

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-65-73>

УДК 538.9

SiO₂/Si ТРЕКТІК ТЕМПЛЭЙТІНДЕГІ ҚАЛАЙЫ ДИОКСИДІНІҢ НАНОСЫМДАРЫН СИНТЕЗДЕУ ЖӘНЕ ОПТИКАЛЫҚ, ЭЛЕКТРЛІК ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

Д. А. Джунисбекова*, А. К. Даулетбекова, З. К. Баймуханов, А. Д. Акылбекова,
Г. М. Аралбаева, А. Б. Базарбек, Ж. Қ. Қойшыбаева

«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан

**Байланыс үшін E-mail: diana911115@gmail.com*

Бұл жұмыста SiO₂/Si тректік темплэйтіне химиялық тұндыру (ХТ) әдісі арқылы алынған қалайы диоксиді (SnO₂) наносымдарының (НС) құрылымдық, оптикалық және электрлік сипаттамаларын зерттеу нәтижелері ұсынылған. SiO₂ қабатындағы латентті тректер $\Phi = 10^8 \text{ см}^{-2}$ флюенсте энергиясы 200 МэВ Хе жылдам ауыр иондарымен сәулелендіру және фтор қышқылының (HF) 4% сулы ерітіндісінде өңдеу арқылы жасалды. Таңдалған химиялық тұндыру әдісі SiO₂ нанокеуектерінде жартылай өткізгіш оксид наносымдарын тұндыру үшін кеңінен қолданылады. ХТ әдісі наноөткізгіштерді тұндыру үшін арнайы жабдықты қажет етпейтіндіктен үнемді болып саналады. Тұндыру үшін металдың координациялық қосылысы мен тотықсыздандырғыш ерітіндісі қолданылады. ХТ процесінен кейін кеуектердің толтырылу деңгейін талдау үшін Zeiss Crossbeam 540 сканерлеуші микроскопының көмегімен үлгілердің беттік морфологиясы зерттелді. SnO₂ нанокеуектерімен толтырылған SnO₂/SiO₂/Si наноқұрылымдарының кристаллографиялық құрылымы рентгендік дифракция әдісі арқылы зерттелді. Рентгендік құрылымдық талдау (XRD) Rigaku SmartLab рентгендік дифрактометрінде жүргізілді. Нәтижесінде SnO₂ наносымдарының орторомбты кристалдық құрылымы бар SnO₂-HC/SiO₂/Si наногетероқұрылымы алынды. Фотолюминесценция (ФЛ) спектрлері CM2203 спектрофлюориметрі (Solar) көмегімен 240 нм толқын ұзындығындағы жарықпен қоздыру арқылы өлшенді. SnO₂-HC/SiO₂/Si құрылымдарының фотолюминесценция спектрінің гауссқа жіктелуі олардың интенсивтілігінің төмен екенін көрсетті, бұл негізінен оттегінің вакансиялары, түйінаралық қалайы немесе байланыстары бұзылған қалайы сияқты ақаулардың болуына байланысты. VersaStat 3 потенциостатының (Ametek) көмегімен алынған үлгілердің электрлік сипаттамасы зерттелді. Вольтамперлік сипаттамаларды өлшеу, алынған SnO₂-HC/SiO₂/Si наногетероқұрылымында р-п ауысымының массивтері бар екенін көрсетті.

Түйін сөздер: SiO₂/Si тректік темплэйті, химиялық тұндыру, SnO₂ наносымдары, қалайы диоксиді, темплэйттік синтез.

КІРІСПЕ

Соңғы жылдары әртүрлі наноөлшемді объектілердің ерекше қасиеттерінің көрініс таба бастауынан оларды зерттеуге үлкен қызығушылық туды. Қолдану аясына байланысты әртүрлі функционалдық қасиеттері бар материалдар таңдалады. Бүгінгі технологиялар қажетті қасиеттері бар наноқұрылымдардың (НҚ) алуан түрлілігін алу үшін наноөлшемде осындай материалдардың морфологиясын бақылауға мүмкіндік береді [1–3].

Наноматериалдарды қалыптастырудың қарапайым тәсілдерінің бірі нанокеукті шаблондарды (матрицаларды) пайдалану болып табылады [4–6]. Бұл әдісті қолдана отырып, кеуектер ішінде осы класс материалдарының өздігінен ұйымдастырылуына байланысты әртүрлі құрылымдарды алуға болады. Кеукті пайдалану жартылай өткізгіштерден [7, 8], металдардан [9–11] және т.б. нанобөлшектер, нанобіліктер, наноталшықтар және наносымдарды алуға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта кремний негізіндегі наножүйелерді технологиялық процестерге енгізу кезінде ең тиімдісі кремний оксиді негізіндегі темплэйттерді пайдалану болып табылады. Қажет болу себептеріне байланысты, кеук параметрлерін, яғни диаметрлері,

жақтарының арақатынасы және санының тығыздығын, өзгертіп отыру арқылы қажетті тректерді пайдалана аламыз.

Кеукті кремнийді қолдану [12] немесе газ фазасынан плазмохимиялық тұндыру әдісімен кеукті a-SiO₂ тікелей тозаңдату арқылы [12, 13] алынатын кремний оксидінің темплэйттері (кеук диаметрлері ~100 нм) әлдеқайда үнемді әдіс болып табылады. Бүгінгі таңда кеукті a-SiO₂/Si қабаттарынан темплэйттер жасауға арналған әдістемелердің осы түрінің потенциалы бойынша ауқымды зерттеулер жүргізілуде [14–27].

Жылдам ауыр иондармен сәулелендіру (ЖАИ) және химиялық өңдеу процесін қамтитын тректік технологияларды қолдану арқылы SiO₂ қабатындағы кеуектер қалыптасады [28, 24]. Әрі қарай нанокеуктерді әртүрлі материалдармен толтыру процесі жүзеге асырылады. Бұл жұмыста қалайы диоксидін тұндыру мүмкіндігі қарастырылады.

Қалайы (VI) оксиді – п-типті өткізгіштігі бар жартылай өткізгіш оксид. Оның бірегей электрлік және оптикалық қасиеттеріне байланысты ол перспективалы материал болып табылады. Сонымен қатар, SnO₂ төмен электр кедергісі, жоғары электр өткізгіштік және көрінетін электромагниттік диапазондағы

жоғары оптикалық мөлдірлік сияқты бірқатар тамаша қасиеттерге ие және осы материалдың аталып өткен осындай қасиеттері оларды наноқұрылғыларға арналған жаңа қосымшаларды әзірлеуде пайдалану мүмкіндігін ашады.

Басқа жартылай өткізгіштермен салыстырғанда SnO₂ маңызды функционалды материал болып табылады, ол мөлдір өткізгіштерде [29], транзисторларда [30], оптоэлектрондық құрылғыларда [31, 32], газ датчиктерінде [33] және т.б. кеңінен қолданылады.

