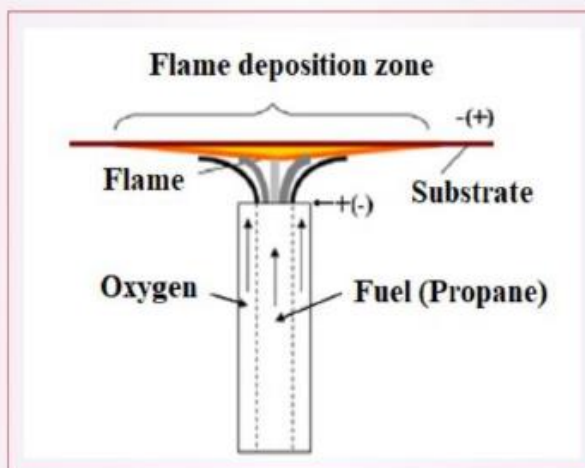




MINISTRY OF EDUCATION & SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
COMMITTEE OF SCIENCE THE INSTITUTE OF COMBUSTION PROBLEMS  
AL-FARABI KAZAKH NATIONAL UNIVERSITY



**XI INTERNATIONAL SYMPOSIUM**  
**«COMBUSTION AND PLASMOCHEMISTRY»**

November 20-22, 2019  
ALMATY, KAZAKHSTAN

**Материалы XI Международного Симпозиума «Горение и плазмохимия». 20-22 ноября 2019 г. Алматы, Казахстан. – Алматы: Институт проблем горения, 2019. - 271 с.**

**ISBN 978-601-04-4118-7**

Компьютерный набор и верстка М. Нажипкызы

Адрес оргкомитета:  
Республика Казахстан, 050012,  
г. Алматы, ул. Богенбай батыра 172,  
тел. 8 727 2675111, 2924346,  
факс: 8 727 2925811,  
e-mail: [zmansurov@kaznu.kz](mailto:zmansurov@kaznu.kz)

ISBN 978-601-04-4118-7

© Институт проблем горения, 2019

## **КЕУЕК КРЕМНИЙ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ КЕЙБІР НАНОӨЛШЕМДІК ЖӘНЕ ОПТИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ**

Икрамова С.Б., Тлеубаева И.С., Шабдан Е., Байганатова Ш.Б.,  
Мұңайтпас Н.А., Мұсабек Г.К., Диханбаев К.К.

### **Кіріспе**

Сонғы кезде кеуек кремний құрылымының әр түрлі электрлік және оптикалық қасиеттері наноэлектрониканың қалыптасу процестеріне ерекше көңіл аударылуда, әсіресе кеуектік материалдардың кері шағылысу қабаттарын [1,2] жеңіл әдспен алуға және жәй селективті эмиттерлік өңделуіне, олардың жарықты жұтылуына және беттік пассивациялауға мүмкіндік береді әрі көп қабатты белсенді құрылымдарды құрастыруға пайдаланылады [3].

Берілген ішкі кванттық тиімділіктер туралы жасалған анализдер кеуек кремнийдің жарықтың фотолюминесценция қасиеттеріне және беттік пассивациялық қаблеттілігін зерттеу мақсатымен іске асырылған. Сондықтан, жаңа жасалған электрохимиялық жеміру әдісімен алынған кеуек кремнийдің фотоөткізгіш қаблеттілігінің өсуі кристалл кремнийдің бастапқы меншікті кедергісінің артуымен және беттік рекомбинациялық жылдамдығының ыдырауымен көрсетті [4]. Бұл нәтижелер жүргізілген эксперимент барысында анықталды.

