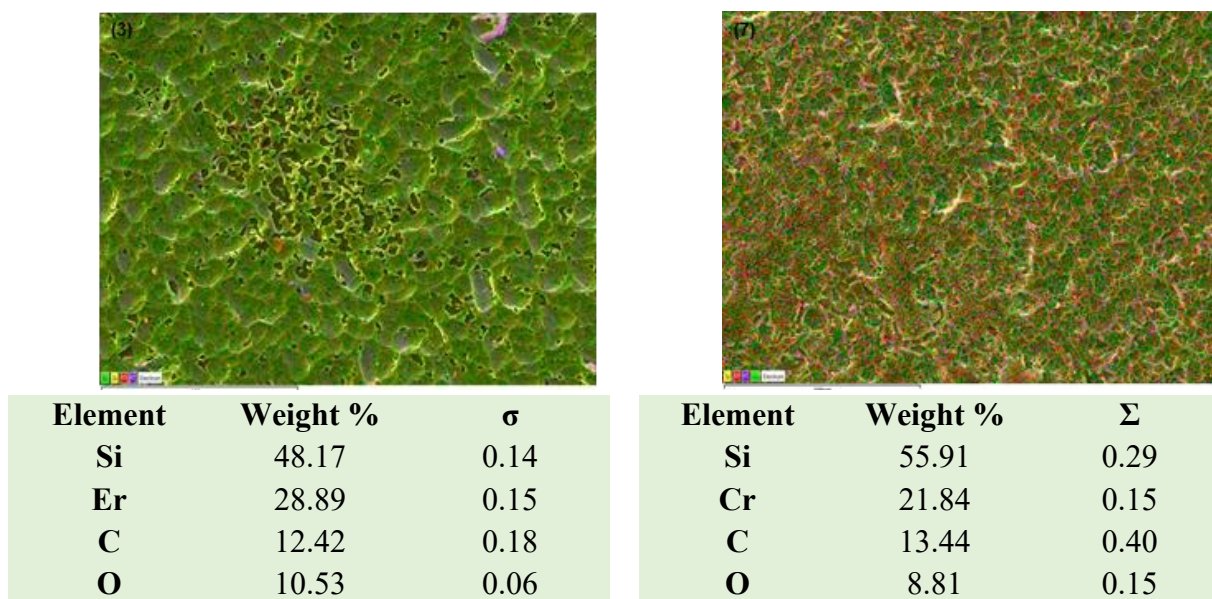
Mass fractions of elements (weight %) and standard deviations  $\sigma$  based on EDS (Map Sum Spectrum) data for samples 1–9

| N <sup>o</sup> | Comp.          | Cooling mode | Si (mas. %) | $\sigma$ (Si) | Er (mas. %) | $\sigma$ (Er) | Cr (mas. %) | $\sigma$ (Cr) | O (mas. %) | $\sigma$ (O) | C (mas. %) | $\sigma$ (C) | S (mas. %) | $\sigma$ (S) |
|----------------|----------------|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 1              | p-Si (orig.)   | –            | 88.32       | 0.43          | –           | –             | –           | –             | 0.36       | 0.06         | 11.32      | 0.43         | –          | –            |
| 2              | p-Si (control) | fast         | 62.65       | 0.29          | –           | –             | –           | –             | 0.65       | 0.05         | 36.70      | 0.29         | –          | –            |
| 3              | p-Si<Cr>       | fast         | 48.17       | 0.14          | 28.89       | 0.15          | –           | –             | 10.53      | 0.06         | 12.42      | 0.18         | –          | –            |
| 4              | p-Si<Er>       | fast         | 89.72       | 0.38          | –           | –             | –           | –             | 0.35       | 0.05         | 9.94       | 0.38         | –          | –            |
| 5              | p-Si<Er,Cr>    | fast         | 39.44       | 0.17          | 27.46       | 0.21          | –           | –             | 14.56      | 0.11         | 18.23      | 0.26         | 0.31       | 0.02         |
| 6              | p-Si (control) | slow         | 87.57       | 0.62          | –           | –             | –           | –             | 1.00       | 0.10         | 11.43      | 0.62         | –          | –            |
| 7              | p-Si<Cr>       | slow         | 55.91       | 0.29          | –           | –             | 21.84       | 0.15          | 8.81       | 0.15         | 13.44      | 0.40         | –          | –            |
| 8              | p-Si<Er>       | slow         | 85.53       | 0.43          | –           | –             | –           | –             | 1.13       | 0.07         | 13.34      | 0.43         | –          | –            |
| 9              | p-Si<Er,Cr>    | slow         | 82.85       | 0.44          | –           | –             | –           | –             | 0.71       | 0.06         | 16.44      | 0.44         | –          | –            |

In Cr-doped samples (No. 3, 7), contrasting areas are observed that stand out against the background of the silicon matrix (Fig. 1). Upon slow cooling (sample 7), such areas correlate with zones of increased Cr and O content (Si 55.9 wt.%, Cr 21.8 wt.%, O 8.8 wt.%), which allows them to be interpreted as particles of a silicide, oxide Cr phase, close to  $\text{CrSi}_2$  with an oxide shell  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and reflecting the equilibrium state of p-Si<Cr> under the selected conditions. Upon rapid cooling (sample 3), on the contrary, EDS records a high Er content ( $\approx 29$  wt.%) and O in the absence of detectable Cr, and the SEM contrast indicates a disordered near-surface morphology. This combination is inconsistent with the nominal p-Si<Cr> composition and is interpreted as the result of a metastable Si–Er–O system formed due to the recondensation of Er-containing components during combined annealing in a common ampoule. Importantly, such Er-enriched regions are localized and technologically unrepresentative of the Cr-doped series. Henceforth, sample 3 is considered specifically as a marker of the metastable state, while sample 7 is used to describe the equilibrium p-Si<Cr>.

The phase state of the subsurface layers of the p-Si–Er–Cr–O system after annealing at 1200°C is determined by a combination of the doping type (Er, Cr, Er+Cr) and the cooling method. It is shown that varying the cooling rate at fixed annealing parameters leads to qualitatively different distributions of Er, Cr, O, and C, consistent with the high sensitivity of phase transformations in the Si<Er> and Si<Cr> systems to thermal history and oxygen partial pressure.





**Figure 1. SEM and EDS for Cr-doped samples (3 and 7). High-contrast regions with increased Cr content and decreased Si fraction are interpreted as near-surface  $\text{CrSi}_2$ -like phases, the formation of which is consistent with data on the growth and morphology of chromium silicide in Cr-Si systems.**

For undoped and Er-doped p-Si, the main controlled parameter is the degree of carbon contamination of the surface. Rapid cooling preserves C-rich subsurface layers with a developed microrelief, while slow cooling leads to partial recrystallization and “self-cleaning” of the surface to a composition close to the original p-Si. Er-containing phases are localized predominantly in deep regions or as finely dispersed inclusions. In Cr-alloyed samples, slow cooling stabilizes the  $\text{CrSi}_2$ -like layer with a  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  oxide shell as a quasi-equilibrium p-Si<Cr> state, whereas quenching fixes metastable multicomponent Si–Er–O states caused by recontamination during co-annealing.

With Er+Cr co-doping, rapid quenching forms Er-rich oxide-silicide phases in the near-surface region against a Cr-containing matrix, while slow cooling transfers Er- and Cr-containing fragments predominantly into the bulk, leaving the surface close to purified Si. Taken together, the constructed EDS heat map of compositions, qualitative map of near-surface phase states, and reaction-phase diagram for p-Si–Er–Cr–O demonstrate that the combination of Er+Cr co-doping and cooling rate selection can be used as an effective technological “tuning parameter” for targeted control of the microstructure and phase composition of near-surface layers in applications such as silicon photonics, thermoelectrics, and the formation of thermally stable contact structures.

### References

1. Daliev K.S., Utamuradova S.B., Bahronkulov Z.E., Khaitbaev A.Kh., Hamdamov J.J. Defect Structure of Silicon Doped with Erbium. *East European Journal of Physics* 4(3), 193–196 (2023).
2. Daliev K.S., Bahronkulov Z.E., Hamdamov J.J. Investigation of the Magnetic Properties of Silicon Doped with Rare-Earth Elements. *East European Journal of Physics* 4, 167–171 (2023).
3. Utamuradova S.B., Daliev K.S., Bahronkulov Z.E., Khaitbaev A.Kh., Hamdamov J.J. Surface Morphology Analysis of Silicon Doped with Erbium Atoms. *E3S Web of Conferences* 500, 07009 (2024).

## ZAMONAVIY QUYOSH FOTOELEMENTLARI, YARIMO'TKAZGICHLAR FIZIKASI VA SAMARADORLIKNI OSHIRISH TEXNOLOGIYALARI

**M.O. Bo'ronov**

*O'zbekiston Milliy universiteti, Fizika fakulteti*

*e-mail: [musobek658@gmail.com](mailto:musobek658@gmail.com)*

Global energiya iste'moli va issiqxona gazlari chiqarilishi keskin oshib, ekologik muammolar kuchaydi. Shu nuqtai nazardan, quyosh energiyasi ekologik toza, cheksiz va samarali manba sifatida muhim ahamiyat kasb etadi. Quyosh bilan ishlovchi qurilmalarning asosiy texnologik elementi yarimo'tkazgichlar bo'lib, ularning fizik xususiyatlari quyidagi asoslarda ishlaydi: yarimo'tkazgichlarda valent elektronlar bandi va o'tkazuvchanlik bandi mavjud bo'lib, ular orasidagi band gap energiyasi quyosh nuri bilan o'zaro ta'sirni belgilaydi. Absolyut nol haroratda valent elektronlar bandi to'liq to'la, o'tkazuvchanlik bandi esa bo'sh bo'ladi; harorat oshishi bilan elektronlar qo'zg'alib, bo'shliqlar bilan birga elektr yuklarini hosil qiladi.

Yarimo'tkazgichlar to'g'ridan-to'g'ri band gapli va to'g'ridan bo'lmagan (indirekt) band gapli turlarga bo'linadi. To'g'ridan-to'g'ri band gapli materiallar, masalan, GaAs va ZnO, foton energiyasini bevosita elektronlarni valent elektronlar bandidan o'tkazuvchanlik bandiga ko'tarish uchun ishlatadi va yorug'likni kuchli yutadi. To'g'ridan bo'lmagan band gapli materiallar, masalan, Si, elektron o'tishi uchun qo'shimcha jarayon (fonon) talab qiladi va yutilish koeffitsienti pastroq bo'ladi.

Fotovoltaik effekt va modul fizikasi. Fotovoltaik effekt — yorug'lik nurlarini elektr energiyasiga aylantirish jarayoni bo'lib, foton energiyasi band gapdan yuqori bo'lganda yarimo'tkazgichda elektron-bo'shliq juftlari hosil bo'ladi. Har bir materialning o'ziga xos chegara to'lqin uzunligi mavjud bo'lib, undan kattaroq to'lqinlar yutilmaydi. Yutilish koeffitsienti qancha yuqori bo'lsa, yorug'lik materialga kirgan joyda shunchalik samarali yutiladi.

Bitta quyosh elementi p-n o'tishiga ega bo'lgan fotodiod kabi ishlaydi, unda fototok manbai, ichki ketma-ket va parallel qarshiliklar mavjud bo'lib, ular fotoifoda kuchlanishi va oqimini belgilaydi. Bir nechta elementlar ketma-ket va parallel ulanish orqali modul hosil qiladi. Modul samaradorligi ichki rekombinatsiya, optik yo'qotishlar hamda metallizatsiya va kontakt tizimlaridagi issiqlik yo'qotishlariga bog'liq bo'ladi.

Yarimo'tkazgichlar va zamonaviy texnologiyalar. Bugungi kunda global PV bozorining asosiy qismi silikon modullari tomonidan egallangan. Ularning ishlab chiqarilishi energetik jihatdan talabchan va qimmat bo'lsa-da, Si Yer qobig'ida keng tarqalganligi sababli arzon material sifatida keng qo'llaniladi. Si modullari samaradorligini oshirish uchun BSF texnologiyasidan PERC texnologiyasiga o'tish, katta ingot va waferlardan foydalanish, metallizatsiya va kontakt tizimlarini mukammallashtirish kabi innovatsion yutuqlar amalga oshirildi, bu esa ichki yo'qotishlarni kamaytirishga yordam beradi. Shu bilan birga, murakkab III–V guruh yarimo'tkazgichlari orqali multi-junction modullar yaratilib, samaradorlik Si modullaridan ancha yuqori bo'lishi mumkin, ammo ularning asosiy kamchiligi yuqori material narxi va murakkab ishlab chiqarish jarayonidir.

CdTe va CIGS modullari ham Si modullari bilan raqobatlasha oladi; ular yuqori yutilish va yupqa qatlam texnologiyasiga ega bo'lib, arzon ishlab chiqarish imkonini beradi. Ammo Cd chiqindilarining ekologik xavfi va ingichka plyonkalardagi defektlar muammo tug'diradi.