Бүгінгі таңда әртүрлі морфологиясы бар SnO₂ наноқұрылымдарын синтездеу үшін темплэйттік әдіс [34], гидротермиялық әдіс [35], бу фазасынан химиялық тұндыру (CVD) [35, 37] және электрохимиялық тұндыру [38] әдісі қолданылады.

Бұл жұмыста, SiO₂/Si тректік темплэйттерін қалайы диоксидімен (SnO₂) толтыру және SnO₂/SiO₂/Si наносымдарын алу үшін темплэйттік синтез әдісі қолданылған болатын. Бұл синтездеу әдісі нанокеуектерді қалайы диоксидімен толтыру арқылы осындай гетероқұрылымдарды (SnO₂/SiO₂/Si) алу үшін үнемді болып саналады. Таңдалған темплэйттік синтез материалдарды нанокеукті матрицаларға химиялық және электрохимиялық тұндыруға негізделген. ZnO үшін жүргізілген зерттеулердегі [39] сияқты, темплэйттік синтездің ерекшеліктері морфологияны, кеуектер тығыздығын, формасы мен өлшемдерін бақыланатын манипуляциялау арқылы наноматериалдардың физикалық, химиялық және электрондық қасиеттерін бейімдеу мүмкіндігі болып табылады. SnO₂ наноматериалдарының морфологиясын бақылау олардың сипаттамаларын жақсартуы, сонымен қатар жаңа мәселелерді шешетін құрылғыларды жасау үшін қолдану аясын кеңейтуі мүмкін. Бұл жұмыста жүргізілген зерттеудің мақсаты p-n ауысымының массивтері бар SnO₂-HC/SiO₂/Si наногетероқұрылымдарын қалыптастыру болып табылады.

ЭСПЕРИМЕНТТІК БӨЛІМ

Жұмыста қолданылған SiO₂/Si құрылымы (n-типті), кремний пластинасын ылғалды оттегі атмосфера-сында 900 °C температурада термиялық тотықтыру арқылы жасалған. Эллипсометрия көмегімен алынған мәліметтер бойынша оксидті қабаттың қалыңдығы 700 нм. SiO₂ матрицасында жасырын тректерді құру үшін, үлгілер энергиясы 200 МэВ болатын ¹³²Xe иондарымен DC-60 үдеткішінде сәулелендірілді, флюенс мәні 10⁷–10⁸ см⁻² диапазонында болды.

Жылдам ауыр иондармен (ЖАИ) сәулелендірілген үлгілерде нанокеукті шаблондарды қалыптастыру үшін, құрамында m(Pd) = 0,025 г палладий бар фтор қышқылының (HF) 4% сулы ерітіндісі пайдаланылды. Өңдеу бөлме температурасында (18±1 °C) белгілі бір уақыт аралығында жүргізілді. Нанокеуектердің өлшемдері өңдеу уақытына байланысты басқарылды. HF ерітіндісінде өңдеу процесінен кейін үлгілер деионизацияланған суда шайылды.

Бұл жұмыста нанокеуектерді толтыру үшін химиялық тұндыру (ХТ) әдісі қолданылды. SiO₂ нано-

кеуектерінде жартылай өткізгіш оксид наносымдарын (HC) тұндыру үшін кеңінен қолданылатын әдіс химиялық тұндыру болып табылады. Тұндыру үшін металдың координациялық қосылысының ерітіндісін және тотықсыздандырғышты пайдалану керек. Бұл әдіс арнайы құрал-жабдықты қажет етпейді және арзан болып саналады [40].

ХТ әдісімен қалайы диоксиді (SnO₂) наноөткізгіштерін алу үшін келесідей құрамы бар сульфатты ерітінді қолданылды: 0,67 г SnSO₄ + 4 г CH₄N₂S + 2 мл H₂SO₄. CH₄N₂S деионизацияланған суда ерітілді, ал SnSO₄ қоюланған күкірт қышқылының аз мөлшерінде ерітілді (химиялық таза), екі ерітінді біріктіріліп, pH 2-ден 4-ке дейінгі аралықтағы мәнге реттелді. ХТ процесі 323 К температурада жүргізілді.

Эксперимент нәтижесінде алынған наносымдарды (наноқұрылымдарды) егжей-тегжейлі зерттеу және өлшеу нәтижелерін интерпретациялау диагностикалық және өлшеу жабдықтары саласындағы заманауи әзірлемелерді пайдалануды талап етеді. Сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) және рентгендік құрылымдық талдау (XRD) әдістері наноматериалдардың құрылымдық ерекшеліктері мен беттік морфологиясын зерттеудің негізгі әдістері болып табылады.

SiO₂/Si тректік темплэйттеріндегі толтырылған кеуектерді талдау үшін, сондай-ақ беттік құрылымдық ерекшеліктері мен морфологиясын зерттеу үшін, ХТ-дан кейін үлгілер 2–5 кВ кезінде кері шашыраған электронды детектормен жабдықталған Zeiss Cross-beam 540 (SEM, Германия) қос сәулелі сканерлеуші микроскоп арқылы зерттелді.

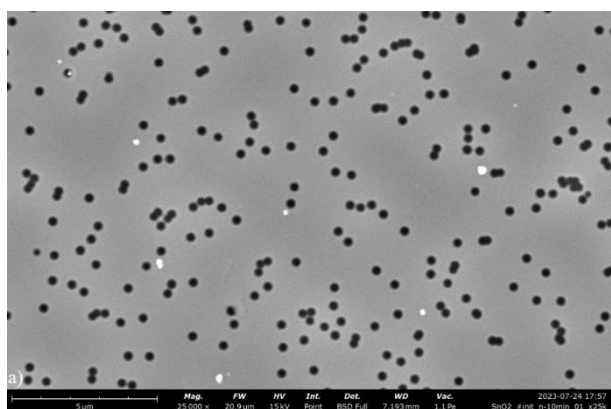
Рентгендік құрылымдық талдау (XRD) әдісін қолдана отырып, әртүрлі қасиеттері туралы, сонымен қатар SnO₂/SiO₂/Si құрылымдарының фазалық құрамы туралы толық ақпарат алдық. XRD спектрлері жоғары энергиялы 2D HPAD HyPix3000 детекторымен жабдықталған Rigaku SmartLab рентгендік дифрактометрiнiң көмегімен анықталды. TOPAS 4.2 бағдарламалық құралын және халықаралық ICDD дерекқорын (PDF-2 Release 2020 RDB) пайдалана отырып, алынған дифракция үлгілері негізінде фазалық құрамын және кристалдық ұяшық параметрлерін анықтау жүзеге асырылды.