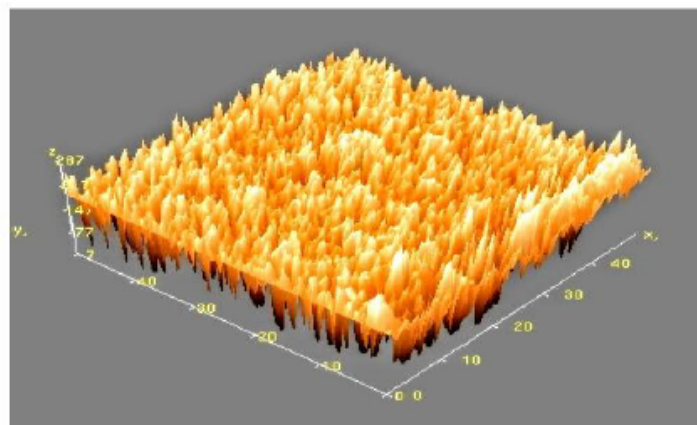
Кеуек кремний фотовольтаика үшін потенциалы өте жоғары технология екендігі бірнеше еңбектерде жарияланды [1,3,5]. Сонымен бірге кеуек кремний ең жоғарғы меншікті көлемімен ерекшеленеді, яғни жарықтың жұтылу ауданы өте кең екенін білдіреді. Ал кристаллиттердің өлшемі 2 нм-ден 10 нм диапазон аралығында болғандықтан қысқа толқынды фотондардың жұтылуы жоғарлайтыны айқындалды. Сондықтан кеуек кремнийдің қолданысы негізгі үш бағытта өрбиде, оның бірі жарық шығару диоды екіншісі фотовольтаика болса, үшіншісі сенсорлық датчиктерді құрастыруда болып табылды [6].

Бұл жұмыстың негізгі мақсаты нанокеуекті кремний материалының құрылымын алу және олардың Раман спектрлері арқылы нанокристалдардың өлшемдерін тәжірибе арқылы анықтау нанокеуекті құрылымның маңызды оптоэлектрондық қасиеттерін зерттеу болып табылды. Нанокеуек кремний матрицасының әртүрлі өлшемде қалыптасу әдістері оның кванттық-өлшемдік шектеу теориясы жүзінде болатыны көрсетілді [7].

### **Жүргізілген эксперименталдық әдісер**

Кеуек кремний морфологиялық құрылым көрінісін алу үшін NANOEDUCATOR II қондырғысы қолданылған. 1 суретте атомдықкөздік микроскопиясы көрсетілген.

Зерттеуге алынған үш үлгіге салыстырмалы түрде талдау жүргізу үшін, үлкейту шамасы ретінде (x, y осі бойынша) - 50 мкм<sup>2</sup> өлшемі алынған болатын. 3D бейнесіне қарай отырып кеуектердің қалыптасу барысында пайда болған ең төменгі және ең жоғарғы нүктелерінің арасындағы өлшемді анықтап, нанокристаллиттердің тығыздығын және өлшемдерін салыстыруға болады. Ерітіндінің HF : C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub> (этоксизтанол) – 1 : 1,1 мА/см<sup>2</sup> – 30 мин режимінде алынған үлгілер кеуектер құрылу процесі барысында қалыптасқан ең жоғарғы және ең төменгі нүкте арасы 287 нм - құрайды. Кеуектер пішіні және өлшемдері әр түрлі болып қалыптасқанын байқауға болады.



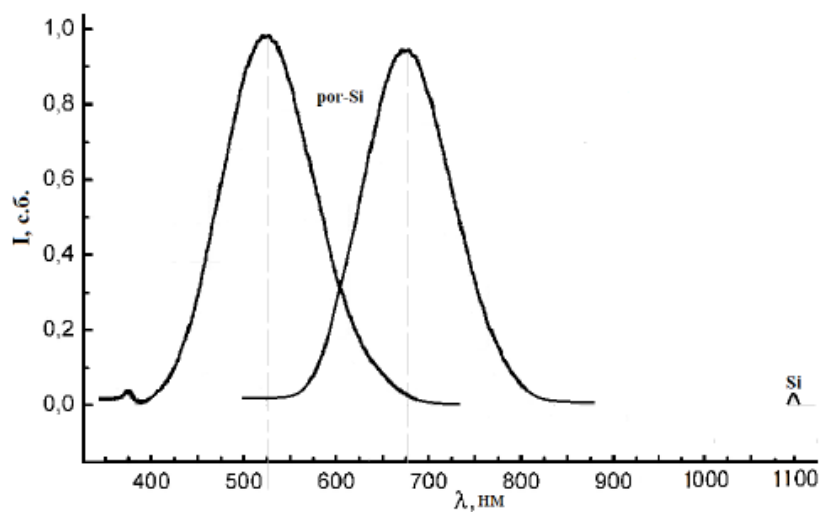
Сурет 1 - кеуек кремний құрылымының 3D бейнесі