Perovskit quyosh elementlari PV sohasidagi eng tez rivojlanayotgan material hisoblanadi; ular yuqori samaradorlikka ega, moslashuvchan energetik struktura va arzon ishlab chiqarish imkonini beradi. Shu bilan birga, ularning barqarorligi harorat, namlik va havo sharoitlariga sezgir, hissiyot (histerezis) va plyonka sifatining pastligi muammolari mavjud. Ko‘pgina yuqori samarali va barqaror qurilmalar qo‘rg‘oshin tarkibida bo‘lib, ekologik xavf tug‘diradi. Tijoratlashtirish uchun himoya qoplamalari kuchaytirish, Pb chiqindilarini cheklovchi texnologiyalarni joriy qilish va interfasial hamda o‘lchamli injiniring orqali barqarorlikni oshirish zarur.

Samaradorlikni oshirish uchun yorug‘lik boshqaruvi va spektrni moslashtirish, passivatsiya texnologiyalari (PERC, TOPCon, HJT), nano-materiallar (grafen va super-materiallar) asosidagi interfasial qatlamlar va rekombinatsiyani kamaytirish yo‘llari qo‘llaniladi. Global energiya ta‘minotining kelajagi quyosh energetikasiga bog‘liq bo‘lib, uch asosiy talab — samaradorlik, barqarorlik va masshtablanuvchanlikni bir vaqtda ta‘minlash orqali ekologik toza va arzon quyosh energiyasiga erishish mumkin.

Zamonaviy quyosh energetikasi global energiya ta‘minotining eng tez o‘sayotgan yo‘nalishi bo‘lib, yarimo‘tkazgichlarning fizik xususiyatlarini chuqur tushunish PV texnologiyalarini rivojlantirish uchun asosiy ahamiyatga ega. Si modullari bozorda yetakchi bo‘lsa-da, III-V ko‘p o‘tishli elementlar, CdTe, CIGS va ayniqsa perovskitlar yangi avlod quyosh modullarining asosini tashkil etmoqda. Samaradorlikni oshirish, barqarorlikni ta‘minlash va tijoriy qo‘llanilishini kengaytirish uchun yangi materiallar va texnologik yondashuvlar zarur. Shu orqali ekologik toza, arzon va samarali quyosh energetikasini rivojlantirish mumkin.

### ADABIYOTLAR

1. Siegler, T.D.; Shimpi, T.M.; Sampath, W.S.; Korgel, B.A. Development of wide bandgap perovskites for next-generation low-cost CdTe tandem solar cells. *Chem. Eng. Sci.* 2019, 199, 388–397.
2. Alaaeddin, M.H.; Sapuan, S.M.; Zuhri, M.Y.M.; Zainudin, E.S.; AL-Oqla, F.M. Photovoltaic applications: Status and manufacturing prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 102, 318–332.
3. Kant, N.; Singh, P. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Mater. Today Proc.* 2022, 56, 3460–3470.
4. Buitrago, E.; Novello, A.M.; Meyer, T. Third-Generation Solar Cells: Toxicity and Risk of Exposure. *HCA* 2020, 103, e2000074.

## OPTICAL PROPERTIES OF PEROVSKITE QUANTUM DOTS-BASED LUMINESCENT SOLAR CONCENTRATORS

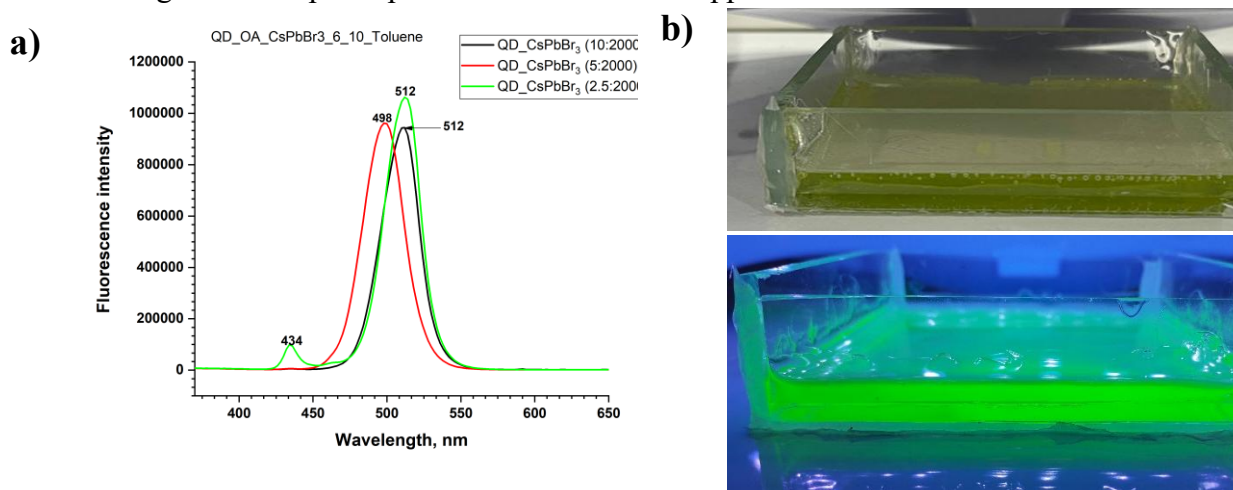
A.D. Nurimov<sup>\*1</sup>, Sh.M. Davurov<sup>1</sup>, E.S.Sherkulov<sup>1</sup>, L.A.Joraboyev<sup>1</sup>, I.Saydullayeva<sup>1</sup>,  
Anvar Zakhidov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samarkand State University named after Sharof Rashidov

<sup>2</sup>University of Texas at Dallas

\*e-mail: [nurimov-alisher@samdu.uz](mailto:nurimov-alisher@samdu.uz)

Building-integrated photovoltaic (BIPV) systems incorporate photovoltaic elements directly into architectural structures by placing solar devices on façades, rooftops, windows, and other building components to produce clean, renewable energy [1]. Nonetheless, conventional BIPV technologies face notable limitations—their substantial weight, rigidity, and lack of transparency restrict design flexibility and reduce their ability to utilise diffuse light [2]. In recent years, luminescent solar concentrators (LSCs) have emerged as a promising alternative for BIPV applications due to their simple architecture, low fabrication costs, and tunable transparency [3]. In addition, the color and geometric form of LSCs can be readily customized to satisfy aesthetic design needs. A standard LSC is composed of luminescent species embedded within a transparent waveguide. These luminescent components absorb incident sunlight and re-emit it at longer wavelengths, after which the emitted photons are guided toward the device edges via total internal reflection [4]. At the edges, the guided photons are captured by photovoltaic cells to produce electrical power. Consequently, the selection and engineering of luminescent materials are crucial for enhancing both the optical performance and visual appearance of LSC devices.



**Figure 1. (a) Photoluminescence spectra of CsPbBr<sub>3</sub> quantum dots prepared at different Cs<sup>+</sup>:Pb<sup>2+</sup> precursor ratios. (b) CsPbBr<sub>3</sub> QDs based luminescent solar concentrator under ambient light. (c) The LSC under UV illumination.**

A precursor solution with a concentration of 0.1 M was prepared by dissolving 21.6 mg of CsBr and 36.7 mg of PbBr<sub>2</sub> in 1 mL of dimethyl sulfoxide (DMSO) at room temperature, followed by magnetic stirring for 4 hours. Octylammonium bromide (OABr) was used as the ligand. To prepare the ligand solution, 150  $\mu$ L of the precursor solution was mixed with 3.3 mg of OABr. In a separate step, 3 mL of toluene was employed as an antisolvent and stirred at 700 rpm to form a



stable vortex. Subsequently, 50  $\mu\text{L}$  of the ligand solution was rapidly injected into the vortexing toluene.

A polymer matrix was prepared by dissolving 10 g of PMMA in 25 mL of toluene, yielding a 0.4 g/mL solution. Then, 3 mL of the quantum dot (QD) dispersion was added to the polymer solution, and the mixture was thoroughly homogenized to ensure uniform distribution of QDs. The resulting QD–PMMA solution was cast into a tray-shaped mold and allowed to dry under ambient conditions for 48 hours. After complete solvent evaporation, the top glass layer was attached using the same polymer solution to improve mechanical stability.

Device characterization revealed that the series-connected Ixolar and silicon-based solar cells achieved power conversion efficiencies of approximately 1% and 0.5%, respectively.

#### REFERENCES:

- [1] W. Li *et al.*, “Optimizing MAPbBr<sub>3</sub> quantum dots based luminescent solar concentrators for enhanced photoelectric performance and aesthetic characteristics,” *Opt. Mater.*, vol. 162, p. 116884, May 2025, doi: 10.1016/j.optmat.2025.116884.
- [2] J. Li, S. Zheng, X. Zhao, A. Vomiero, and X. Gong, “Ultrahighly-efficient and stable luminescent solar concentrators enabled by FRET-based carbon nanodots,” *Nano Energy*, vol. 134, p. 110514, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.110514.
- [3] J. Song, C. Kim, S. Lee, H. Lee, J. Seo, and H.-J. Song, “Recent Advances on the Luminescent Solar Concentrator Employing Quantum Dots,” *Korean J. Chem. Eng.*, vol. 41, no. 13, pp. 3573–3592, Dec. 2024, doi: 10.1007/s11814-024-00248-5.
- [4] J. Wu *et al.*, “Efficient and Stable Thin-Film Luminescent Solar Concentrators Enabled by Near-Infrared Emission Perovskite Nanocrystals,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 59, no. 20, pp. 7738–7742, 2020, doi: 10.1002/anie.201911638.

#### DEVELOPMENT AND QUANTUM-TRANSPORT ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES WITH QUANTUM-DOT ARRAYS FOR SOLAR-ENERGY FIELD-EFFECT DEVICES

**Kh. Kamalov\*, A. Khudaybergenov, K. Kadirbaeva**

*Karakalpak State University, Department of Physics*

*Uzbekistan, Nukus, 230100, Ch. Abdirov Street*

*\*e-mail: khayratdinkamalov@gmail.com*

e-mail: [abdumuxammedxudaybergenov@gmail.com](mailto:abdumuxammedxudaybergenov@gmail.com)

In this work, we apply the nonequilibrium Green’s function (NEGF) formalism to analyze quantum transport, tunneling broadening, and resonant transmission in QD-integrated FET structures. Building on physical arguments from semiconductor device theory, we also investigate a hybrid photovoltaic architecture where a MOSFET or JFET acts not merely as an electrical switch but as a quantum energy filter directly coupled to a solar absorber. Only high-energy carriers can contribute to the output current because the gate-controlled potential barrier sets the minimum electron energy needed for transmission. We simulate how adding a conventional FET to a solar panel alters the I–V characteristics after first modeling the behavior of QD-FETs in order to link theory and practice. Transistor-assisted energy filtering can improve the effective conversion



efficiency of solar-energy systems, as demonstrated by MATLAB-generated findings based on parameters from reputable books and peer-reviewed studies.

In this study, we begin by examining the fundamental behavior of a single quantum dot (QD) before moving to more complex structures. Investigating a single QD is essential because it allows us to understand how an isolated confined energy level interacts with the left and right contacts. Once the behavior of an individual QD is fully understood, we extend our analysis to an array of quantum dots. This step enables us to explore how coupling, level alignment, and collective effects modify the overall transport characteristics in more realistic device architectures.

For a single quantum dot connected to left and right contacts, the electron transmission is:

$$T(E) = \frac{\Gamma_L \Gamma_R}{(E - E_0)^2 + \left(\frac{\Gamma_L + \Gamma_R}{2}\right)^2},$$

where  $E_0$  is the discrete energy level of the QD, and  $\Gamma_L, \Gamma_R$  describe contact-induced level broadening.

## 2.2 General Landauer–Datta current formula

In this article, the current is expressed using the generalized Landauer–Datta multi-terminal formulation:

$$I_i = \frac{e^2}{2\pi\hbar} \sum_j (T_{j,i} V_i - T_{i,j} V_j),$$

where:

- $I_i$  — current flowing from terminal  $i$
- $T_{i,j}$  — transmission from terminal  $i$  to  $j$
- $V_i$  — electrochemical potential of terminal  $i$

This form is a more complete generalization of the usual two-terminal Landauer formula and is suitable for QD-FET structures with multiple interacting regions.

## 2.3 Quantum confinement energy

For a spherical QD, the approximate confinement energy spectrum is:

$$E_{n,l} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* R^2},$$

where  $R$  is the QD radius and  $m^*$  the effective mass of the electron.