CM2203 (Solar) спектрофлуориметрін пайдалана отырып, люминесценция спектрлері бөлме температурасында 240 нм қоздырылып 300-ден 800 нм-ге дейінгі спектрлік диапазонында тіркелген болатын. Спектрофлуориметр ультракүлгін және көрінетін спектрлік диапазондағы аса сезімтал өлшемдерді қамтамасыз етеді. Екі қосарлы монохроматорды пайдалану кедергі жасайтын сәулеленудің ең төменгі деңгейін қамтамасыз етеді, бұл өлшеудің жоғары дәлдігіне кепілдік береді.

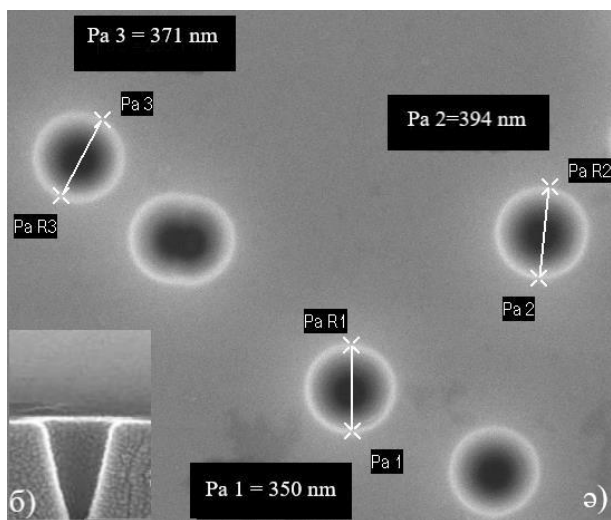
Алынған наносымдар массивтерінің электрлік қасиеттерін зерттеу үшін VersaStat 3 потенциостаты (Ametek) пайдаланылды. Бұл құрылғы ±2 А дейінгі максималды тоқты, ±12 В дейінгі кернеуді қамта-

масыз етеді. Вольт-амперлік сипаттамалар ауданы 0,7 см² толтырылған нанокеуектер массивінен өлшенді. Вольт-амперлік сипаттамаларын өлшеуге арналған қондырғы келесідей құрастырылды: үлгі екі металл пластина арасына орналастырылды, осылайша пластиналар матрицаның наносымдарды қамтитын бөлігін ғана жабады. Содан кейін пластиналар потенциостатты тізбектей қосу арқылы қуат көзіне қосылады. Жұмыста келтірілген вольт-амперлік сипаттама графиктері 2-ші ретті полиномды аппроксимация арқылы орындалды [41].

НӘТИЖЕЛЕР МЕН ТАЛҚЫЛАУ



а) өңделген беттің жалпы көрінісі



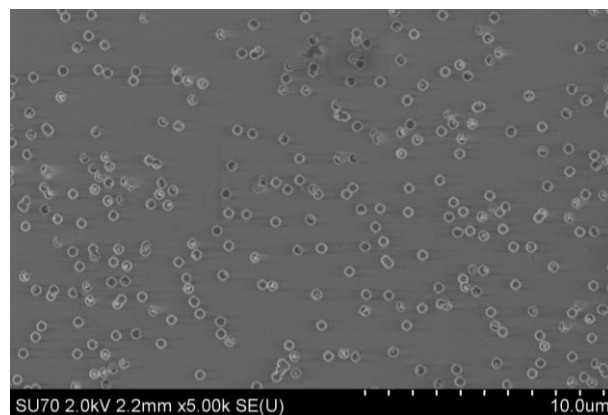
а) нанокеуктің үлкейтілген суреті,
б) нанокеуктің көлденең қимасы

Сурет 1 – HF ерітіндісінде өңдеуден кейінгі SiO₂/Si құрылымының СЭМ суреттері

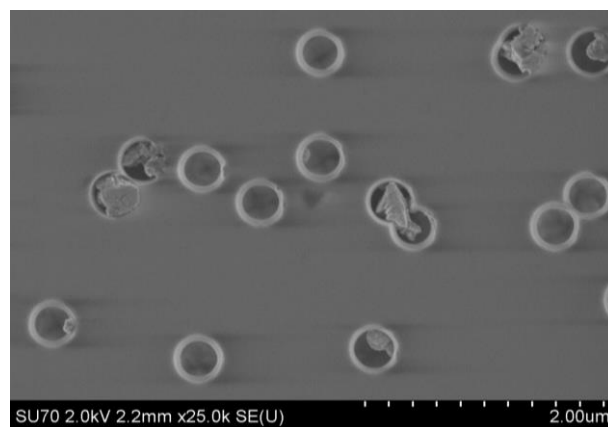
1-суретте HF ерітіндісінде өңдеу арқылы пайда болған бос нанокеуектер (қара шеңберлер), сондай-ақ олардың кесілген конус пішініндегі көлденең қимасы көрсетілген. Конус кремний төсенішіне тіреледі. Кеуектердің конустық пішіні Vt жол аймағында және Vb бүтін матрица көлеміндегі материалды салыстырмалы өңдеу жылдамдығымен түсіндіріледі [42]. Бұл конустық пішінді трансмиссиялық элек-

тронды микроскоп (ТЭМ) [43, 24] және атомдық-күштік микроскоп (АКМ) зерттеулері [44] растады.

2-суретте химиялық тұндырудан кейінгі темплэйт бетінің СЭМ суреті келтірілген.



а) SiO₂/Si бетінің СЭМ суреті

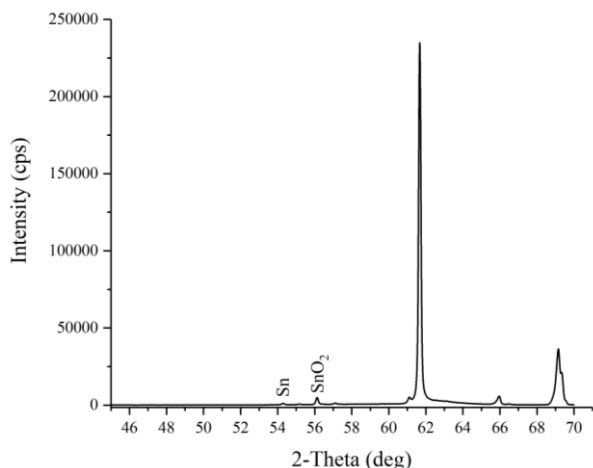


а) нанокеуектердің үлкейтілген суреті

Сурет 2 – SnO₂ химиялық тұндырудан кейінгі SiO₂/Si-n темплэйтінің бетінің СЭМ суреттері (t_{тұндыру} = 20 мин.)

2а суретінен көрініп тұрғандай, 20 минут аралығындағы химиялық тұндыру процесінде нанокеуектердің толтырылғаны айқын көрінеді. СЭМ суретін талдаудан, яғни 2а суретте келтірілген 2 μм масштабын ескере отырып нанокеуектердің диаметрі 350 нм-ден 430 нм-ге дейінгі диапазонда өзгеретінін көреміз. Сонымен қатар, алынған СЭМ суретін қолдана отырып, толтырылған нанокеуектер санының барлық нанокеуектер санына қатынасы арқылы нанокеуектерді толтыру дәрежесі 80% болғандығы анықталды.