Сонымен қатар кеуектерді құрайтын шыңдардың ұштары басқа үлгілерден айырмашылығы өткір пішінді емес болып келген. Электролит концентрациясы-кеуектілік тереңдігіне әсер берсе, ал анодтау тоғының тығыздығы кеуектер-тығыздығына, өлшемдеріне және санына ықпал етеді. Бұл электролитті қолдану арқылы кеуек кремний наноқұрылымынан электролюминесценция құбылысын алуға яғни жарық диодын алуға мүмкіндік береді және кеуек кремний құрылымының жоғарғы кеуектілігі күн элементінде эффективтілігін көрсететін антишағылысу қабаттарын қалыптастыруға болады

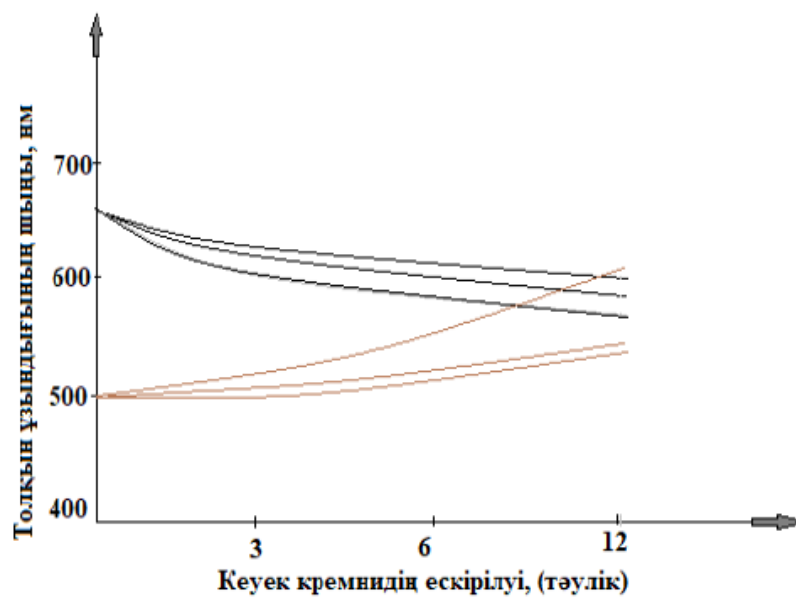
Кеуек кремнийдің келесі өте маңызды оптикалық қасиеттерінің бірі оның фотолюминесценция спектрлерінің қалыптасуы. 2 суретте кремний және нанокеуек кремний құрылымының фотолюминесценция спектрлері көрсетілген

Әдетте, кристалдық кремний жартылай өткізгішінің фотолюминесценциясы (ФЛ) толқын ұзындығының көру облысында болмайтыны белгілі, себебі кремний туразоналы емес жартылайөткізгіш, оған қарамастан оның фотолюминесценция спектрі инфрақызыл 1,1 мкм диапазонында болмашы аз спектрі байқалады (2-сурет). Егерде кремний бетінде наноқұрылымдарын отырғызу нәтижесінде, сол болмашы ФЛ спектрі толқын ұзындығының көру облысына қарай ұлғайады көру облысында да үлкен фотолюминесценция спектрлерін қалыптастыратынын көрсеттік.

Бірінші а) ФЛ спектрі тың жаңадан жасалған кеуек кремний спектрі болатын оның максимумы 675 нм тоқын ұзындығында орналасқан, жарты максимумының толық ені – (ЖМТЕ) 120 нм. Егер КК-ді қысқылды су ерітіндісіне салып құрғатсақ ол қысқа толқынға қарай ығысқанын және максимум шыңының сәл өскенін көреміз.