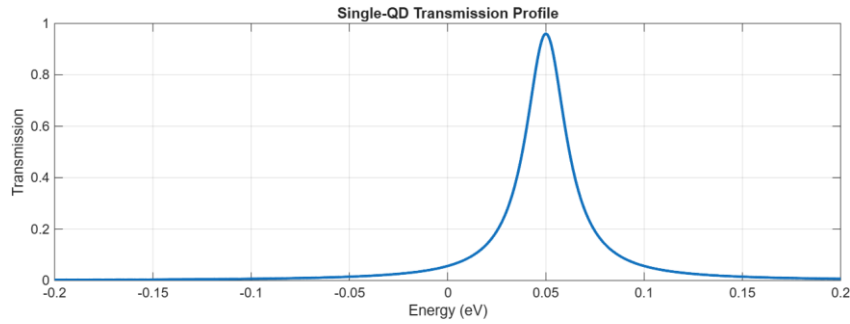
## 2.4 Level broadening from NEGF

Within the NEGF formalism, broadening is given by:

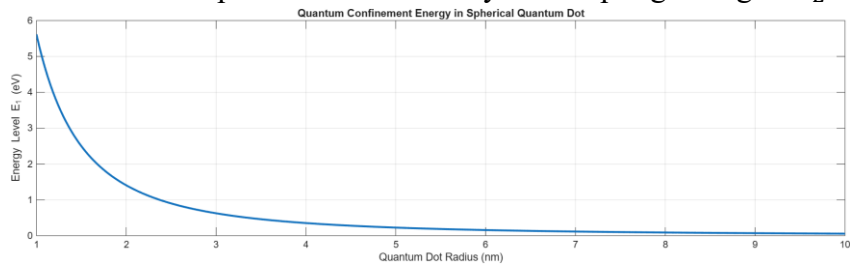
$$\Gamma_{L,R} = i(\Sigma_{L,R} - \Sigma_{L,R}^\dagger),$$

where  $\Sigma_{L,R}$  are the self-energy matrices describing coupling to contacts.

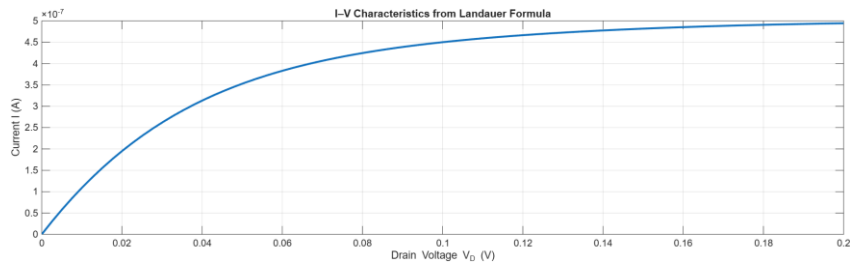
The numerical results obtained using the NEGF model and MATLAB simulations are presented in this section. Each figure corresponds to a theoretical aspect discussed previously, illustrating physical behavior in quantum-dot–integrated semiconductor channels.



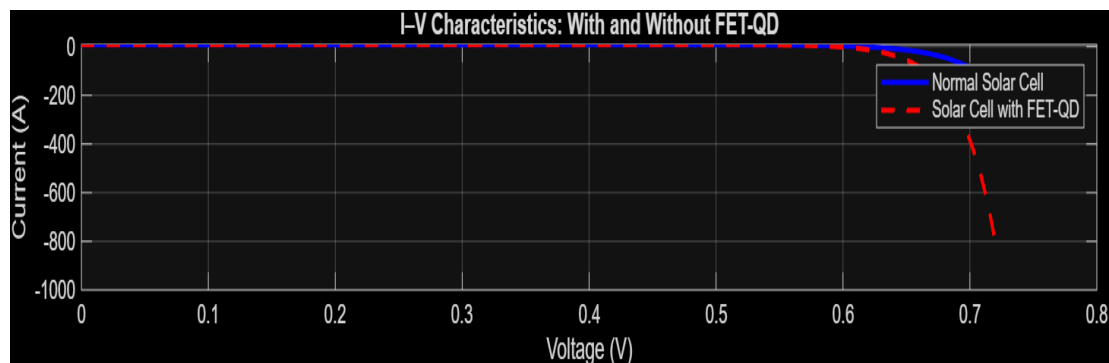
**Figure 1: Transmission spectrum  $T(E)$  for a single quantum dot showing Lorentzian-type resonant behavior at the discrete quantum-dot energy level  $E_0$ .** The single resonant peak marks the energy at which carriers tunnel efficiently through the QD. The width of the peak is determined by the coupling strengths  $\Gamma_L$  and  $\Gamma_R$ .



**Figure 2: Energy confinement as a function of quantum-dot radius  $R$ .** Smaller radii produce larger confinement energies due to the inverse-square dependence. The figure highlights strong quantum-size effects, fundamental for tuning photovoltaic FET device behavior.



**Figure 3: Calculated I–V characteristics based on the generalized Landauer–Datta formula.** Nonlinear current response arises from resonant tunneling through QD states. The method of using QDs to filter hot carriers in solar-energy devices is supported by the nonlinearities, which highlight the significance of energy-selective transport.



**Figure 4: I–V characteristics of the solar panel with and without the FET–QD structure.**

The P-V characteristic highlights the increased maximum power extraction achieved when the FET-QD assembly is linked to the solar cell. A typical single-peak shape on the reference curve represents the panel’s maximum power point (MPP). After the FET-QD device is integrated, the power curve rises significantly higher and its peak swings outward, suggesting increases in both voltage and current at the MPP.

### **REFERENCES**

- [1] Kamalov Kh.U., Khudaybergenov A.R. (2025). Comparative Analysis of Cubic and Spherical Quantum Dots for Field-Effect Transistor Modeling with GaAs MOSFET. Science and Education in Karakalpakstan, No. 3/2, pp. 390.
- [2] Kamalov Kh.U., Khudaybergenov A.R. Modeling and Simulation of Quantum-Dot-Based Field-Effect Transistor: Creating MATLAB Listings for Virtual Results.
- [3] Utegenovna D.A., Serikbayevna H.B., Mahsenovna T.Z., Chairkenovich B.K., Bolatbayevna S.Z. (2014). Development inverter FET together with solar panels. Advances in Environmental Biology, 8, 325–329.
- [4] Datta S. (2005). Quantum Transport: Atom to Transistor. Cambridge University Press.
- [5] Bal Krishan, Meenu Rani Garg (2015). A Literature Review on Quantum Dots. IJAREEIE, 4(9), 7857–7862.
- [6] Zhang J., Kivshar Y. (2024). Quantum Metaphotonics: Recent Advances and Perspectives. APL Quantum, 1, 020902.
- [7] Ding S., Zhao S., Huang H., Grillot F. (2024). Observation of amplitude squeezing in quantum-dot lasers. APL Quantum, 1, 026104.
- [8] Muto Y., et al. (2024). Visual explanations of ML models estimating quantum-dot charge states. APL Machine Learning, 2, 026110.
- [9] Busser C.A. (2024). Using Kondo entanglement to induce spin correlations in quantum dots. J. Appl. Phys., 135.
- [10] Ferry D.K., Weinbub J., Nedjalkov M., Selberherr S. (2022). Review of quantum transport in FETs. Semicond. Sci. Technol., 37.
- [11] Wang D., Noel V., Piro B. (2016). Electrolytic-gated OFETs for biosensing. Electronics, 5(9).
- [12] Golod T., Krasnov V.M. (2022). Superconducting diode-with-memory. Nat. Commun., 10.
- [13] Warnes L.A.A. (1994). Diodes. PhD Thesis, Loughborough University.

### 3 – SHO'BA. QAYTA TIKLANUVCHI ENERGIYA MANBALARIDAN FOYDALANISHNING AMALIY JIHALTLARI

#### QUYOSH PANELLARI YUZASIDA CHANG TO'PLANISHINI NAZORAT QILUVCHI OPTOELEKTRON QURILMA

**O.X. Qo'ldashov<sup>1</sup>, D.O. Nabiev<sup>1</sup>, A.A.Valixonov<sup>2</sup>, A.A.Aliev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi Yarimo'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika  
ilmiy-tadqiqot instituti*

<sup>2</sup>*Farg'ona davlat texnika universiteti*

*O'zbekiston, Toshkent sh, Yangi Olmazor ko'chasi 20 uy. 100069*

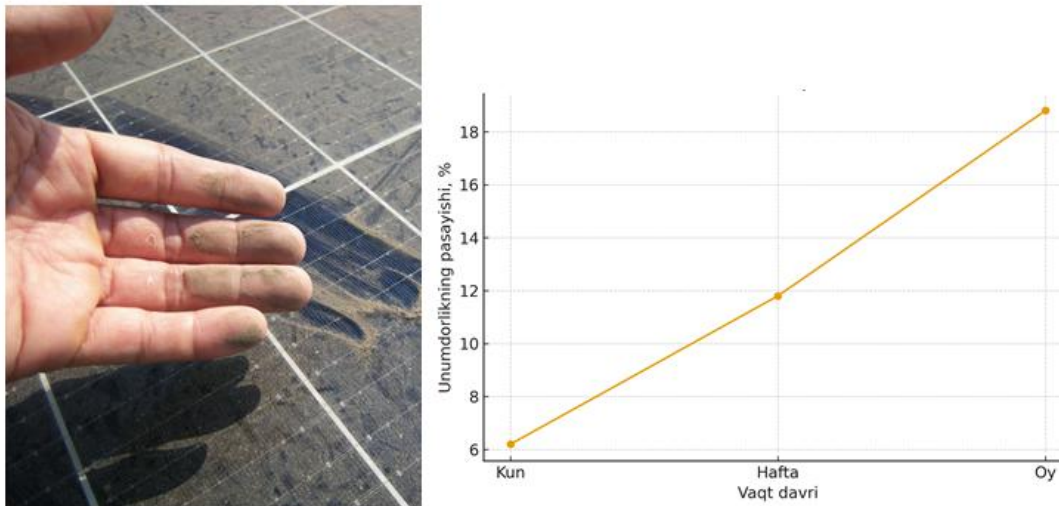
*e-mail: [kuldashov.abbos@mail.ru](mailto:kuldashov.abbos@mail.ru)*

Quyosh energiyasi zamonaviy energetika tizimlarida qayta tiklanuvchi va ekologik toza manba sifatida jahon miqyosida tobora muhim o'rin egallamoqda. Atrof-muhit ifloslanishi, global isish va an'anaviy yoqilg'i resurslarining qisqarib borishi kabi omillar energiya ishlab chiqarishda barqaror texnologiyalarga bo'lgan ehtiyojni orttirmoqda. Shu nuqtai nazardan, fotoelektrik texnologiyalar energetik xavfsizlikni ta'minlash, uglerod izini kamaytirish va iqtisodiy samaradorlikni oshirishda katta salohiyatga ega hisoblanadi [1].

Shunga qaramay, quyosh panellari ishlashining haqiqiy samaradorligi bir qator tashqi omillarga bog'liq bo'lib, ular orasida yuzada chang to'planishi eng jiddiy muammolardan biri sifatida qayd etiladi. Ilmiy manbalarda keltirilishicha, panellar yuzasidagi chang qatlami optik to'siq vazifasini bajarib, fotoelektrik elementlarga yetib boruvchi nur oqimini sezilarli darajada kamaytiradi. Bu esa o'z navbatida fotoelektr stansiyalarda foydali ish koeffitsientini pasayishiga olib keladi.

Tadqiqotlarning ko'rsatishicha, chang to'planishi bir necha kun ichida ham panelning chiqish quvvatini 5-30% gacha kamaytirishi mumkin, uzoq muddat davomida tozalanmagan panellarda esa bu ko'rsatkich yanada katta bo'lishi ehtimoli yuqori [2]. Ayniqsa, qurg'oq va shamolli iqlim sharoitiga ega mintaqalarda changlanish darajasi keskin ortib, fotoelektrik inshootlarni muntazam ravishda ekspluatatsion xizmatdan o'tkazish zaruratini yanada kuchaytiradi. Shu bois, quyosh panellari yuzasida chang to'planishini monitoring qilish, uni aniqlash va samarali tozalash usullarini ishlab chiqish fotoenergetika sohasida dolzarb ilmiy-texnik yo'nalishlardan biri sanaladi. Bu borada optoelektron yig'ma datchiklar, spektral tahlil usullari va avtomatlashtirilgan monitoring tizimlarini qo'llash orqali panellar samaradorligini real vaqt rejimida baholash imkoniyati kengaymoqda.

Quyosh panellari yuzasida chang to'planishini nazorat qilish uchun bir to'lqinli ikki kanalli optoelektron qurilma ishlab chiqildi, uning ishlash jarayoni panelning yoniga joylashtirilgan shaffof shisha va ochiq makon orqali o'tayotgan optik nurlanish intensivliklarini taqqoslashga asoslanadi va yorug'lik manbalari sifatida 1.55 mkm maksimal to'lqin uzunligidagi LED15-PR turdagi nurlatgichlari tanlangan.