Рентгендік құрылымдық талдау деректеріне сәйкес (3-сурет) SiO₂/Si тректік темплэйтінде сульфатты ерітіндімен химиялық тұндыру орторомбты құрылымы мен Pnnm(58) кеңістіктік топ симметриясы бар SnO₂ наносымдарының түзілуіне әкелді, сонымен қатар тетрагональды құрылымы және I4/mmm(139) кеңістіктік топ симметриясы бар Sn фазасы да пайда болды. Осы үлгі үшін рентгендік құрылымдық талдау нәтижелері кесте берілген.



Сурет 3 – 20 минут аралығында химиялық тұндыру әдісімен алынған SnO₂ үлгісінің рентгендік дифрактограммасы

Рентгендік құрылымдық талдау нәтижелеріне сүйене отырып, Sn және SnO₂ фазаларының концентрациялық құрамы, сәйкесінше, 22% және 78% құрайды деген қорытынды жасауға болады.

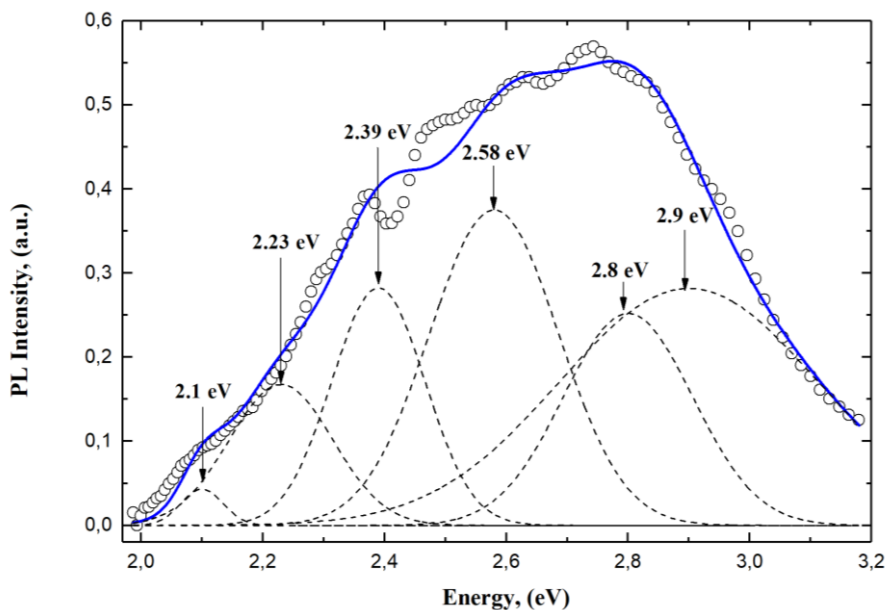
Эксперименттік [45, 46] және теориялық жұмыстардағы [47] ұяшық параметрлері, осы жұмыста синтезделген орторомбты қалайы диоксиді наносымдары үшін алынған деректермен жақсы сәйкес келеді.

Алынған наносымдардағы ақаулар мен қоспаларды анықтау үшін фотолюминесценция (ФЛ) сияқты оптикалық зерттеу әдістері қолданылды. SnO₂-HC/SiO₂/Si наногетероқұрылымының фотолюминесценциясы (ФЛ) толқын ұзындығы $\lambda = 240$ нм жарықпен қоздырылған кезде 300-ден 600 нм-ге дейінгі спектрлік диапазонда зерттелді. 4-суретте химиялық тұндыру әдісі арқылы алынған SnO₂-HC/SiO₂/Si құрылымдарының фотолюминесценция спектрінің гаустық жіктелуі көрсетілген.

Химиялық тұндыру арқылы алынған наносымдардың ФЛ спектрлерін, электрохимиялық әдіспен синтезделген наносымдардың ФЛ спектрлерімен салыстырғанда, максимумдар қарқындылығының төмендеуі болғандығын көрсетеді. Әртүрлі синтез әдістеріне, қолданылатын ерітінділерге және температураға байланысты материалда болатын қоспалар мен ақаулар ФЛ спектрлерінің қарқындылығын өзгертуде шешуші рөл атқара алады.

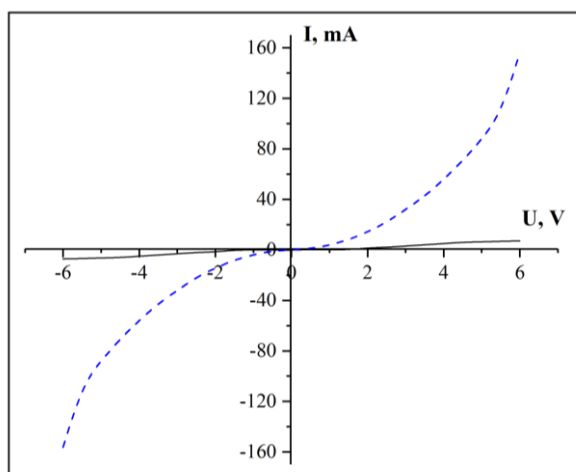
Кесте. Рентгендік құрылымдық талдау нәтижелеріне негізделген SiO₂/Si-п тректік темпләйтіндегі SnO₂ наносымдарының кристаллографиялық параметрлері

Фаза	Құрылым түрі	Кеңістік тобы	(hkl)	2 θ°	d, Å	Өлшемі, (ang.)	FWHM	Ұяшық параметрлері, Å	Көлемі, V(Å ³)	Кристаллит өлшемі, (Å)	Тығыздығы, (g/cm ³)
Sn	Тетрагональ	139: I4/mmm	(002)	54,271	1,6889	648	0,144	a(A) = 3,674736; b(A) = 3,674736; c(A) = 3,377628	45,610417	58,0	8,644
SnO ₂	Орторомбты	58: Pnnm	(220)	56,113	1,6377	637	0,15	a(A) = 4,655800; b(A) = 4,599800; c(A) = 3,151400	67,489592	58,71	7,416



Сурет 4 – SnO₂-HC/SiO₂/Si құрылымдарының фотолюминесценция спектрінің гаустық жіктелуі. ФЛ спектрінде SiO₂ люминесценциясы ескерілген