Сурет 2. Тұрақталған фотолюминесценция спектрлері



Сурет 3 - Фотолюминесценция шынының әр түрлі ортада ескілілуі



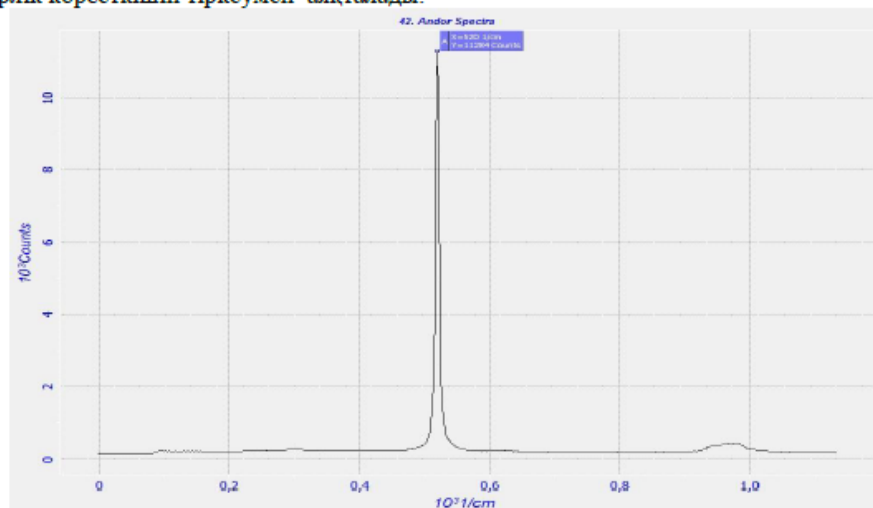


Кеуек кремнийдің фотолюминесценция спектрі сақталған ортаға өте сезімтал, өйткені кеуек кремнийдің меншікті ауданы және меншікті көлемі өте үлкен және жоғары құрылым шамамен  $600-1000 \text{ см}^2/\text{м}^3$  құрайды, сондықтан ФЛ шыңы өте тұрақсыз және уақыт өткен сайын өзгеріп отырады, өйткені нанокристаллиттердің оттегімен пассивациялануының себебінен екені белгілі, бірақта кеуек кремнийдің келесі режимдегі өзгерісі қызықтырды.

3-суретте фотолюминесценция шыңының уақыт аралық сақтау кезіндегі ескірілуі (старенне) тәуелділігі көрсетілген, мұнда екі тоқ тығыздығында  $1-5 \text{ мА}/\text{см}^2$  және  $30 \text{ мА}/\text{см}^2$  жүргізілген тармақтары ауада жарық ағынында және қышқылды су ерітіндісінде сақтаған кездегі удерістері көрсетілген. Үстінгі үш тармағы ( $1-5 \text{ мА}/\text{см}^2$ ) үлгілердің әр ортадағы құрылымның тотығу кезінде спектр шыңының қысқа толқынға ығысқанын аңғардық. Ал төменгі суреттегі ( $30 \text{ мА}/\text{см}^2$ ) үш тармағы жоғары тоқ тығыздығында жүргізілдіктен бастапқы спектр  $500 \text{ нм}$  орналасқан нүкте ұзын тоқын ұзындығына қарай ығысқанын көрдік, бұл өзгеріс қышқылды суда өңделген кеуек кремнийдің беті толық сутегі атомдарымен пассивациялануының салдарынын екенін түсіндіреміз.

Келесі эксперименталдық тәжірибеде Раман спектрлерін түсіру арқылы орындалған зерттеу нәтижелерінің кейбір ерекшелері айқындалды және нанокристаллиттердің өлшемдерін кіші жиілікте ығысу спектрлеріне бөлу арқылы анықтадық.

Ашық Типтегі Ұлттық Нанолабораторияда орналасқан SPECTRUM [8] қондырғысы арқылы Раман спектрін немесе басқа атауы комбинациялық шашырау спектрін зерттеу жүргізілген болатын. Кеуек кремний үшін раман спектрін алу, бірнеше рет қайталап отырып тіркеу арқылы алынған болатын, себебі кеуекті қабат қалыңдығы өте аз шаманы көрсетеді және түскен жарықты жақсы өткізіп, астындағы монокристаллды кремний төсенішінің спектрлік көрсеткішін тіркеумен аяқталады.