**1-rasm. Fotoelektrik panellarda chang to'planishi tufayli unimdorligini pasayishi**

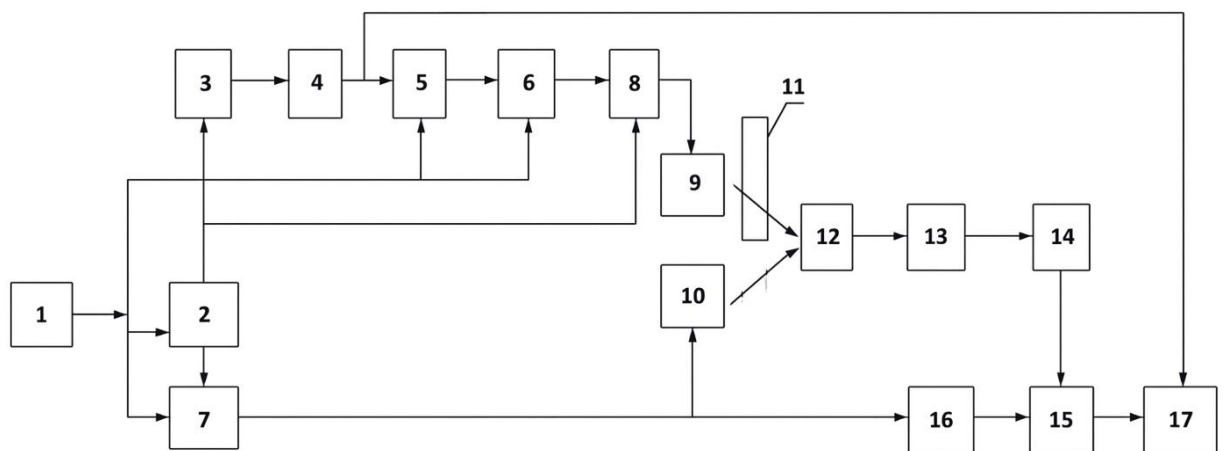
Nazorat qilinayotgan ob'ektga ta'sir etgan nurlanish oqimlarini quydagicha yozish mumkin:

$$\begin{cases} F_{\lambda 1} = \gamma_{\lambda 1} \cdot F_{0\lambda 1} \\ F_{\lambda 2} = \gamma_{\lambda 2} \cdot F_{0\lambda 2} \cdot e^{-km} \end{cases}$$

Bu yerda:  $\gamma_{\lambda 1}, \gamma_{\lambda 2}$  – tayanch va o'lchov to'liq uzunlikdagi nur manbalari o'tkazish koeffitsientlari,  $k$  – yutilish koeffitsienti,  $m$  – chang miqdori.

Shaffof shisha va ochiq makon orqali o'tayotgan optik nurlanish intensivliklarini taqqoslash vaqtida,  $F_{\lambda 1} = F_{\lambda 2}$  va  $\gamma_{\lambda 1} \cdot A \cdot e^{-t/\tau} = \gamma_{\lambda 2} \cdot F_{0\lambda 2} \cdot e^{-km}$ , u xolda  $\gamma_{\lambda 1} = \gamma_{\lambda 2}$ , natijada  $m = -\frac{1}{k \cdot \tau}$  xosil bo'ladi va  $m$  – chang miqdori nurlanish oqimlarini taqqoslash vaqtiga proporsional bo'ladi.

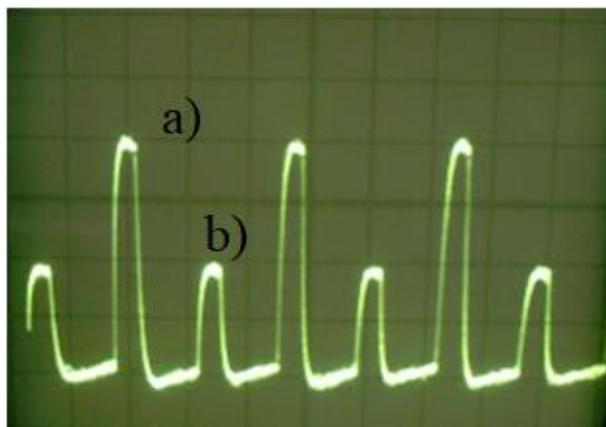
Shunday qilib taklif etilgan optoelektron qurilma fotoelektrik panellar yuzasida chang to'planishini nazorat qilib, fotoelektrik panellar yuzasida to'plangan changni tozalashni avtomatlashtirish imkonini beradi. O'lchov tajribalari natijalari ma'lumotlar bazasida to'planadi. Ushbu ma'lumotlar bazalariga internet orqali masofadan kirish bir nechta mutaxassislar tomonidan qayta ishlash imkonini beradi. Quyosh panellari yuzasida chang to'planishini nazorat qilish uchun bir to'liqlik ikki kanalli optoelektron qurilmaning blok sxemasi 2-rasmda keltirilgan.



**2-rasm. Quyosh panellari yuzasida chang to'planishini nazorat qilish uchun bir to'liqlik ikki kanalli optoelektron qurilma blok sxemasi**



Bu yerda: elektr manbai 1, impuls generatori 2, chastota bo'lgich 3, birvibrator 4, eksponenta modulyatori 5, emitter qaytargich 6, ikkita elektron kalitlar 7 va 8, yorug'lik diodlari (o'lchovchi 9 va namunaviy 10), shaffof shisha 11, fotoqabulqilgich 12, birinchi differensiallovchi qurilma 13, porog qurilmasi 14, solishtirish sxemasi 15, ikkinchi differensiallovchi qurilma 16, hisoblagich 17.



**3-rasm. Fotodioddagi signallar ossillogrammalari ( a)- o'lchovchi nurlanish intensivligi  
b)- namunaviy nurlanish intensivligi)**

#### **Adabiyotlar**

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>.

### **TEMPERATURE-DEPENDENT IONIC CONDUCTIVITY OF PEO-BASED GEL POLYMER ELECTROLYTES CONTAINING TPAI FOR DSSC APPLICATIONS**

**O.O.Mamatkarimov<sup>1</sup>, A.A.Abdukarimov<sup>1</sup>, M.A.Naimjonov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Department of Physics, Namangan State Technical University, Kosonsoy str. 7, 160115  
Namangan, Uzbekistan*

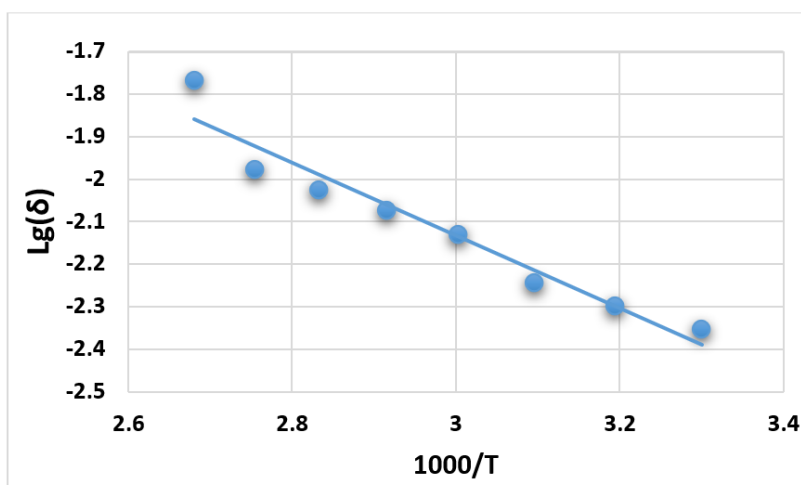
<sup>2</sup>*Department of Physics, Namangan State University, Boburshox str. 161, 160107  
Namangan, Uzbekistan*

email: [odiljon\\_m63@mail.ru](mailto:odiljon_m63@mail.ru), [abdullaziz.abdukarimov@mail.ru](mailto:abdullaziz.abdukarimov@mail.ru),  
[arslonbeknaimjonov@gmail.com](mailto:arslonbeknaimjonov@gmail.com)

Our work investigates how salt content and temperature affect the ionic conductivity of a polyethylene oxide (PEO)-based gel polymer electrolyte (GPE) intended for dye-sensitized solar cells (DSSCs). The experimental study was carried out at the Centre for Ionics, Department of Physics, University of Malaya (Malaysia). GPEs were prepared by dissolving PEO in dimethylformamide (DMF) at 80°C, followed by addition of ethylene carbonate (EC) and

propylene carbonate (PC) as plasticizers and tetrabutylammonium iodide (TBAI/TPAI) salt in the range of 0.05 – 0.25 g. Iodine ( $I_2$ ) equal to 10wt. % of the salt amount was introduced to form the  $I^-/I_3^-$  redox couple. Ionic conductivity was evaluated by electrochemical impedance spectroscopy (Hioki 3570; 50 Hz – 5MHz ) using stainless-steel blocking electrodes, where bulk resistance was extracted from the real-axis intercept. At room temperature, the conductivity increased from  $2.88 \times 10^{-3}$  to a maximum of  $4.40 \times 10^{-3} \text{ S cm}^{-1}$  at 0.20 g salt (sample D4), then decreased at 0.25 g due to ion association/neutral ionpair formation. Temperature-dependent measurements revealed thermally activated ion transport with an approximately Arrhenius-type behavior (linear  $\ln(\sigma)$  vs  $1000/T$ ), and the bulk resistance decreased with increasing temperature, indicating improved charge transport. The dielectric response also increased with temperature for the optimized composition, supporting enhanced ion dissociation and interfacial wetting. The optimized electrolyte (D4) was therefore selected for DSSC assembly and is a promising sample for improving electrolyte transport properties in DSSC devices.

The  $\ln(\sigma)$  versus  $1000/T$  plot in Figure 1 exhibits an approximately linear trend, indicating thermally activated ionic transport. As temperature increases, polymer segmental motion and ion mobility generally increase, resulting in higher ionic conductivity and lower bulk resistance. In agreement with this mechanism,  $R_b$  decreases systematically with temperature over the main measurement range, confirming improved charge transport in the electrolyte at elevated temperatures. The overall temperature response supports semiconductor-like behavior in the sense that conductivity increases with temperature (thermally activated transport), which is favorable for reducing internal losses under operating conditions.



**Figure 1. Temperature dependence of the electrical conductivity of electrolytes.**

#### References

- [1]. O'Regan, B. and Grätzel, M. (1991) A Low-Cost, High-Efficiency Solar-Cell Based on Dye Sensitized Colloidal  $TiO_2$  Films. *Nature*, 353, 737-740.
- [2]. O.Mamatkarimov, A.Abdukarimov. About The Characteristics Of Multilayer Thin-Film Structures With Dyes Based On Titanium Dioxide. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering* 2 (3), 28, 2021.
- [3]. Ari A. Mohammed, Alan S. Said Ahmad, Wafaa A. Azeez. Fabrication of Dye Sensitized Solar Cell Based on Titanium Dioxide ( $TiO_2$ ). *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 2015, 5, 361-367.

- [4]. A. Abdulkarimov, I.S. Noor, O. Mamatkarimov, A.K. Arof. "Influence of charge carrier density, mobility and diffusivity on conductivity–temperature dependence in polyethylene oxide–based gel polymer electrolytes" - High Performance Polymers, 2021
- [5]. Ooyama, Y., & Harima, Y. Photophysical and Electrochemical Properties, and Molecular Structures of Organic Dyes for Dye-Sensitized Solar Cells. ChemPhysChem 2012, 13, 4032 – 4080.
- [6]. Hagfeldt A, Gratzel M. Molecular photovoltaics. Accounts of Chemical Research 2000; 33:269–277.
- [7]. Pastore M, Angelis FD. Aggregation of organic dyes on TiO<sub>2</sub> in dye-sensitized solar cells models: an abinitio investigation. ACS Nano 2010; 4:556–562.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В СТАЦИОНАРНОЙ И ДВУХОСНОЙ СИСТЕМЕ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ

С.А. Даминов\*, О.Ф. Тукфатуллин, Э.Д. Мухамедиев, Д.С. Пулатова  
НИИ физики полупроводников и микроэлектроники при НУУЗ им. М. Улугбека  
Узбекистан, Ташкент, 100057, ул. Янги Алмазар, 20  
\*e-mail: [daminovsa@gmail.com](mailto:daminovsa@gmail.com)

Электрическая эффективность фотоэлектрических модулей (ФЭМ) существенно зависит от температуры: повышение температуры приводит к снижению выходного напряжения и, как следствие, к уменьшению вырабатываемой электрической мощности [1].

В этой связи исследование тепловых характеристик ФЭМ является важной научно-технической задачей. Анализ теплового поведения модулей позволяет оптимизировать конструкцию и режимы эксплуатации солнечных энергетических установок, повысить их энергетическую эффективность и снизить эксплуатационные потери.

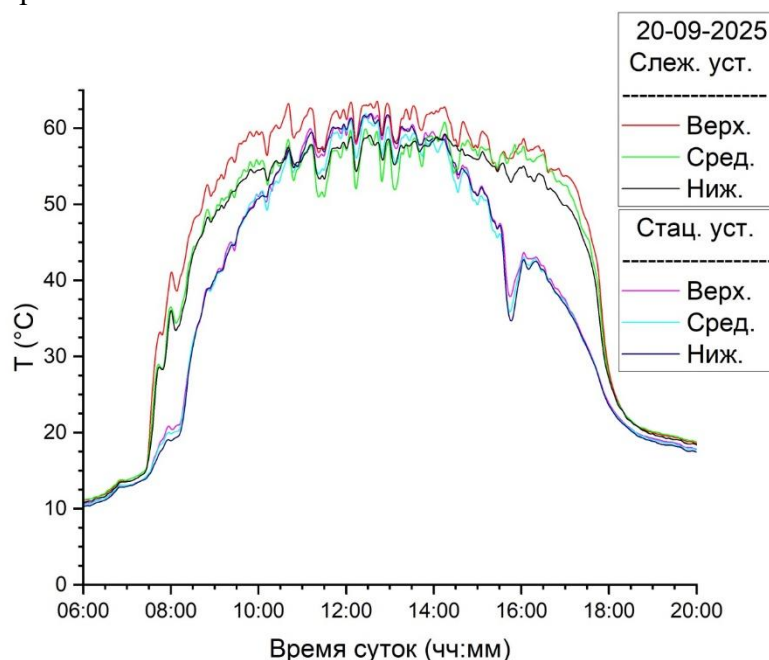
В данной работе представлены результаты экспериментального анализа температурного режима ФЭМ, выполненный 20 сентября 2025 года на территории испытательного полигона Научно-исследовательского института физики полупроводников и микроэлектроники в г. Ташкенте. Дополнительные данные по солнечной инсоляции были получены из открытых метеорологических источников ([tutiempo.net](http://tutiempo.net)).