Зерттеу барысында люминесценция спектрінде байқалған 2,9 эВ (427 нм), 2,8 эВ (442 нм), 2,58 эВ (480 нм), 2,39 эВ (518 нм), 2,23 эВ (555 нм), 2,1 эВ (590 нм) сәйкес келетін қарқынды шыңдар басқа зерттеушілердің [48] ұқсас өлшеулерінің нәтижелерімен жақсы сәйкес келеді. Көрінетін жарық сәулеленуі, О-бос орындарымен және түйінаралық Sn байланысты, SnO₂ тыйым салынған аймағындағы ақаулардың энергетикалық деңгейлерімен байланысты екені авторлардың жұмыстарынан [49] кеңінен белгілі. 2,9 эВ (427 нм) кезіндегі күлгін сәулеленудің максимумына жауап беретін люминесценция орталықтарын байланыстары зақымдалған қалайыға немесе түйінаралық қалайыға жатқызуға болады [50–54]. Максимумы 2,8 эВ (442 нм) болатын көк жарық сәулеленуі V_0^0 үшін үштік күйден негізгі күйге өтуіне байланысты болуы мүмкін [55]. Оттегі бос орындарының көпшілігі 2,58 эВ (480 нм) [56, 57] шыңы бар V_0^+ парамагниттік күйде, ал 2,39 эВ (518 нм) [58] шыңы V_0^0 беттік донорына сәйкес келеді. 2,23 эВ (555 нм) шамасындағы шың, [59, 60] жұмыстарда көрсетілгендей, тұндыру процесі кезінде пайда болатын оттегі бос орындарының нәтижесі болуы мүмкін. 2,1 эВ (590 нм) толқын ұзындығындағы максимум О вакансияларымен немесе түйінаралық Sn байланысты тыйым салынған аймақтағы ақау деңгейлерімен байланысты, бұл лазерлік абляция арқылы синтезделген SnO₂ наноленталарында [61] және ерітінді фазасынан өсу арқылы алынған SnO₂ нанобіліктері [62] үшін байқалған болатын. Оттегінің бос орындары ақаулардың ең көп таралған түрі және люминесценцияның пайда болуы кезінде көбінесе сәулелендіруші ақаулар ретінде әрекет ететіні кеңінен белгілі. Шындығында, ФЛ спектрін талдау барысы негізгі ақаулар қалайымен байланысты ақаулар емес, оттегінің бос орындары екенін көрсетеді.



Сурет 5 – SnO₂-HC/SiO₂/Si вольт-амперлік сипаттамасы: түзу қисық – бастапқы үлгі; үзік қисық – тұндырылған SnO₂ бар үлгі ($t_{\text{тұндыру}} = 20$ мин.)

SnO₂-HC/SiO₂/Si құрылымының вольт-амперлік сипаттамаларын зерттеу синтезделген құрылымның өткізгіштік түрін анықтауға мүмкіндік береді. Вольт-амперлік сипаттама ауданы 0,7 см² болатын толтырылған нанокеуектер массивінен өлшенді. 5-суретте тұндыруға дейінгі және кейінгі үлгілердің вольт-амперлік сипаттамалары (BAC) көрсетілген. SnO₂ тұндыруға дейін тура бағытта да, кері бағытта да өткізгіштік болмайтыны анық көрінеді. SnO₂ наносымдарымен тұндырылған үлгілер үшін вольт-амперлік сипаттамалары сызықты емес өткізгіштік формасына ие болды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Алғаш рет SiO₂/Si тректік темплэйтіне химиялық тұндыру арқылы, тор параметрлері $a = 4,655800$ Å; $b = 4,599800$ Å; $c = 3,151400$ Å тең болатын орторомбты кристалдық құрылымы бар қалайы оксиді (SnO₂) наносымдары алынды. ФЛ спектрін зерттеу 380–620 нм спектрлік диапазондағы кең сәулелену жолағын көрсетті, онда басым ақаулар оттегінің бос орындары екендігі анықталды; сонымен қатар түйінаралық қалайы немесе зақымдалған байланыстары бар қалайы арқылы түзілетін максимумдар анықталды. Орторомбты кристалдық құрылымы бар SnO₂-HC/SiO₂/Si гетероқұрылымының вольт-амперлік сипаттамаларын талдау, p-n ауысымының массивтері бар SnO₂-HC/SiO₂/Si наногетероқұрылымдары синтезделгенін көрсетті.

Алғыс

Зерттеу Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің AP14871479 «Нано және оптоэлектрондық қосымшалар үшін гетероқұрылымдардың жаңа типінің темплэйттік синтезі және эксперименттік-теориялық зерттеулері» гранттық жобасы аясында жүзеге асырылды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР / REFERENCES

1. Talapin D.V., Lee J.S., Kovalenko M.V. and Shevchenko E.V. Prospects of colloidal nanocrystals for electronic and optoelectronic applications // Chemical reviews. – 2010. – Vol. 110. – P. 389–458. <https://doi.org/10.1021/cr900137k>
2. Bhattacharyya D., Singh S., Satnalika N., Khandelwal A. and Jeon S.H. Nanotechnology, big things from a tiny world: a review // International Journal of u-and e-Service, Science and Technology. – 2009. – Vol. 2. – P. 29–38.
3. Lu W., Lieber C.M. Nanoelectronics from the bottom up // Nature materials. – 2007. – Vol. 6. – P. 841–850. <https://doi.org/10.1038/nmat2028>
4. Jones M.R., Osberg K.D., MacFarlane R.J., Langille M.R. and Mirkin C.A. Templated techniques for the synthesis and assembly of plasmonic nanostructures // Chemical reviews. – 2011. – Vol. 111. – P. 3736–3827. <https://doi.org/10.1021/cr1004452>
5. Routkevitch D. et al. Electrochemical fabrication of CdS nanowire arrays in porous anodic aluminum oxide templates // The Journal of Physical Chemistry. – 1996. – Vol. 100. – P. 14037–14047. <https://doi.org/10.1021/jp952910m>