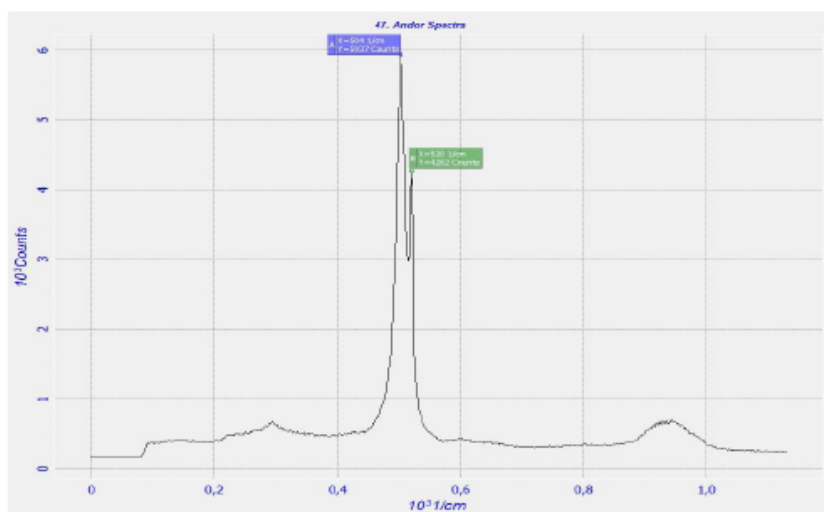


Сурет 4. Монокристаллды кремний Раман спектрі

4 суретте монокристаллды кремний раман спектрі көрсетілген. Кремний төсеніші үшін бұл спектр  $520 \text{ см}^{-1}$  толқындық санына тең екендігі белгілі, ал саңылаудың жартылай ені  $\Delta\omega = 1-35 \text{ см}^{-1}$ .

Кеуек кремний үшін (5 сурет) амплитуда саңылауының сол етегі кіші жиілік аумағына ығысу арқылы анықталады және толқындық саны  $500 - 520 \text{ см}^{-1}$  дейінгі шаманы көрсетеді,

ал жартылай ені  $\Delta\omega = 4,5 - 6,0 \text{ см}^{-1}$ . Егерде зерттелінетін материалымыз аморфты болатын болса онда оның толқындық саны  $480 \text{ см}^{-1}$  шамасынан бастап және кіші болуы мүмкін, ал жартылай ені  $\Delta\omega = 100 \text{ см}^{-1}$  құрайды.



Сурет 5. HF : C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub> – 1 : 1; 10 мА/см<sup>2</sup> – 15 мин мин режимінде алынған кеуекті кремний үлгісінің Раман спектрі

Кеуек кремний құрылымының тағы бір қызықты оптикалық қасиеттерінің спектрлерінің бірі – Раман спектрінің ығысуы болып табылады, яғни үлгінің комбинациялық шашырау спектрлерінің өзгеруі. Әдетте кремний кристалының Раман спектрі толқын санының  $520 \text{ см}^{-1}$  аймағында орналасатынын білеміз, кремний атомдары кристалда біріңғай реттеліп орналасқандықтан спектрі өте тар болып келеді [9]. Спектрдің кіші жиілікке ығысу үдерісінен алынған әрбір толқын санындағы нанокристалиттің өлшемін (размерін) таптық.

Төменгі 6 суретте Кордон теңдеуін пайдаланып кристаллиттердің өлшемдерін анықтадық.

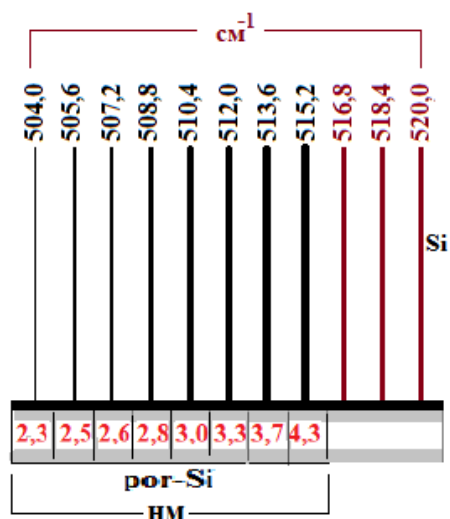
Ол келесі Кордон формуласы бойынша есептелді:

$$d = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{224}{\Delta\omega}} / 10, \text{ нм}$$

Сонымен, Раман спектрінің кіші жиілікке ығысу нәтижесінен осы ығысу интервалындағы үлестірілген нанокристаллиттерінің өлшемдерін анықтадық. Алынған кеуек кремний матрицасында келесі нанокристаллиттердің жиынтығы бар екенін көрдік: 2,3 нм; 2,5 нм; 2,6 нм; 2,8 нм; 3,0 нм; 3,3 нм; 3,7 нм; 4,3 нм.