Эксперимент проводился с использованием двухосной системы слежения за Солнцем [2], оснащённой ФЭМ Delta SM-50-12 М номинальной мощностью 50 Вт на основе монокристаллического кремния. Система слежения обеспечивала непрерывную ориентацию модуля по азимуту и углу по положению относительного горизонта Солнца, поддерживая близкое к нормальному падение солнечного излучения на поверхность ФЭМ [3].

Для сравнения использовалась стационарная установка с идентичным ФЭМ, жёстко закреплённым на несущей конструкции под оптимальным для географической широты Ташкента углом наклона  $42^\circ$  к горизонту и ориентированным строго на юг.

Измерения температуры выполнялись с помощью цифрового измерительного устройства с возможностью подключения до шести датчиков температуры типа DS18B20. На каждом модуле были установлены по три датчика, размещённые в верхней, средней и нижней зонах тыльной поверхности, что позволило регистрировать вертикальный температурный градиент (рис. 1). Регистрация данных осуществлялась с интервалом 60 мин. в течение всего светового дня — с 06:00 до 20:00 по местному времени.

Погода в день эксперимента характеризовалась как ясная. Температура окружающего воздуха изменялась от  $+15^\circ\text{C}$  в утренние часы до  $+31^\circ\text{C}$  в районе 15:00, после чего наблюдалось её постепенное снижение. Влажность воздуха была низкой, что типично для засушливого климата региона.



**Рис. 1. Временная зависимость температуры задней поверхности фотоэлектрического модуля при стационарной ориентации и двухосном слежении за Солнцем**

На рис. 1 представлена временная зависимость температуры задней поверхности ФЭМ для стационарной установки и двухосной системы слежения.

#### *А. Сравнение форм кривых зависимости температуры от времени*

Стационарная система.

Температурные кривые зависимости температуры от времени имеют выраженную колоколообразную форму с относительно узким максимумом, соответствующим околополуденному периоду. Нагрев и последующее охлаждение модуля происходят достаточно быстро, что связано с ростом косинусных потерь при увеличении угла падения солнечного излучения по мере удаления Солнца от нормали к поверхности модуля.

Система слежения за Солнцем.

Для системы слежения характерны значительно более широкие температурные кривые. После быстрого утреннего нагрева температура модуля удерживается на высоком уровне в интервале примерно с 10:00 до 17:00. Это свидетельствует о длительном воздействии близкого к максимальному солнечному потоку вследствие непрерывной ориентации модуля на Солнце.

#### **В. Сравнение максимальных температур**

Максимальная температура задней поверхности модуля в системе слежения достигала  $\approx 62$  °С, что примерно на 2 °С выше, чем у стационарной установки ( $\approx 60$  °С). Полученный результат подтверждает, что системы слежения, увеличивая плотность поглощаемого солнечного излучения, одновременно приводят к росту тепловой нагрузки на ФЭМ.

#### **С. Анализ температурного градиента по высоте модуля**

Размещение датчиков в верхней, средней и нижней зонах задней поверхности выявило различия в механизмах теплоотвода:

Стационарная система демонстрирует устойчивый вертикальный температурный градиент, при котором наибольшая температура фиксируется в верхней части модуля. Это соответствует эффекту естественной конвекции, при котором нагретый воздух поднимается вверх вдоль тыльной поверхности.

Система слежения характеризуется менее стабильным и более сложным температурным распределением. Непрерывные изменения ориентации модуля нарушают формирование устойчивого конвективного потока, и теплоотвод в большей степени определяется переменной вынужденной конвекцией, обусловленной ветровыми воздействиями.

Экспериментальные результаты показывают, что двухосная система слежения за Солнцем формирует более высокую и более продолжительную тепловую нагрузку на ФЭМ по сравнению со стационарной установкой. Характерной особенностью системы слежения является длительное поддержание повышенной температуры в течение большей части светового дня, что увеличивает суммарное термическое воздействие на материалы модуля и может оказывать влияние на его долговечность и электрические характеристики.

#### **Список литературы**

1. Amr Osama, Giuseppe Marco Tina, Antonio Gagliano, Gabino Jimenez-Castillo, Francisco José Munoz-Rodríguez. Effect of electrical operating conditions on thermal behavior of PV modules: Numerical and experimental analysis // Solar Energy Materials and Solar Cells.– <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2025.113625> , Volume 287, 1 August 2025,
2. Даминов С.А., Джумамуратов К.А., Мухитдинов С.Ш. Расчёт углов поворота фотоэлектрического модуля для системы слежения за солнцем на базе линейных приводов // Сборник трудов республиканской конференции «Роль одаренной молодежи в развитии физики», Ташкент, НУУз, 4-5 апреля, 2025 г.
3. С.А. Даминов, К.А. Джумамуратов, С.Ш. Мухитдинов. // Разработка датчика на основе фотодиодов для системы слежения за Солнцем // Ёш олимлар ва физик талабаларнинг V республика илмий анжумани (ЁОФТРИА- V), Тошкент 2025



## СОЗДАНИЕ ВЕТРЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ПРЕДГОРНЫЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

**М.А. Шерматова**

*Худжандский государственный университет имени академика Б. Гафурова, г.*

*Худжанд, Республика Таджикистан.*

*электронный адрес: shermatova50@bk.ru*

Одним из важных вопросов создания ветреных установок является проблема непрерывной работы таких двигателей, поскольку любая ветреная установка накапливает энергию ветра на поверхности Земли только в присутствии ветра определенной скорости. Если взять ветреную электрическую станцию, она имеет определенный электрический генератор, вращение ротора которого вызывает сила ветра, в отсутствие ветра электрическую энергию передаётся из аккумуляторов заряженных электричеством во время действия ветра, через преобразователь, для перевода постоянного тока в переменный. Поэтому разрядка аккумуляторов неизбежна, более того, количество электрической энергии аккумуляторов не бесконечна.

Возникает вопрос, какую установку или двигателя можно предложить, чтобы работал непрерывно, т.е. без остановок, близкой к вечному двигателю. Подобную установку можно создать, если использовать распределение давления атмосферного воздуха в различных высотах от поверхности Земли.

Дело в том, что давление атмосферного воздуха Земли с повышением высоты уменьшается согласно закона Больцмана, формула которого называется барометрической.

Если населенный пункт находится на равнине, т.е. в предгорной местности, тогда легко создавать ветреную установку, путём прокладки труб определенного диаметра с точки расположения населенного пункта до высоты рядом находящегося гор. В этом случае на концах таких труб будет наблюдаться давления разных значений.

Согласно барометрической формулы разность давлений в этом случае легко подсчитать по формуле:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (1)$$

где  $P_2$ -давление на поверхности Земли;

$$P_2 = P_0 e^{-\frac{mgh_2}{KT}} = P_0 \quad (2)$$

поскольку  $h_2=0$

$P_0$ -это есть давление атмосферы равное 760 мм ртутного столба, т.е. на поверхности Земли,

$P_2$ -это давление на высоте  $h_2$

$$P_1 = P_0 e^{-\frac{mgh_1}{KT}} \quad (3)$$

где  $h_1$ - высота горы.

Разность давлений можно находить, если учесть формулы (3), (4), путём постановки в формулу (2)

$$\Delta P = P_2 - P_1 = P_0 e^{-\frac{mgh_1}{KT}} = P_0 (1 - e^{-\frac{mgh_1}{KT}}) \quad (4)$$

Расчёты показали, что на каждые 18 метров высоты давление атмосферного воздуха Земли уменьшается на один миллиметр ртутного столба, равное 133 Паскалям, следовательно на высоте 1800 метров горы давление воздушной массы уменьшается на 100 мм рт. столба, т.е. на 1330 Паскаль, за счёт чего на концах любой сплошной трубы, первый конец которого будет находиться на поверхности Земли, а другой конец на высоте 1800 метров горы появится разность давления равное 13300 Па, тем самым формируется непрерывный ветер, который способен привести в движение ротор ветреного генератора (встроенный электростанции) или любой другой механический двигатель.

Таким образом из изложенных рассуждений можно прийти к заключению о том, что в условиях Республики Таджикистан появятся большие перспективы для создания в первую очередь ветреных электрических энергоустановок, путём использования разности давлений для населенных пунктов, которые находятся вблизи гор. Тем более, территория нашей республики состоит из 93% гор, высота которых достигает практически до 7,5 километров.

Более того использование вышеприведенной установки можно расширить ещё для других целей, в частности мелькомбинат, водяные насосы дробителей горных камней, работы различных геологических и промышленных шахт можно будет обеспечить путём использования разности давлений атмосферного воздуха Земли, путём создания различного рода ветреных двигателей.

Возможности создания ветреных двигателей непрерывного действия существует и в условиях обычной нашей повседневной жизни, если рядом обнаруживается высотные дома или высотные вышки.

Создание вышеперечисленные ветреные двигатели является относительно-экологически чистыми, безопасными и дешёвыми.

#### **Литература:**

1. Шерматов М. Нахустпатенти №JT 491, аз 24.10.2011
2. А.Г.Дьяченко авторское свидетельство № SU 1671955 F03Д 9/00, от 23.08.1991, бюллетень №231
3. Богаенко В.П. Авторское свидетельство № (RU) 2158849 F 03 9/00, F24Д 3/00, от 10.11.2000 г. бюллетень №31 от 10.11.2000с.

### **РОЛЬ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ И УЧЕБНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПОЛИГОНОВ В ПОДГОТОВКЕ КАДРОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Р.Ю. Акбаров, С.Б. Бахронова**

*Институт Материаловедения АН РУз*

*Узбекистан, Паркентский район, 102226, пос. «Солнце»,*

*\*e-mail: [aryu12@mail.ru](mailto:aryu12@mail.ru)*

В настоящее время эффективное использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является актуальным и развивающимся направлением научно-технического прогресса. Глобальные вызовы, связанные с изменением климата и необходимостью перехода к низкоуглеродной экономике, определяют растущий вклад ВИЭ в мировом энергетическом балансе. Перспективы развития этой отрасли огромны: по прогнозам, к

2030 году дешевая электроэнергия из ВИЭ может обеспечить до 65% всего мирового электроснабжения.

Критически важным вопросом является пропаганда знаний в этой области и, что особенно актуально, подготовка высококвалифицированных кадров, способных разрабатывать, внедрять и эксплуатировать соответствующие системы. В настоящее время во многих высших учебных заведениях (ВУЗ) создаются специализированные кафедры и, что еще более эффективно, научно-практические и учебно-образовательные полигоны.

Научно-практические и учебно-образовательные полигоны играют ключевую роль в подготовке специалистов, выводя процесс обучения за рамки традиционных лекций. Они предоставляют исследователям возможность "погружения" в реальную профессиональную среду, позволяя оттачивать практические навыки и приобретать опыт "с правом на ошибку", что невозможно на реальном производстве.

В настоящее время многие институты и научные центры имеют в своем распоряжении «зеленые» научно-практические или учебно-образовательные полигоны [1-6]. Из зарубежных организаций, можно отметить известные центры, такие как DLR, PSA, NREL, PROMES, МЭИ, которые располагают обширными научно-практическими и научно-образовательными экспериментальными полигонами и установками. Их инфраструктура предназначена для исследований и разработок в области возобновляемых источников энергии, аэрокосмической отрасли и других смежных сфер (см.таблицу 1).

Таблица 1.

Обзор экспериментальных площадок

| Организация                                   | Основное направление исследований                                             | Примеры экспериментальных полигонов/установок                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| DLR (Германский центр авиации и космонавтики) | Аэрокосмические исследования, энергетика, транспорт, безопасность.            | Имеет различные испытательные стенды, аэродинамические трубы, исследовательские летательные аппараты и студенческие лаборатории для обучения будущих специалистов.                 |
| PSA (Солнечная платформа в Альмерии, Испания) | Концентрированная солнечная энергия (CSP) и термические солнечные технологии. | Крупнейший в Европе центр исследований и испытаний технологий CSP, включающий системы с центральным приемником (башня CESA-1), параболоцилиндрические коллекторы и солнечные печи. |
| NREL (Национальная лаборатория по ВИЭ, США)   | Возобновляемая энергия и энергоэффективность.                                 | Обширные кампусы с испытательными полигонами для солнечной энергетики, ветроэнергетики, биотоплива и интеграции энергосистем.                                                      |
| PROMES (Одейо, Франция)                       | Процессы, материалы и солнечная энергия (высокотемпературные применения).     | Уникальные солнечные печи (включая 1 МВт и малые печи), солнечная электростанция башенного типа Themis мощностью 5 МВт и установки для производства солнечного топлива.            |

|                                                          |                                                                          |                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Национальный исследовательский университет (МЭИ, Россия) | Проведения испытаний и исследований в области «зеленой» энергетики       | Полигон используется для демонстрации технологий, подготовки специалистов по солнечной, ветровой, биоэнергетике и другим направлениям и интегрирован в образовательный процесс. |
| Институт Материаловедения АН РУз                         | Проведения испытаний и исследований в области CSP и «зеленой» энергетики | Полигон используется для демонстрации технологий и подготовки специалистов в области ВИЭ. Имеются макеты теплиц, концентраторов, коллекторов и др.                              |

В Узбекистане, в качестве примера можно указать полигоны Физико-технического института, Института Материаловедения, Ташкентского государственного технического университета, Ферганского политехнического института, Каршинского университета, Бухарского университета и других.