6. Zhang F., Zhao D. Fabrication of ordered magnetite-doped rare earth fluoride nanotube arrays by nanocrystal self-assembly // *Nano Research*. – 2009. – Vol. 2. – P. 292–305. <https://doi.org/10.1007/s12274-009-9027-6>
7. Xu D., Xu Y., Chen D., Guo G., Gui L., Tang Y. Preparation of CdS single-crystal nanowires by electrochemically induced deposition // *Advanced Materials*. – 2000. – Vol. 12. – P. 520–522. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(200004\)12:7%3C520::AID-ADMA520%3E3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(200004)12:7%3C520::AID-ADMA520%3E3.0.CO;2-%23)
8. Martin C. R. Nanomaterials: a membrane-based synthetic approach // *Science*. – 1994. – Vol. 266. – P. 1961–1966. <https://doi.org/10.1126/science.266.5193.1961>
9. Schuchert I.U., Molares M.T., Dobrev D., Vetter J., Neumann R., Martin M. Electrochemical copper deposition in etched ion track membranes: Experimental results and a qualitative kinetic model // *Journal of the Electrochemical Society*. – 2003. – Vol. 150. – P. C189. <https://doi.org/10.1149/1.1554722>
10. Demyanov S. E., Kaniukov E.Yu., Petrov A.V., Belonogov E.K., Streltsov E.A., Ivanov D.K., Ivanova Yu.A., Trautmann C., Terryn H., Petrova M., Ustarroz J., Sivakov V. On the morphology of Si/SiO₂/Ni nanostructures with swift heavy ion tracks in silicon oxide // *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. – 2014. – Vol. 8. – P. 805–813. <https://doi.org/10.1134/S1027451014040326>
11. Sivakov V., Kaniukov E.Yu., Petrov A.V., Korolik O.V., Mazanik A.V., Bochmann A., Teichert S., Hidi I.J., Schleusener A., Cialla D., Toimil-Molares M.E., Trautmann C., Popp J., Demyanov S.E. Silver nanostructures formation in porous Si/SiO₂ matrix // *Journal of crystal growth*. – 2014. – Vol. 400. – P. 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.04.024>
12. Barranco A., Cotrino J., Yubero F., Espinos J.P. and Gonzalez-Eliphe A.R. Room temperature synthesis of porous SiO₂ thin films by plasma enhanced chemical vapor deposition // *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*. – 2004. – Vol. 22. – P. 1275–1284. <https://doi.org/10.1116/1.1761072>
13. Amato G., Borini S., Rossi A.M., Boarino L. and Rocchia M. Si/SiO₂ nanocomposite by CVD infiltration of porous SiO₂ // *Physica Status Solidi (A)*. – 2005. – Vol. 202. – P. 1529–1532. <https://doi.org/10.1002/pssa.200461172>
14. Fink D. et al. Etched ion tracks in silicon oxide and silicon oxynitride as charge injection or extraction channels for novel electronic structures // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2004. – Vol. 218. – P. 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2003.12.083>
15. Fink D., Chandra A., Alegaonkar P., Berdinsky A., Petrov A. and Sinha D. Nanoclusters and nanotubes for swift ion track technology // *Radiation Effects & Defects in Solids*. – 2007. – Vol. 162. – P. 151–156. <https://doi.org/10.1080/10420150601132487>
16. Ivanova Y.A., Ivanou D.K., Fedotov A.K., Streltsov E.A., Demyanov S.E., Petrov A.V., Kaniukov E.Y. and Fink D. Electrochemical deposition of Ni and Cu onto monocrystalline n-Si (100) wafers and into nanopores in Si/SiO₂ template // *Journal of materials science*. – 2007. – Vol. 42. – P. 9163–9169. <https://doi.org/10.1007/s10853-007-1926-x>
17. Hoppe K., Fahrner W.R., Fink D., Dhamodoran S., Petrov A., Chandra A., Saad A., Faupel F., Chakravadhanula V.S.K. and Zaporotchenko V. An ion track based approach to nano-and micro-electronics // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2008. – Vol. 266. – P. 1642–1646. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.12.069>
18. Musket R.G., Yoshiyama J.M., Contolini R.J. and Porter J. D. Vapor etching of ion tracks in fused silica // *Journal of applied physics*. – 2002. – Vol. 91. – P. 5760–5764. <https://doi.org/10.1063/1.1467402>
19. Milanez S.C., Varisco P., Moehlecke A., Fichtner P.P., Papaléo R.M. and Eriksson J. Processing of nano-holes and pores on SiO₂ thin films by MeV heavy ions // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2003. – Vol. 206. – P. 486–489.
20. Klaumünzer S. Ion tracks in quartz and vitreous silica // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2004. – Vol. 225. – P. 136–153. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.05.014>
21. Razpet A., Johansson A., Possnert G., Skupiński M., Hjort K. and Hallén A. Fabrication of high-density ordered nanoarrays in silicon dioxide by MeV ion track lithography // *Journal of applied physics*. – 2005. – Vol. 97. <https://doi.org/10.1063/1.1850617>
22. Jensen J., Razpet A., Skupiński M. and Possnert G. Ion track formation below 1 MeV/u in thin films of amorphous SiO₂ // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2006. – Vol. 243. – P. 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.07.226>
23. Kluth P., Schnohr C.S., Pakarinen O.H., Djurabekova F., Sprouster D.J., Giulian R., ...Toulemonde M. Fine structure in swift heavy ion tracks in amorphous SiO₂ // *Physical review letters*. – 2008. – Vol. 101. – P. 175503. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.175503>
24. Dallanora A., Marcondes T.L., Bermudes G.G., Fichtner P.F.P., Trautmann C., Toulemonde M., and Papaleo R.M. Nanoporous SiO₂/Si thin layers produced by ion track etching: Dependence on the ion energy and criterion for etchability // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – Vol. 104. <https://doi.org/10.1063/1.2957052>
25. Kaniukov E.Y., Demyanov S.E. Characteristic features of electric charge transfer processes in Si/SiO₂/Ni nanostructures in strong magnetic fields // *Mater. Sci*. – 2010. – Vol. 6. – P. 53–58.
26. Vlasukova L.A., Komarov F.F., Yuvchenko V.N., Wesch W., Wendler E., Didyk A.Y., Skuratov V.A. and Kislitsin S.B. Threshold and criterion for ion track etching in SiO₂ layers grown on Si // *Vacuum*. – 2014. – Vol. 105. – P. 107–110. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2014.01.005>
27. Benyagoub A., Toulemonde M. Ion tracks in amorphous silica // *Journal of Materials Research*. – 2015. – Vol. 30. – P. 1529–1543. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.75>
28. Kaniukov E., Bundyukova V., Kutuzau M., Yakimchuk D. Peculiarities of Formation and Characterization of SiO₂/Si Ion-Track Template // *Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics II: THz Circuits, Materials, Devices* // Springer Netherlands. – 2019. – P. 41–57. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1687-9_3
29. Vaseashta A., Dimova-Malinovska D. Nanostructured and nanoscale devices, sensors and detectors // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2005. – Vol. 6. – P. 312–318. <https://doi.org/10.1016/j.stam.2005.02.018>