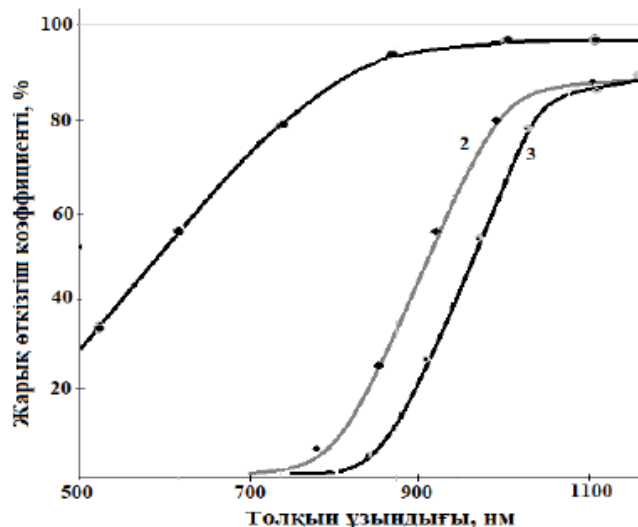
Кеуек кремнийдің келесі оптикалық қасиеттерінің бірі оның жарық өткізгіш қабілеттігі, яғни жарық өткізгіш коэффициенті мен толқын ұзындығының арасындағы тәуелділік. Төменгі 7-суретте осы тәуелділік көрсетілген.





Сурет 6. Үлестірілген нанокристалиттердің өлшемдері

Кеуек кремнийдің жарық өткізгіш спектрі толқын ұзындығының 500 нм- 1200 нм диапазон аралығында Ламбда-35 қондырғысы арқылы өлшенді. Эксперимент барысында кеуек кремний құрылымын қалыптастыру үшін екі түрлі кристалл кремний төсенішін қолдандық, оның бірі р-типті концентрациясы  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  аз бор атомы легирленген болса екіншісі  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  өте жоғары легирленген р<sup>+</sup> типті кремний монокристалы болды.



Сурет 7. Кеуек кремний үлгілерінің әр түрі меншікті кедергідегі түсірілген жарық өткізу спектрлер

7-суретте 1-қисық сызық концентрациясы аз (өзгешеленбеген шала өткізгіш) кремнийге отырғызылған кеуек кремнийдің өткізгіш коэффициенті толқын ұзындығының 600 нм-ден 1100 нм 90-92 % көрсеткішін құрады, ал 2-қисық сызық жоғары легирленген кремний үшін (өзгешеленген шала өткізгіш) жарық өткізгіштігі 700-1200 нм толқын ұзындығында шамамен 50 % құраса, кристалл кремний үшін бұл көрсеткіш тек қызыл толқын ұзындығында жарық өткізгіштігі шамамен 40 %-ті құрады. 3-қисық кристалл кремний төсенішінің жарық өткізгіш спектрі.

Демек, кеуек кремнийдің жарық өткізу қаблеттігі бастапқы кремний төсенішінің коспалық концентрациясына немесе меншікті кедергісіне байланысты екенін көрсеттік. Өйткені кеуек кремнийдің бұл оптикалық қасиеті жарық өткізгіш матрицаларын немесе күн элементтерін қалыптастыруда зор маңызы бар сипаттамасының бірі болып табылады.

### **ҚОРЫТЫНДЫ**

Жұмысты орындау барысында, тәжірибенің нәтижелеріне келесідей қортынды жасауға болады:

1. Нәтижелері бойынша кеуекті қабаттың қалыңдығының өлшемі 6,18 микрон құрайтынын айта аламыз. HF : C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>2</sub> – 1 : 1, 1 mA/cm<sup>2</sup>– 30 мин режимінде алынған үлгінің морфологиясы ең жақсы кеуектілікті көрсетті десек болады. Бірақ этоксизтанол концентрациясы екі есе өсірген жағдайда үлгінің кеуектілігі жоғарлағанын байқадық, демек этоксизтанол концентрациясы кеуектердің өлшемдеріне әсер бергенін байқадық.

2. Тәжірибе барысында наноқұрылымдардың кеуектілігі оның анодтау ток тығыздығына, уақыт аралығындағы химиялық жеміру үдерісіне, электролит құрамына тығыз байланысты екенін аңғардық. Сонымен қатар кеуектілігі бастапқы кремний төсенішінің меншікті кедергісіне тәуелді екенін Раман спектрі арқылы бақыладық.

3. Барлық үлгілердің алынған нәтижелері бойынша анықтағанмыз, фотолюминесценция спектрі толқын ұзындығы 350-850 нм диапазон аймағында шоғырланғанын білдік. HF концентрациясының мөлшері ауыспалы түрде фотолюминесценция қарқындылығына, ал анодтау ток тығыздығы толқын ұзындығына әсер беретіндігі байқалды.