Основное преимущество таких полигонов заключается в наглядности и возможности проведения экспериментальных исследований. Использование различных демонстрационных макетов солнечных установок и других систем значительно повышает эффективность образовательного процесса. Физическое моделирование и практическая работа с оборудованием способствуют лучшему усвоению материала и развитию критического мышления.

В качестве примера успешной реализации данного подхода можно привести научно-практический полигон, созданный в Институте Материаловедения АН РУз (Рис.1.). Этот полигон активно используется в летней практике студентов, в практических исследованиях молодых ученых, в образовательных и туристических целях и в других процессах, обеспечивая им непосредственный контакт с действующими установками



**Рис.1. Научно-практический полигон Института Материаловедения.**

На таких площадках могут быть представлены материалы и функционирующие макеты по широкому спектру вопросов. Полигон института Материаловедения имеет следующие установки, макеты и другие демонстрационные материалы по ВИЭ: водонагреватели - коллекторы, параболические и параболические концентраторы,

малые солнечные печи, макеты солнечных кухонь различных типов, теплицы, ветрогенератор, PV станции, солнечные часы, диаграммы положения Солнца и другие.

Таким образом эффективное использование возобновляемых источников энергии - это не просто тренд, а стратегическая необходимость для устойчивого будущего. Роль научно-практических и учебно-образовательных полигонов в этом процессе неопределима. Они служат мостом между теоретическими знаниями и практическим опытом, предоставляя молодым исследователя необходимую среду для освоения современных технологий и играют важную роль в подготовке компетентных специалистов.

### **Литература**

1. Васьков А.Г и др. Подготовка кадров и научные исследования на базе учебно-экспериментального полигона "Возобновляемые источники энергии" Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2022. № 4. Стр. 19-24.
2. <https://www.nrel.gov>
3. <https://www.nrel.gov/about/flatirons-campus.html>.
4. <https://www.psa.es/en>
5. <https://www.promes.cnrs.fr/en/procedes-materiaux-et-energie-solaire>
6. <https://www.dlr.de/en>

## **QUYOSH ISSIQLIK ENERGIYASINI AKKUMLIYATSIYA QILISH ISTIQBOLLARI**

**J.T.Ruzimurodov, S.Q.Eshmamatov, A.A.Eshbekov**  
*Sharof Rashidov nomidagi Samarqand davlat universiteti*  
*Samarqand shahar, 140104, Universitet xiyoboni 15-uy*  
*e-mail: [sardor.eshmamatov@mail.ru](mailto:sardor.eshmamatov@mail.ru)*

Quyosh misli ko'rilmagan ulkan energiya manbai bo'lib, uning nurlanishi hisobidan birgina yer sirtiga har yili  $62 \cdot 10^{16}$  kWsoatga teng energiyani olib keladi. Hozirga qadar Quyoshdan kelayotgan energiyani biz aksariyat passiv holda foydalanib kelyapmiz. 21-asrda butun dunyoda energiyadan katta hajmda foydalanish va tabiiy energetik resurslar zahiralari kamayishi hisobidan, yangi muqobil energiya manbalaridan foydalanib energiya barqarorligini ta'minlash masalasi kun tartibining birinchi masalasi bo'lib turibdi. Jahonda muttasil ilmiy izlanishlar va ilg'or texnologik jarayonlar rivojlanishi hisobidan hozirda Quyoshning yorug'lik energiyasini elektr energiyasiga aylantirish, va undan keng miqyosda foydalanish ko'nikmalari insoniyat ongida deyarli rivojlanib bo'ldi. Fotoelektrik tizimlarda aksariyat Quyosh issiqlik energiyasi ishlatilmay, aksincha Quyoshli, harorat yuqori bo'lgan vaqtlarda uning ishlash samaradorligini pasaytirishi ham ma'lum. Shundan kelib chiqqan holda ushbu maqolada bayon qilinayotgan asosiy yo'nalishlardan biri quyosh issiqlik energiyasidan foydalanish va uni akkumliyatsiya qilish masalasi o'rin olgan. Quyosh issiqlik energiyasidan foydalanishdagi passiv texnologiyalarni imkon qadar tezroq aktiv texnologiyalarga almashtirish yoki yangilarini yaratish juda muhim. Bu borada ham butun dunyoda yetarlicha amaliy o'rganishlar mavjud bo'lib, issiqlikni akkumliyatsiya qilish jihatiga ko'proq e'tibor qilish masalasi dolzab hisoblanadi. Buning eng yaxshi jihatidan biri



issiqlikni akkumulyatsiya qilish orqali Quyosh energiyasini sutkalik barqarorligini amalga oshirish mumkinligidadir.

Respublikamiz iqlim sharoitida quyosh beradigan issiqlik miqdorining yuqoriligi va quyoshli kunlar sonining ko'pligi tufayli turli maqsadlarda issiqlikka bo'lgan talabni quyosh issiqligidan foydalanib qondirish imkoniyati mavjud. Xususan, yuza birligiga tushayotgan quyosh nurlari quvvati  $800-1300 \text{ W/m}^2$  bo'lsa quyoshli kunlar soni o'rtacha 300-310 kunni tashkil qiladi.

Quyosh issiqlik energiyasidan ommaviy foydalanish uchun to'sqinlik qiluvchi asosiy omillar sifatida quyidagilarni keltirish mumkin: issiqlikni qisqa va uzoq muddatli akumulatsiya qilish muammolari, intensiv tarzda qisqa vaqtda katta issiqlik berish imkonining pastligi, bu texnologiyaning mukammallashmaganligi, tan narxining yuqoriligi. Hozirgi kunda quyosh issiqligi energiyasini akumulatsiya qilishning asosiy muammolaridan biri bu issiqlik sig'imi yetarlicha katta bo'lgan, barqaror, qimmat bo'lmagan material topishdan iborat. Quyosh issiqligi energiyasini akumulatsiya qiluvchi materiallar sifatida, suv, tuzli eritmalar, tosh yoki qum shaklidagi minerallar, sharchalar shaklidagi metal va metal qotishmalari hamda fazasi o'zgaruvchi materiallar qo'llaniladi.

Quyosh issiqlik energiyasidan barcha mavsumlarda va sutka davomida uzluksiz foydalanish uchun akumulatsiya tizimi issiqlik sig'imining yuqori bo'lishini talab qiladi va bu esa issiqlikni zahiralovchi materialning hajmi va o'z navbatida sarflanadigan mablag'ning juda katta bo'lishiga olib keladi [1].

O'zbekiston iqlim sharoitida qish mavsumi va isitish davrining qisqa bo'lishi, qishda ham quyoshli kunlarning ko'p bo'lishi natijasida akumulatsiya tizimidagi issiqlik zahirasi tez tiklash imkoni mavjudligi omili akumulatsiya tizimi hajmini optimallashtirish imkonini beradi [1]. Boshqa tomondan esa O'zbekistondagi aholi yashash uylarida issiqlikni saqlovchi material va texnologiyalar qo'llanilmaganligi uchun issiqlik sarfi juda yuqori. Binolarda issiqlik sarfi binoning issiqlik saqlash qobiliyatiga hamda tashqi va ichki haroratlar farqi, havoning namligiga katta bo'g'liq bo'ladi. O'zbekiston sharoitida isitish mavsumi davomida ob-havo ancha iliq bo'lsada harorat va namlik keskin o'zgaruvchanligi issiqlik sarfining ham mavsum va sutka davomida o'zgaruvchan bo'lishiga olib keladi.

Bu omillar nazariy usulda hisob kitoblarga ko'ra quyosh issiqligini saqlash tizimlaridan uylarni isitishda foydalanish va ommaviy qo'llash mumkinmi degan savolga ishonchli javob berish inkonini bermaydi. Shuning uchun isitish mavsumi davomida uyning harorati, issiqlik sig'imi, issiqlik sarfi, va quyoshning issiqlik nurlanish darajasini monitoring qilish orqali amaliy natijalar olish imkonini beruvchi o'lchash tizimini yaratish zarurati tug'ildi.

Dasturiy ta'minot tizimi orqali Respublikamizning turli geografik hududlarida bir yildagi isitish mavsumi davomida bino yoki aholi yashash uyining issiqlik sarfi o'lchab boriladi, real holatda zarur bo'lgan issiqlik miqdori aniqlanadi, issiqlik miqdori sarfining vaqt bo'yicha kinetikasi ishlab chiqiladi [2].

Tajriba asosida aniqlangan parametrlar va miqdorlar asosida esa quyosh issiqligini yozda yoki quyoshli kunlarda to'plab, kechasi va isitish mavsumida foydalanish rentabelligi va samarasi haqida aniq ma'lumotlar olinadi.

Shu maqsadda mikrokontrollerlar asosida avtonom va simsiz IT texnologiyalar asosida ishlovchi o'lchash datchiklari tizimi va natijalarni qabul qiluvchi, qayta ishlab saqlovchi monitoring kompyuter dasturiy ilovasi yaratildi. Bu tizimning asosiy vazifasi mavjud energiya

resursidan inson omilisiz oqilona foydalaninish va energiya tejamkorligi samarasini oshirishdan iborat.

Bizning fikrimizcha O'zbekistonda quyosh issiqlik energiyasidan texnik, texnologik hamda iqtisodiy jihatdan foydalanishning imkoniyati va istiqbollarini nazariy hisob kitoblar asosida ishonchli tarzda aniqlashning imkoni yo'q [3]. Shuning uchun uy va binolarning issiqlik sarfi miqdori va kinetikasini butun yil yoki isitish mavsumi davomida tajribaviy tadqiq qilish lozim. Tajriba natijalari esa butun bir yangi texnologiyaning qo'llanilish istiqbollarini belgilab beradi. Biz maqolada taklif qilayotgan dasturiy modellar Quyosh issiqlik energiyasini yuqori samaradorlik bilan olish, yig'ib olingan issiqlikni issiqlik akkumliyatorlarida uzoq vaqt energiya yuqotishlarisiz saqlab turish va undan issiqlik izolatsiyasi yuqori bo'lgan turar joy binolari, tashkilot-ofisslar va ishlab chiqarish korxonalarida yil fasllaridan qa'tiy nazar sutkalik isitish maqsadida foydalaniladi.

#### **Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati**

1. Wang.G., Blondeau.J. Multi-Objective Optimal Integration of Solar Heating and Heat Storage into Existing Fossil Fuel-Based Heat and Power Production Systems. *Energies* 2022, 15, 1942. <https://doi.org/10.3390/en15051942>.
2. Anarbaev A., Kodirov D., Khushiev S. and etc. Improving automatic control of a solar heating system for increasing its efficiency. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1142 (2023) 012008. doi:10.1088/1755-1315/1142/1/012008.
3. Zhaoyu H., Abdul Samad Farooq., Weimin Guo., Peng Zhang. Optimization of the solar space heating system with thermal energy storage using data-driven approach. *Renewable Energy*. Publisher: Elsevier, May 2022.

### **МУЖАССАМЛАШГАН ФОТОИССИҚЛИК АЙЛАНТИРГИЧ ҚУРИЛМАСИНИНГ СИНОВ НАТИЖАЛАРИ**

**К.А. Джумамуратов\*, Д.С. Пулатова, С.А. Даминов**

*М.Улугбек номидаги Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги*

*Яримўтказгичлар физикаси ва микроэлектроника ИТИ*

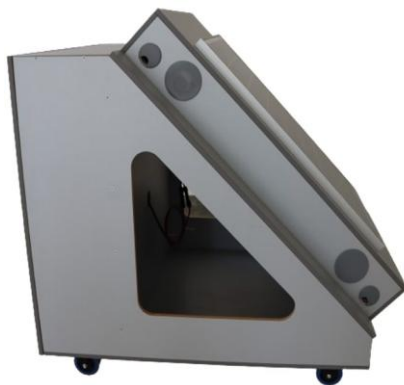
[e-mail: kjumamuratov01@gmail.com](mailto:kjumamuratov01@gmail.com)

Бутун дунёда бўлгани каби Ўзбекистонда ҳам электр энергиясига бўлган талаб ортиши билан Фотоэлектрик модул (ФЭМ)ларни кенг жорий этиш масаласи муҳим ўрин тутмоқда. ФЭМни самарали ишлашига салбий таъсир қилувчи омиллар таъсири ва уларни бартараф қилиш йўллари етарлича ўрганилмаган. Юқори ва ўрта қувватли фотоэлектр станциялари (ФЭС) да кўплаб ФЭМлар ишлатилишини ҳисобга олганда, ФЭМлар самарадорлигини ошириш бўйича бир қанча ишлар қилиниши зарур эканлиги логик тақозо қилади.