30. Chou J.C., Wang Y.F. Preparation and study on the drift and hysteresis properties of the tin oxide gate ISFET by the sol–gel method // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2002. – Vol. 86. – P. 58–62. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(02\)00147-8](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(02)00147-8)
31. Lee J.S., Sim S.K., Min B., Cho K., Kim S.W., Kim S. Structural and optoelectronic properties of SnO₂ nanowires synthesized from ball-milled SnO₂ powders // *Journal of Crystal Growth*. – 2004. – Vol. 267. – P. 145–149. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.03.030>
32. Ying Z., Wan Q., Song Z.T., Feng S.L. Controlled synthesis of branched SnO₂ nanowhiskers // *Materials Letters*. – 2005. – Vol. 59. – P. 1670–1672. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.01.044>
33. Fan Y., Liu J., Lu H., Huang P., Xu D. Hierarchical structure SnO₂ supported Pt nanoparticles as enhanced electrocatalyst for methanol oxidation // *Electrochimica acta*. – 2012. – Vol. 76. – P. 475–479. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.05.067>
34. Zhang H., Tan Z., Xu P., Oh K., Wu R., Shi W., Jiao Z., Preparation of SnO₂ nanowires by solvent-free method using mesoporous silica template and their gas sensitive properties // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2011. – Vol. 11. – P. 11114–11118. <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.3978>
35. Zhang H., He Q., Zhu X., Pan D., Deng X., Jiao Z. Surfactant-free solution phase synthesis of monodispersed SnO₂ hierarchical nanostructures and gas sensing properties // *CrystEngComm*. – 2012. – Vol. 14. – P. 3169–3176. <https://doi.org/10.1039/C2CE06558D>
36. Yu L., Zhang L., Song H., Jiang X., Lv Y. Hierarchical SnO₂ architectures: controllable growth on graphene by atmospheric pressure chemical vapour deposition and application in cataluminescence gas sensor // *Cryst. Eng. Comm.* – 2014. – Vol. 16. – P. 3331–3340. <https://doi.org/10.1039/C3CE42538J>
37. Huang H., Tan O.K., Lee Y., Tran T., Tse M. Semiconductor gas sensor based on tin oxide nanorods prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition with postplasma treatment // *Applied Physics Letters*. – 2005. – Vol. 87. <https://doi.org/10.1063/1.2106006>
38. Pan J., Huhne S.M., Shen H., Xiao L., Born P., Mader W., Mathur S. SnO–TiO₂ core-shell nanowire structures: investigations on solid state reactivity and photocatalytic behavior // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2011. – Vol. 115. – P. 17265–17269. <https://doi.org/10.1021/jp201901b>
39. S. Giniyatova, A. Dauletbekova, Z. Baimukhanov, L. Vlasukova, A. Akilbekov, et al. Structure, electrical properties and luminescence of ZnO nanocrystals deposited in SiO₂/Si track templates // *Radiation measurements*. – 2019. – Vol. 125. – P. 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2019.04.001>
40. A.K. Dauletbekova, A.Ye. Alzhanova, A.T. Akilbekov, et al. Synthesis of Si/SiO₂/ZnO nanoporous materials using chemical and electrochemical deposition techniques // *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. – 2016. – Vol. 1767. – P. 020005. <https://doi.org/10.1063/1.4962589>
41. Dauletbekova A., Akylbekova A., Sarsekhan G., Usseinov A., Baimukhanov Z., Kozlovskiy A., Vlasukova L., Komarov F., Popov A. and Akilbekov A. Ion-track template synthesis and characterization of ZnSeO₃ nanocrystals // *Crystals*. – 2022. – Vol. 12. – P. 817. <https://doi.org/10.3390/cryst12060817>
42. M. Toulemonde, A. Meftah, F. Brisard, J.M. Costantini, E. Dooryhee, M. Hage-Ali, M. Hervieu, J.P. Stoquert, F. Studer. Track formation in SiO₂ quartz and the thermal-spike mechanism // *Physical Review B*. – 1994. – Vol. 49. – P. 12457. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.49.12457>
43. F.F. Komarov F.F., L.A. Vlasukova, P.V. Kuchinskyi, A.Yu. Didyk, V.A. Skuratov, N.A. Voronova. Etched track morphology in SiO₂ irradiated with swift heavy ions // *Lithuanian Journal of Physics*. – 2009. – Vol. 49. – P. 111–115. <https://doi.org/10.3952/lithjphys.49113>
44. L.Vlasukova, F. Komarov, V. Yuvchenko, L. Baran, O. Milchanin, A. Dauletbekova, A. Alzhanova, A. Akilbekov. Etching of latent tracks in amorphous SiO₂ and Si₃N₄: Simulation and experiment // *Vacuum*. – 2016. – Vol. 129. – P. 137–141. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.12.023>
45. Haines J., Léger J. M. X-ray diffraction study of the phase transitions and structural evolution of tin dioxide at high pressure: ffRelationships between structure types and implications for other rutile-type dioxides // *Physical Review B*. – 1997. – Vol. 55. – P. 11144. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.11144>
46. Shieh S.R., Kubo A., Duffy T.S., Prakapenka V.B., Shen, G. High-pressure phases in SnO₂ to 117 GPa // *Physical Review B*. – 2006. – Vol. 73. – P. 014105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.014105>
47. Gracia L., Beltran A., Andres J. Characterization of the High-Pressure Structures and Phase Transformations in SnO₂ // A density functional theory study. *The Journal of Physical Chemistry B*. – 2007. – Vol. 111. – P. 6479–6485. <https://doi.org/10.1021/jp067443v>
48. Bing W., Ping X. Growth mechanism and photoluminescence of the SnO₂ nanotwists on thin film and the SnO₂ short nanowires on nanorods // *Chinese Physics B*. – 2009. – Vol. 18. – P. 324. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/18/1/053>
49. E.J.H. Lee, C. Ribeiro, T.R. Giraldi, E. Longo, E.R. Leite and J.A. Varela. Photoluminescence in quantum-confined SnO₂ nanocrystals: evidence of free exciton decay // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Vol. 84. – P. 1745–1747. <https://doi.org/10.1063/1.1655693>
50. Munnix S., Schmeits M. Electronic structure of tin dioxide surfaces // *Physical Review B*. – 1983. – Vol. 27. – P. 7624. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.27.7624>
51. Chiodini N., Paleari A., DiMartino D., Spinolo G. SnO₂ nanocrystals in SiO₂: A wide-band-gap quantum-dot system // *Applied Physics Letters*. – 2002. – Vol. 81. – P. 1702–1704. <https://doi.org/10.1063/1.1503154>
52. Vanheusden K., Warren W.L., Seager C.H., Tallant D.R., Voigt J.A., Gnade B.E. Mechanisms behind green photoluminescence in ZnO phosphor powders // *Journal of Applied Physics*. – 1996. – Vol. 79. – P. 7983–7990. <https://doi.org/10.1063/1.362349>
53. Liu Y., Yang Q., Xu C. Single-narrow-band red upconversion fluorescence of ZnO nanocrystals codoped with Er and Yb and its achieving mechanism // *Journal of Applied Physics*. – 2008. – Vol. 104. – P. 064701. <https://doi.org/10.1063/1.2980326>
54. Godinho K.G., Walsh A., Watson G.W. Energetic and electronic structure analysis of intrinsic defects in SnO₂ // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2009. – Vol. 113. – P. 439–448. <https://doi.org/10.1021/jp807753t>
55. Her Y.C., Wu J.Y., Lin Y.R., Tsai S.Y. Low-temperature growth and blue luminescence of SnO₂ nanoblades //