4. Фотолюминесценция шыңы жоғары ток тығыздығында жүргізілген үлгілер үшін (30-50 mA/cm<sup>2</sup>) қысқа толқын ұзындығына (500-510 нм) ығысқанын көрдік, ал төменгі ток тығыздығында жүргізілген (1,0-10 mA/cm<sup>2</sup>) үлгілер үшін толқын ұзындығының көру (600-610 нм) облысында орналасқанын көрдік. Үлгілерді әр түрлі қышқылдық сұйық ортада өңделу кезінде ФЛ шыңының өзгергенін көрдік. Айталық 600-610 нм шыңында орналасқан ФЛ қысқа толқынғы ығысса, ал 500-510 нм шыңы бар үлгілер керісінше қысқа толқынға ығысады.

5. Раман спектрін өлшеу нәтижелеріне қарай отырып кеуек кремний спектрінің кіші жиілікке 504 см<sup>-1</sup> толқын санына ығысқанын байқадық бұл кремнийдің 520 см<sup>-1</sup> тоқындық санынан 16 см<sup>-1</sup> жиілік айырмашылығына өзгергенін байқадық. Кардон формуласы арқылы нанокристалдың көлденең кимасының өлшемі анықталды. Нанокристаллиттердің көлденең кимасының диаметрі 4,5 – 6,0 нм құрайтынын анықтадық.

6. Кеуек кремнийдің жарық өткізу спектрін өлшей отырып келесі нәтижені анықтадық. Бастапқы кремний кристалының меншікті кедергісі төмен болған сайын оның жарық өткізгіштігі күр өскенін байқадық, ал меншікті кедергісі жоғары кремнийден жасалған кеуек кремнийдің жарық өткізгіш қаблеттілігі кемігенін дәлелдедік.

**ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ**

1. Mussabek G.K., Timoshenko V.Yu., Dikhanbayev K.K., Dzhunusbekov A.S., Taurbayev T.I., Nikulin V.E., Taurbayev Ye.T. Antireflections coatings for silicon solar cells formed by wet chemistry methods. //KazNU Bulletin, physics series.-2013, №2(45). P. 14-19.
2. Венгер Е.Ф. Изменение свойств системы (пористый Si) Si при постепенном травлении слоя пористого Si [Текст] Венгер Е.Ф., Горбач Т.Я., Кириллова С.И. [и др.] //Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т.36. – Вып.3. – С. 349-354.
3. К.С. Секербаев, Е.Т. Таурбаев, А.И. Ефимова, Г.Е. Ботантаева, Д. Ермухамед, Г.К. Мусабек, К.К. Диханбаев, В.Ю. Тимошенко, Т.И. Таурбаев. Күн элементтері және ИҚ фотоника үшін жартылай өткізгіштік нанокұрылымдар. //Вестник КазНУ, Серия физическая. –2016. Т.4, № 59. С. 110-117.
4. О.Ю. Бабыченко. Многокомпонентные полупроводниковые структуры в конструкции солнечных элементов. //ISSN0485-8972. Радиотехника. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. -2017. Вып.189. -С. 172-178.
5. Z.Zh. Zhanabayev, K.K. Dikhanbayev, T.Yu. Grevtseva. Optimal geometrical parameters of porous layer in silicon solar cells. //J. Physical Sciences and Technology. 2017. Vol. (No. 2). P. 73-80.
6. А.И. Бондарев, З.Ж. Жанабаев, К.К. Диханбаев, С.М. Манаков. Поверхностная модификация газового сенсора на основе пористого кремния и кремниевых нанонитей. //Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологии и наноматериалов (Сарсембиновские чтения), 17-18 мая 2018 г. С. 18-24.
7. M.V. Wolkin, J. Jorne, P.M. Fauchet, G. Allan, C. Delerue, Phys. Rev. Lett. 82 (1999). P. 197.
8. Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа [Электрондық қор].–Элект. апарат. Кіру режимі: <http://www.nnlot.kz/RU/Applications.html>.
9. Bustarret E., Hachicha M.A., Brunel M. Experimental determination of the nanocrystalline volume fraction in silicon thin films from Raman spectroscopy // Appl. Phys. Lett. 1988. Vol. 52, No.20. P. 1675.