ФЭМлар ёрдамида Қуёш энергиясини электр энергиясига айлантириш самарадорлигини пасайишига олиб келадиган иккита асосий омил мавжуд. Бу омиллар ФЭМ юзасининг ифлослантирувчи қатлам билан қопланиши ва атроф-муҳит ҳароратнинг (25 °C дан) юқори бўлиши [1] билан боғлиқ. Шу сабабли, ФЭМлар юзасини тозалаш ва совутиш учун энг самарали ва тежамкор усуллари яратиш замонавий фотоэлектрик

энергетиканинг долзарб ва мураккаб вазифаларидан бири ҳисобланади. Шунинг учун ФЭМлар асосида кам қувватли иссиқлик энергиясини ишлаб чиқаришга мўлжалланган фотоиссиқлик айлантиргич қурилма (ФИАҚ) яратиш ва улардан фойдаланиш самарали натижаларга олиб келади.

Қуёш энергиясини электр ва кам қувватли иссиқлик энергиясига айлантириш учун мўлжалланган фотоиссиқлик айлантиргич қурилмаларнинг самарадорлигини ошириш, ҳаво ва сувни иситиш учун зарур бўлган энергия сарфини камайтириш ва ишончилигини ошириш мақсадида янги авлод фотоиссиқлик айлантиргич қурилмаси лойиҳаси ишлаб чиқилди ва яратилди [2]. Ушбу қурилма ФЭМ қизиши туфайли иситилган ҳаво ва сув олиш, ҳамда истеъмолчига узатиш имконини беради.



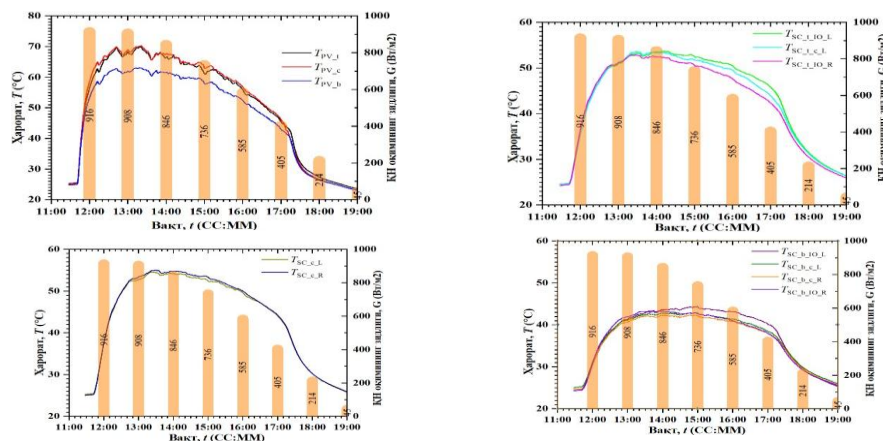
а)



б)

**1–расм. а – мужассамлашган ФИАҚнинг умумий ва б – ФЭМнинг орқа юзасига ўрнатилган корпуснинг ички кўриниши**

Дастлабки синов ишлари фақат ҳаво оқими учун уч хил шароитда амалга оширилди: 1– ФИАҚ даги ФЭМнинг орқа юзасига ўрнатилган ҳаво оқими исийдиган корпусидаги барча тирқишлар ёпиқ бўлган ҳолатида; 2 – ҳаво оқими исийдиган корпусининг қуйи қисмининг чап томонидаги ва юқори қисмининг ўнг томонидаги тирқиш очик ҳолатида ФЭМ орқа юзасининг мустақил совиш режими; 3 – корпус қуйи қисмининг чап томонидаги тирқиш очик қолдирилган, юқори қисмининг ўнг томонидаги тирқишга эса вентилятор ўрнатилган режимида.



**2-расм. ФЭМ нинг 3 нуктаси ва ФИАҚнинг 9 нуктасидаги йиғма коллектор ҳарорат режими**

ФЭМ ҳароратининг ошиши унинг кучланишга тасири сезиларли даражада йўқотиш йуқори бўлганлигидан тўғридан тўғри қувватга тасир қилади ва самарадорликни кескин пасайишига олиб келади. ФЭМ параметрлари ва характеристикаларига таъсирини етарли даражада баҳолаш учун, биринчи навбатда, узоқ вақт давомида ФЭМларнинг таркибий қисми бўлган қуёш элементларининг (ҚЭ) исиш даражаси тўғрисида ишончли маълумотларга эга бўлиш лозим. ФИАҚ ичидаги ҳаво ҳароратини ўлчаш тўққизта нуктада (1- расм) амалга оширилади: ҳавони корпус ичига узатиб бериш учун, исиган ҳаво оқимини чиқариш учун мўлжалланган кириш/чиқиш тирқишларининг ҳар бирида (тўртта датчик); ФИА корпус нинг марказий қисмида иккита; тепа қисмида битта ва пастки қисмида иккита датчик ўрнатилган.

ФЭМни қизиши ҳисобига самарадорлик пасайганда, ФЭМнинг орқа юзасидаги ҳароратини иссиқлик энергияни назорат қилувчи (узатиш ва бошқариш) қурилмаси орқали фойдаланиш самарадорлигини қисман тиклаш мумкин бўлади. ФЭМларнинг фронтал юзасига тушадиган қуёш нурланиш оқим зичлигининг электр энергиясига айланмаган қисми эса орқа юзасига иссиқлик сифатида тўпланиб самарадорлигини пасайишига олиб келади. Шунинг учун ФЭМларнинг орқа юзасидаги иссиқликни олиб самарадорлигини ошириш учун ФИАҚ ёрдамида иссиқ ҳаво олиб истемолчи ихтиёжига қараб ишлатиш имконин беради.

Даслабки синов (03.07.2025) натижаларига кўра ФЭМ орқа юзаси ҳароратининг максимал қиймати  $T_{\max}=85^{\circ}\text{C}$  бўлиши кузатилди (03.07.2025). ФЭМнинг совитиш ҳисобига исиган ҳаво ҳарорати  $50^{\circ}\text{C}$  гача истемолчига бўлган иссиқлик бериш имконин беради.

#### Фойдаланилган адабиётлар

1. О.Ф. Тукфатуллин Ш.Б. Утамурадова, Р.А. Муминов, В.Г. Дыскин, К.А. Джумамуратов Комбинированная фототеплопреобразовательная установка // Агентство по интеллектуальной собственности при Министерстве юстиции РУз, 13.10.2022 г
2. O.F. Tukfatullin, K.A. Djumamuratov, S.A. Daminov, F.A. Giyasova, F.A. Giyasov. Fotoelektrik modullarning energiya olish va samaradorlikni oshirish muammolarini hal qilish uchun yangi avlod fotoissiqlik aylantirgich qurilmasi // (2025). *KIUT Publication*, 1(1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15493412>

### IMPROVEMENT OF PRACTICAL METHODS FOR REDUCING ELECTROMAGNETIC IMPACTS IN TRACTION TRANSFORMERS USED IN RENEWABLE ENERGY-BASED POWER SUPPLY SYSTEMS

O.T. Boltayev, \*I.N. Ismoilov

Tashkent State Transport University

\*e-mail: islomjonismoilov777@gmail.com

The rapid global deployment of renewable energy sources (RES) has accelerated their integration into traction power supply systems for electrified railways and metro networks. Such

integration contributes significantly to the reduction of greenhouse gas emissions and enhances overall energy efficiency.

Nevertheless, the widespread use of inverter-based RES introduces fundamental challenges to electromagnetic compatibility (EMC) in traction transformers. Unlike conventional grid supplies, inverter-fed systems generate non-sinusoidal currents characterized by fast switching transients and a wide spectrum of harmonic components. These features substantially intensify electromagnetic stresses within traction transformers.

Ensuring EMC is a critical requirement in railway power systems, as excessive electromagnetic emissions can interfere with signaling and communication infrastructure, degrade insulation systems, and lead to non-compliance with international standards.

Traction transformers are inherently exposed to high current densities, rapidly varying loads, and frequent transient conditions. When supplied by RES, these operating stresses are further exacerbated, resulting in stronger electromagnetic fields, increased leakage magnetic flux, and elevated stray losses. Although transformer EMC has been extensively studied for conventional grid-fed systems, the specific electromagnetic behavior of traction transformers under RES-based supply remains insufficiently explored. This study addresses this research gap by proposing a set of practical mitigation strategies based on a hybrid and system-level approach. Currents supplied by inverter-based RES deviate significantly from ideal sinusoidal waveforms. In addition to the fundamental frequency component, these currents contain multiple higher-order harmonic components, each possessing distinct amplitudes and phase angles. The superposition of these harmonic components alters the magnetic excitation of the transformer core and windings, leading to complex and time-varying magnetic field distributions. The presence of harmonic-rich currents has a pronounced influence on transformer magnetic behavior. Higher-order harmonics increase the rate of change of magnetic flux density and introduce localized magnetic saturation within the core and structural components. As a consequence, magnetic flux is forced to deviate from its intended path, resulting in a substantial increase in leakage flux. This phenomenon is particularly critical in traction transformers, where compact design and high power density already limit magnetic margins. The electromagnetic fields within traction transformers are fundamentally governed by classical electromagnetic field theory. Under quasi-static operating conditions, the spatial distribution of magnetic fields is primarily determined by current density in the windings and the magnetic properties of the core materials. In RES-based operation, the increased harmonic content of the current enhances magnetic field nonlinearity, leading to higher magnetic flux density levels and localized saturation effects.

Leakage magnetic flux represents the portion of the total magnetic flux that does not follow the main magnetic circuit but instead propagates through surrounding air and structural components. In inverter-fed traction transformers, harmonic-induced saturation significantly amplifies leakage flux levels. This enhanced leakage flux becomes a dominant source of electromagnetic radiation, contributing directly to EMC problems in nearby electrical and electronic systems. The total power loss in traction transformer cores consists primarily of hysteresis losses and eddy current losses. Hysteresis losses arise from the repeated magnetization and demagnetization of the core material and depend on both the operating frequency and the peak magnetic flux density. Eddy current losses are caused by circulating currents induced within the conductive core material and structural components, and they increase rapidly with both frequency and magnetic flux density. In inverter-based RES systems, the amplification of higher-frequency



harmonics leads to a disproportionate rise in eddy current losses. These losses have been shown to increase by approximately 30–60% compared to conventional grid-fed operation. The resulting excess heat generation not only elevates transformer operating temperatures but also intensifies stray magnetic fields and electromagnetic emissions, further aggravating EMC concerns. Traditional EMC mitigation techniques for traction transformers primarily focus on structural optimization, shielding, and circuit-level filtering. Structural optimization methods, such as refining core geometry, employing high-permeability materials, and implementing symmetrical winding arrangements, are effective under near-sinusoidal operating conditions. However, their effectiveness diminishes significantly in the presence of high-frequency harmonic excitation.

Electromagnetic shielding techniques are widely used to suppress radiated emissions. While single-layer magnetic or electric shields provide limited attenuation, they are insufficient for the broadband electromagnetic emissions characteristic of inverter-fed RES. Multi-layer and composite shielding structures offer improved performance but introduce additional design complexity and cost. At the circuit level, passive and active harmonic filters can reduce total harmonic distortion in the supply current. However, these solutions increase system complexity, require additional maintenance, and may exhibit reduced reliability under the highly dynamic load and transient conditions typical of traction systems. To overcome the limitations of individual mitigation methods, this study proposes a hybrid and practical mitigation strategy that addresses electromagnetic impacts at both their source and propagation paths. The proposed approach integrates four complementary measures. First, the magnetic circuit of the traction transformer is optimized specifically for harmonic-rich operating conditions, reducing the likelihood of localized saturation. Second, hybrid electromagnetic shielding is employed using a combination of magnetic and conductive layers to attenuate both low- and high-frequency emissions. Third, low-electromagnetic-interference inverter topologies with controlled switching strategies are implemented to minimize harmonic generation at the source.

Finally, real-time electromagnetic monitoring and adaptive control systems are introduced to dynamically adjust operating parameters in response to changing load and supply conditions. This integrated approach provides a balanced solution that is technically effective, economically feasible, and compatible with the operational requirements of modern traction power systems. Comparative numerical simulations and analytical evaluations were conducted to assess electromagnetic performance under different operating conditions. Results indicate that RES-based inverter operation leads to a substantial increase in total harmonic distortion, leakage flux, and electromagnetic field intensity compared to conventional grid supply. When the proposed hybrid mitigation strategy is applied, these parameters are significantly reduced. In particular, electromagnetic field intensity is reduced by approximately 52% relative to unmitigated RES operation, approaching levels observed under conventional grid supply. This reduction confirms the effectiveness of the hybrid approach in mitigating electromagnetic impacts while maintaining acceptable system performance.