- Applied physics letters. – 2006. – V. 89. – P. 043115.
<https://doi.org/10.1063/1.2235925>
56. Rani S., Roy S., Karar N., Bhatnagar M. Structure, microstructure and photoluminescence properties of Fe doped SnO₂ thin films // Solid state communications. – 2007. – Vol. 141. – P. 214–218.
<https://doi.org/10.1016/j.ssc.2006.10.036>
57. Vanheusden K., Warren W.L., Seager C.H., Tallant D.R., Voigt J.A., Gnade B.E. Mechanisms behind green photoluminescence in ZnO phosphor powders // Journal of Applied Physics. – 1996. – Vol. 79. – P. 7983–7990.
<https://doi.org/10.1063/1.362349>
58. Bhatnagar M., Kaushik V., Kaushal A., Singh M., Mehta B. Structural and photoluminescence properties of tin oxide and tin oxide: C core-shell and alloy nanoparticles synthesised using gas phase technique // AIP Advances. – 2016. – Vol. 6. – P. 095321.
<https://doi.org/10.1063/1.4964313>
59. Duan J., Gong J., Huang H., Zhao X., Cheng G., Yu Z., Yang, S. Multiform structures of SnO₂ nanobelts // Nanotechnology. – 2007. – Vol. 18. – P. 055607.
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/5/055607>
60. Zhang, L., Ge S., Zuo Y., Zhang B., Xi L. Influence of oxygen flow rate on the morphology and magnetism of SnO₂ nanostructures // The Journal of Physical Chemistry C. – 2010. – Vol. 114. – P. 7541–7547.
<https://doi.org/10.1021/jp9065604>
61. Hu J.Q., Bando Y., Liu Q.L., Golberg D. Laser-ablation growth and optical properties of wide and long single-crystal SnO₂ ribbons // Advanced Functional Materials. – 2003. – Vol. 13. – P. 493–496.
<https://doi.org/10.1002/adfm.200304327>
62. Cheng B., Russell J.M., Shi, Zhang L., E.T. Samulski. Large-scale, solution-phase growth of single-crystalline SnO₂ nanorods // Journal of the American Chemical Society. – 2004. – Vol. 126. – P. 5972–5973.
<https://doi.org/10.1021/ja0493244>

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПРОВОЛОК ДИОКСИДА ОЛОВА В ТРЕКОВОМ ТЕМПЛЭЙТЕ SiO₂/Si

**Д. А. Джунисбекова*, А. К. Даулетбекова, З. К. Баймуханов, А. Д. Акылбекова,
Г. М. Аралбаева, А. Б. Базарбек, Ж. К. Койшыбаева**

НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

**E-mail для контактов: diana911115@gmail.com*

Данная работа представляет исследование структурных, оптических и электрических характеристик нанопроволок диоксида олова (SnO₂) полученных методом химического осаждения (ХО) в трековый темплэйт SiO₂/Si (темплэйтный синтез). Латентные треки в слое SiO₂ создавались путем облучения быстрыми тяжелыми ионами (БТИ) Хе при энергии 200 МэВ с флюенсом $\Phi = 10^8$ см⁻² и последующим травлением в 4% водном растворе фтористоводородной кислоты (HF). Выбранный метод ХО широко распространен для осаждения нанопроволок полупроводниковых оксидов в нанопорах SiO₂. Метод ХО является экономически эффективным, так как не требует специального оборудования для осаждения нанопроволок. Для осуществления осаждения применяется раствор координационного соединения металла и восстановителя. Для анализа заполнения пор после процесса ХО, морфология поверхности образцов исследовалась с помощью сканирующего микроскопа Zeiss Crossbeam 540. Кристаллографическая структура наноструктур SnO₂/SiO₂/Si с заполнением нанопор SnO₂ исследовали методом рентгеновской дифракции. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводят на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab. В результате была получена наногетероструктура SnO₂-НП/SiO₂/Si с орторомбической кристаллической структурой нанопроволок SnO₂. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) измерялись при возбуждении светом с длиной волны 240 нм с использованием спектрофлуориметра CM2203 (Solar). Разложение на гауссианы спектра фотолюминесценции структур SnO₂-НП/SiO₂/Si, показали, что они имеют низкую интенсивность, которая обусловлена в основном наличием таких дефектов как кислородные вакансии, междоузельное олово или олово с поврежденными связями. Исследование электрических характеристик проводилось с использованием потенциостата VersaStat 3 (Ametek). Измерение ВАХ показало, что полученная наногетероструктура SnO₂-НП/SiO₂/Si содержит массивы p-n переходов.

Ключевые слова: *трековый темплэйт SiO₂/Si, химическое осаждение, нанопроволоки SnO₂, диоксид олова, темплэйтный синтез.*

SYNTHESIS AND STUDY OF OPTICAL, ELECTRICAL PROPERTIES
OF TIN DIOXIDE NANOWIRES IN A SiO₂/Si TRACK TEMPLATE

D. A. Junisbekova^{*}, A. K. Dauletbekova, Z. K. Baimukhanov, A. D. Akylbekova,
G. M. Aralbayeva, A. B. Bazarbek, Zh. K. Koishybayeva

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

**E-mail for contacts: diana911115@gmail.com*

This work presents a study of the structural, optical and electrical characteristics of tin dioxide (SnO₂) nanowires obtained by chemical deposition (CD) into a SiO₂/Si track template (template synthesis). Latent tracks in the SiO₂ layer were created by irradiation with swift heavy ions (SHI) of Xe at an energy of 200 MeV with a fluence of $\Phi = 10^8 \text{ cm}^{-2}$ and subsequent etching in a 4% aqueous solution of hydrofluoric acid (HF). The chosen CD method is widely used for the deposition of semiconductor oxide nanowires in SiO₂ nanopores. The CD method is cost-effective because it does not require special equipment for deposition of nanowires. To carry out deposition, a solution of a coordination compound of a metal and a reducing agent is used. To analyze the filling of pores after the CD process, the surface morphology of the samples was studied using a Zeiss Crossbeam 540 scanning microscope. The crystallographic structure of SnO₂/SiO₂/Si nanostructures with SnO₂ nanopore filling was studied by X-ray diffraction. X-ray diffraction analysis (XRD) is carried out on a Rigaku SmartLab X-ray diffractometer. As a result, a SnO₂-NW/SiO₂/Si nanoheterostructure with an orthorhombic crystal structure of SnO₂ nanowires was obtained. Photoluminescence (PL) spectra were measured upon excitation with light at a wavelength of 240 nm using a CM2203 spectrofluorimeter (Solar). Gaussian decomposition of the photoluminescence spectrum of SnO₂-NW/SiO₂/Si structures showed that they have low intensity, which is mainly due to the presence of defects such as oxygen vacancies, interstitial tin or tin with damaged bonds. Electrical characterization studies were performed using a VersaStat 3 potentiostat (Ametek). Measurement of the current-voltage characteristic showed that the resulting SnO₂-NW/SiO₂/Si nanoheterostructure contains arrays of p-n junctions.

Keywords: SiO₂/Si track template, chemical deposition, SnO₂ nanowires, tin dioxide, template synthesis.