

Секербаев К.С., Таурбаев Е.Т.,
Ефимова А.И., Ботантаева Г.Е.,
Ермұхамед Д., Мұсабек Г.К.,
Диханбаев К.К.,
Тимошенко В.Ю., Таурбаев Т.И.

**Күн элементтері және ИҚ
фотоника үшін
жартылайөткізгіштік
наноқұрылымдар**

Sekerbayev K.S., Taurbaev Ye.T.,
Efimova A.I., Botantayeva G.Ye.,
Yermukhamed D., Mussabek G.K.,
Dikhanbayev K.K.,
Timoshenko V.Yu., Taurbaev T.I.

**Semiconductor Based
Nanostructures for Solar Cells
and Infrared Photonics**

Секербаев К.С., Таурбаев Е.Т.,
Ефимова А.И., Ботантаева Г.Е.,
Ермұхамед Д., Мұсабек Г.К.,
Диханбаев К.К.,
Тимошенко В.Ю., Таурбаев Т.И.

**Полупроводниковые
наноструктуры для солнечных
элементов и ИК фотоники**

Кристаллдық кремнийді фторлық сутектік қышқылы ерітіндісінде электрохимиялық жеміру және металл индуцирленген химиялық жеміру әдістері арқылы анизотропты кеуек кремний мен кремний наноталшықтарының қабықшалары алынды. Алынған үлгілер инфрақызыл спектралдық диапазонда оптикалық спектроскопия көмегімен тәжірибелік түрде зерттелінді. Алынған үлгілердің оптикалық қасиеттерін модельдеу үшін эффективті оптикалық ортаның жақындатылуы қолданылды. Тәжірибелік мәліметтермен қатар есептеу мәліметтері де шағылу мен жұтылудың анизотропиясы бар екендігін көрсетеді. Бұл қабықшалардың анизотропты оптикалық қасиеттері Друде-Лоренц моделімен сипатталатын үлгілердегі еркін заряд тасымалдаушылардың концентрациясына тәуелді болады. Қалыңдығы 1 мкм-ден асатын кремний наноталшықтарының қабықшаларда толық шағылудың тез кемуі көрінеді, бұл фотовольтаикада кері шағылдырғыш жабындылар ретінде қолданыла алады. Аталған нәтижелер анизотропты кремний наноқұрылымдарының инфрақызыл фотоникада қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Түйін сөздер: кремний, анизотропия, фотоника.

Anisotropic porous silicon films and silicon nanowires were formed by electrochemical etching and metal-assisted chemical etching of crystalline Si in hydrofluoric acid solutions. Obtained samples were experimentally studied by means of the optical spectroscopy in the infrared spectral region. An approximation of the effective optical medium is used to model the optical properties of the prepared samples. Both the experimental data and modelling reveal anisotropy of the refraction and absorption. Anisotropic optical properties depend on the free charge carrier concentration in the samples that can be described by the model of Drude-Lorentz. Silicon nanowires layers with thickness more than 1 μm is found to demonstrate a strong decrease of the total reflectance below that can be used as anti-reflection coating in photovoltaics. These results demonstrate that anisotropic silicon nanostructures can be considered for applications in infrared photonic devices.

Key words: silicon, anisotropy, photonics.

Были получены пленки анизотропного пористого кремния и кремниевых нанонитей путем электрохимического травления и металл-индуцированного химического травления кристаллического кремния в растворе фтористоводородной кислоты. Полученные образцы экспериментально исследованы оптической спектроскопией в инфракрасном спектральном диапазоне. Для моделирования оптических свойств полученных образцов использовалось приближение эффективной оптической среды. Как экспериментальные, так и расчетные данные свидетельствует об анизотропии отражения и поглощения. Эти анизотропные оптические свойства пленок зависят от концентрации свободных носителей заряда в образцах, что описывается моделью Друде-Лоренца. Пленки кремниевых нанонитей толщиной более 1 мкм показывают резкое уменьшение полного отражения, что может быть использовано в антиотражающих покрытиях для фотовольтаики. Эти результаты демонстрируют применимость анизотропных кремниевых наноструктур в устройствах инфракрасной фотоники.

Ключевые слова: кремний, анизотропия, фотоника.

¹Секербаев К.С., ^{1*}Таурбаев Е.Т., ²Ефимова А.И.,
¹Ботантаева Г.Е., ¹Ермұхамед Д., ¹Мұсабек Г.К.,
¹Диханбаев К.К., ^{2,3}Тимошенко В.Ю., ¹Таурбаев Т.И.