### **Discussion**

The findings demonstrate that electromagnetic effects in RES-integrated traction transformers are significantly intensified due to harmonic currents and fast switching transients. Single mitigation techniques are insufficient to address the full spectrum of EMC challenges posed by inverter-based RES. In contrast, hybrid mitigation strategies that combine structural optimization, advanced shielding, and inverter-level control achieve superior performance. Such

approaches ensure compliance with international EMC standards while preserving transformer efficiency and operational reliability.

### **Conclusions**

This study confirms that hybrid practical mitigation methods can effectively reduce electromagnetic impacts in traction transformers operating under RES-based supply. The proposed solutions significantly decrease leakage flux, harmonic-induced losses, and electromagnetic field intensity without compromising transformer efficiency. These findings support the suitability of the proposed approach for modern traction power systems with high levels of renewable energy penetration.

### **References**

1. Berdiyev U.T., Vetcher A.K., Hasanov F.F., Avazov B.B. Soft magnetic materials for electric machine construction. AIP Conference Proceedings, 2612 (1), 050014, (2023).
2. Yusupov D.T., Muminov A.B., Nosirov A.I., Berdiev U.T., Kutbidinov O.M. Development of an algorithm of processes for cleaning power transformer oil in a circulatory way. Proceedings of the 15th International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications (ICTEA), Vol. 1, (2024).
3. IEC 61000-4-3. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and Measurement Techniques – Radiated, Radio-Frequency, Electromagnetic Field Immunity Test. Tashkent, Uzbekistan, (2020).
4. Sauchuk H.K., Yurkevich N.P., Akhmedov A.P., Kolesnikov I.K., Berdiyev U.T., Khudoyberganov S.B., Khakimov S.H. Physical and thermal properties of binary (Bi-Ti-O)-TiO<sub>2</sub> UHF-ceramics. Proceedings of the International Conference on Thermal Engineering, Vol. 1 (1), (2024).

## **FOTOELEKTRIK PANELLAR IShChI YuZASI HARORATINI NAZORAT QILUVCHI QURILMA**

**S.Q.Qarshiyev, O.O.Abdinazarova**

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

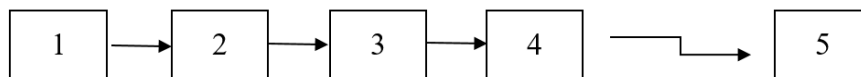
Hozirgi vaqtda energiya iste‘molining ortishi kuzatilmoqda, bir vaqtning o‘zida elektr energiyasi narxlari oshib bormoqda va an‘anaviy resurslar zaxiralari kamaymoqda. Shu munosabat bilan qayta tiklanuvchi energiya manbalari (QTEM) sohasidagi ishlanmalar dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Quyosh energiyasi QTEMning istiqbolli va jadal rivojlanayotgan turlaridan biri hisoblanadi. Shu sababli quyosh, shamol, biogaz va gidroenergiya kabi energiya turlaridan foydalanishni yanada rag‘batlantirish zarur. An‘anaviy energiya manbalari har doim ham chekka va yetib borish qiyin bo‘lgan hududlarda yashovchi aholini, shuningdek mavsumiy ishchilar va ilmiy ekspeditsiyalarni elektr, issiqlik va suv bilan ta‘minlab bera olmaydi. Ishchi harorat oshishi bilan quyosh panellarining har bir turi turlicha ishlaydi. Masalan, kremniy asosidagi elementlarda nominal haroratdan har bir daraja ortiqcha bo‘lishi bilan nominal quvvat 0,43–0,47 % ga kamayadi, kadmiy telluridi asosidagi quyosh elementlarida esa bu ko‘rsatkich atigi 0,25 % ni tashkil etadi.

Quyosh panellarining qizib ketish muammosini hal qilish maqsadida bir qator yillar davomida havo va suv orqali sovitish, majburiy sovitishga ega gibrid konstruksiyalarni ishlab chiqish va takomillashtirish ishlari olib borilmoqda. Biroq quyosh energetik qurilmalarini joriy etish tajribasi loyihalash ishlarida real metrologik sharoitlarni hisobga olish katta harorat tebranishlari sababli qiyin ekanligini ko‘rsatmoqda [1].

Shundan kelib chiqib, quyosh energetik qurilmalarini joriy etishdan eng yuqori samara olish uchun ularni bosqichma-bosqich joriy etish zarur, deb xulosa qilish mumkin [2]. Keyinchalik joriy etilgan ob‘ektda meteosharoitlarni qo‘shimcha o‘rganish maqsadida eng ekstremal meteosharoitlar davrida quyosh elektr qurilmalarining haroratini uzluksiz monitoring qilish lozim.

Ishning maqsadi konsentratorli quyosh suv isitgichining energoeffektivligini va quyosh panelining ishchi yuzasi haroratini monitoring qilishdan iborat.

Zamonaviy mikroelektronika va telekommunikatsiya elementlar bazasini, texnik va dasturiy vositalarni hamda axborot-o‘lchash tizimlari usullarini qo‘llash energetik qurilmalarning harorat va boshqa ekspluatatsion xarakteristikalarini monitoring qilish uchun yanada kompakt va arzon avtomatlashtirilgan qurilmalarni yaratish imkonini beradi. Konsentratorli quyosh suv isitgichining energoeffektivligini va quyosh panelining ishchi yuzasi haroratini monitoring qilish uchun avtomatlashtirilgan tizim taklif etilgan bo‘lib, uning blok-sxemasini 1-rasmda keltirilgan. Tizim quyidagi bloklarni o‘z ichiga oladi: 1 - nazorat ob‘ekti, 2 - o‘lchash datchiklari bloki, 3 - ichida analogo-raqamli o‘zgartirgich (ARO‘) mavjud mikroprotssessor, 4 - ma‘lumotlarni simsiz uzatish uchun modem GSMSIM900, 5 - monitoring natijalarini qayd etish va qayta ishlash uchun masofaviy WEB-server.



**1-rasm. Haroratni monitoring qilish tizimi**

Qurilma quyidagicha ishlaydi. Nazorat ob‘ektidan chiqadigan signal o‘lchash datchiklariga (harorat, quyosh nurlanish oqimi, sarf va boshqalar) ta’sir qiladi. Natijada o‘lchash datchigi chiqishida nazorat qilinayotgan kattalikka proporsional signal hosil bo‘ladi. Ushbu signal monitoring tizimining mikroprotssessorining analog kirishiga (funksional sxemada 3-blok) uzatiladi. Signal amplitudalari raqamli ko‘rinishga aylantirilgan-dan so‘ng ma‘lumot uzatish dasturi (Client–Server) orqali GSMSIM900 modemining kirishiga (4-blok) uzatiladi. Modemda GSM aloqa operatori (masalan, Beeline) SIM-kartasi o‘rnatilgan bo‘ladi. Keyinchalik o‘lchash ma‘lumotlari ichki dasturiy ta’minot boshqaruvi ostida monitoring tizimining WEB-serveri (5-blok) orqali ma‘lumotlar bazasiga uzatiladi.

Jamlangan ma‘lumotlar serverda yoki foydalanuvchining tanlangan kompyuterida masofaviy tahlil qilinadi va energetik qurilmalarning ish rejimlariga tuzatishlar kiritish uchun foydalaniladi. Ushbu ma‘lumotlar shuningdek loyihalanadigan quyosh energetik qurilmalarining ekspluatatsion metrologik sharoitlarini aniqlashda ham qo‘llaniladi.

Taklif etilgan monitoring tizimi issiqlik-energetik va elektroenergetik quyosh qurilmalarining ishchi parametrlarini nazorat qilish jarayonini avtomatlashtirish imkonini beradi hamda o‘lchash eksperimentlarining takrorlanuvchanligini ta’minlaydi. O‘lchash eksperimentlari natijalari ma‘lumotlar bazalarida jamlanadi. Internet orqali ushbu ma‘lumotlar bazalariga masofaviy kirish bir nechta mutaxassislar tomonidan bir vaqtning o‘zida ma‘lumotlarni qayta

ishlash imkonini yaratadi. Taklif etilgan monitoring tizimlari energetik gelioqurilmalar samaradorligini baholashda sub’ektiv omillarni minimallashtirish imkonini beradi.

#### Adabiyotlar

1. N.S. Mammadov, N.A. Ganiyeva, G.A. Aliyeva, “Role of Renewable Energy Sources in the World”// Journal of Renewable Energy, Electrical, and Computer Engineering, Vol. 2, №2, pp. 63-67, Indonesia, 30 September 2022.
2. N. Mammadov, K. Mukhtarova “Analysis of the smart grid system for renewable energy sources”// Journal «Universum: technical sciences”, № 2 (107), pp. 64-67, 2023.

## INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR BATTERIES

**H. Mamarasulova**

*Center for Nanotechnology Development at the National University of Uzbekistan  
e-mail [mamarasulovahanifa2@gmail.com](mailto:mamarasulovahanifa2@gmail.com)*

Solar energy is currently one of the most dynamically developing areas of global energy. An important indicator of solar battery performance is the efficiency of their use. Various methods are used to improve the efficiency of solar panels. First of all, this is increasing the efficiency of the solar panel itself by changing the technology for producing the panels themselves. Currently, a technology has been developed that allows for an efficiency rate of up to 28.3 percent [1]. Secondly, this is the development of solar panel designs that allow for the most efficient production of solar energy. Thirdly, the use of sun tracking systems that orient solar panels to maximum intensity. The main idea is to maximize the impact of sunlight to increase the efficiency and effectiveness of the solar panel.

The feasibility of using a particular design of photovoltaic installation depends on many factors, including the cost of generated electricity, possible placement area, latitude of the area, technology for manufacturing photovoltaic modules and local weather conditions.

#### *1. Angle and orientation*

If solar modules are installed correctly, they can achieve maximum absorption of solar radiation. This way, the panels can increase the amount of electricity they produce. Angle and orientation are two main factors to consider when installing. In most cases, solar modules receive the best exposure to sunlight when the angle between them is 18-36 degrees. For those living in the northern hemisphere, solar panels should be located on a south-facing slope. In the southern hemisphere, solar panels should be installed on north-facing slopes.

#### *2. Tracking the position of the sun*

Another great way to increase the efficiency of your solar panels is to track the sun. Tracking systems have recently been introduced and have proven to be effective, increasing the efficiency of your panels by up to 50%. Direct rays of the sun carry more clean energy than indirect rays. This is done with a special device called a solar tracker. In a standard design, the solar panel mount

remains stationary. Tracking ensures that the solar panel always faces the incoming beam of light. Tracking allows the panel to be exposed to more solar energy. Consequently, the electricity production will be higher due to the conversion of more solar radiation into electricity. However, tracking is the key to increasing the efficiency and effectiveness of solar panels, as it increases the amount of sunlight available for conversion.

Solar panels can be mounted at the operating site either stationary, at a certain angle to the horizon, or movably - for optimal orientation relative to the position of the Sun. Rotating structures with Sun tracking systems are usually called tracker orientation systems, or solar trackers. The use of two-axis trackers allows for the most efficient orientation of the active surface of photomodules and a significant increase in energy production compared to fixed placement - up to 30 ... 40% [2]. Solar modules developed using bifacial technology have the following advantages:

- additional power (due to two-sided sensitivity and additional contribution from the reverse side);
- lower energy losses (due to lower heating, due to the transparency of double-sided modules for IR radiation). There are designs of stationary and tracker systems with double-sided photomodules. Mirrors are used to illuminate the back side of the battery in highly efficient systems. With the optimal orientation of the front side of the battery to the Sun (maximum irradiation intensity), the back side of the battery is illuminated by a system of mirrors also in an optimal way, that is, perpendicular to the surface of the photomodules. This design provides the maximum increase in efficiency when using a two-axis tracker, constantly orienting the front surface of the battery perpendicularly, and the side mirrors - at an optimal angle of  $45^\circ$  to the direction of incidence of the sun's rays. A simplified image of the installation with a system of mirrors and a two-axis tracker is shown in Fig. 1.



**Fig. 1. Solar installation based on double-sided photomodules and a two-axis tracker**

The solar battery and mirrors are rigidly attached to the supporting frame. The mirrors can be made of sheet material (aluminum, stainless steel) or polymer film with a reflective coating. In this case, it is advisable to arrange the mirrors to reduce the settling of dust and snow on their surface and reduce maintenance costs. Maintenance costs are reduced by combining solar panels into clusters. In this case, control data is accumulated and processed in special data concentrators. In the event of deviation of the SB operating parameters from the standard ones, a message is sent to the maintenance personnel with the exact coordinates of the faulty unit. Thus, it is possible to remotely control the SB operation and evaluate the generated energy. The increased use of renewable energy sources, both autonomously and as part of energy systems, poses new challenges for their management and efficient use.



### **Conclusion**

The developed design of the SB can significantly increase the energy output of the battery without significantly increasing the area, and accordingly, the dimensions. The use of control units for a two-axis tracker based on FPGA makes it possible to increase the control functionality with low energy costs. The given structure allows for easy scaling of the number of groups, while the costs for local networks do not increase.

### **Literature**

1. Boosting Solar Panel Efficiency. <https://www.beny.com/en/boosting-solar-efficiency-all-you-need-to-know/>.
2. Increasing the efficiency of solar panels. <http://surl.li/szqlf/>.