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Эксперименттік және теориялық физика ғылыми-зерттеу институты,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

²Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университеті, Мәскеу, Ресей

³Томск мемлекеттік ұлттық зерттеу университеті, Томск, Ресей

*E-mail: taur@physics.kz

КҮН ЭЛЕМЕНТТЕРІ ЖӘНЕ ИҚ ФОТНИКА ҮШІН ЖАРТЫЛАЙӨТ- КІЗГІШТІК НАНОҚҰРЫЛЫМДАР

Кіріспе

Кристаллдык кремнийді (с-Si) электрохимиялық жеміру мен металл индуцирленген химиялық жеміру (МИХЖ) арқылы алынған кеуекті кремний (КК) мен кремний наноталшықтары (КНТ) секілді кремний наноқұрылымдары сәйкесінше оптоэлектроника мен фотоникада қолдану үшін әмбебап электрондық және оптикалық қасиеттерге ие болады [1–3]. Жалпы, кеуекті анизотропиясы бар КК-де екілік сыну (сәуленің қос сынуы) байқалады, оның күші кеуекті толтырып тұратын заттың кеуектілік және диэлектрлік өтімділігі сияқты параметрлерін өзгерту арқылы ауысып тұра алады [5, 6]. Бұл, мысалы, бейсызықтық оптикада эффективті гармоникалық генерациялау арқылы фазалық сәйкестікті қамтамасыз ету үшін және оптоэлектроникада жарықты түрлендіргіш және басқарғыш құрылғыларды жасау үшін қолданыла алады [7]. Бұл материал КК-дің ішкі бетінің жақсы дамығандығына және оның диэлектрик пен кремний нанокристаллдарының беттік күйінің электрондық және оптикалық қасиеттеріне сезімтал болуына байланысты жаңа жылдам әрекет ететін оптикалық детектрлеуге негізделген газ сенсорларын жасауда пайдаланыла алады [7–9].

с-Si пластиналарын металл индуцирленген химиялық жеміру арқылы қалыптастырылған спектрдің УК мен көрінетін аумақтарында төмен шағылуға ие болатын кремний наноталшықтарының (КНТ) массиві с-Si негізіндегі күн элементтері және басқа да фотоникалық пен оптоэлектрондық құрылғылар үшін кері шағылдырғыш жабынды ретінде перспективті материал болып саналады [3,10,11]. Аталған жұмыста біз КК мен КНТ-ның спектрдің инфрақызыл аумағындағы оптикалық қасиеттерін зерттедік.

Тәжірибе

КК қабықшалары ориентациясы (110) болатын *p*-типті (бормен легирленген) меншікті кедергісі 1–5 мОм*см с-Si пластиналарын электрохимиялық жемірудің қарапайым әдісін

қолдану арқылы алынады [1,2]. Электролит ретінде этанолмен араластырылған фтор қышқылының сулық ерітіндісі, яғни, 48% HF:C₂H₅OH (1 : 1) қолданылады. Кеуектілігі 50-ден 80%-ға дейін өзгеріп отыратын үлгілерді алу үшін жеміру процесі 20-дан 120 мА/см²-ға дейінгі аралықта реттеліп отыратын тұрақты ток тығыздығында жүргізіледі [1, 2]. КК қабаттары төсеніштерден ток тығыздығын 700 мА/см²-ге қысқа мерзімге ұзарту арқылы бөлек алына алады. КК қабықшасының қалыңдығы Metam RV-22 (ЛОМО Ltd., Ресей) оптикалық микроскопын қолдану арқылы анықталды және ол электрохимиялық жемірудің уақытына байланысты 10-нан 70 мкм-ге дейін өзгеріп отырады.

КНТ р-типті 1-10 Ом · см (100) с-Si пластиналарына МИХЖ жүргізу арқылы қалыптастырылды [3,10]. МИХЖ процесі күміс бөлшектерін с-Si пластиналарына тұндырудан және кейін HF ерітіндісінде жеміру жүргізуден тұрады. Қалып қалған дайындалған КНТ-дағы Ag-нано-бөлшектері концентрленген азот қышқылында жеміру арқылы алынып тасталады. Дайындалған КНТ-дың жеміру режимдерін таңдауға байланысты орташа диаметрі 20-200 нм, ал

ұзындығы 0,1-ден 10 мкм-ге дейін өзгеріп отырды (толығырақ [3] сілтемеден көріңіз). Үлгілерді құрылымдық талдау Tescan Lyra SEM сканерлеуші электрондық микроскопия және өрістік эмиссиялық СЭМ (FE-SEM, Carl Zeiss ULTRA 55) көмегімен жүргізілді. с-Si пластиналарының кристаллографиялық жазықтық бойынша кесілген үлгілердің көлденең қимасының СЭМ суреті алынды.

КК қабықшалары мен КНТ/с-Si құрылымдарының өткізу және жұтылудың инфрақызыл спектрі спектралды рұқсаттамасы 2 см⁻¹ Bruker IFS66v Фурье түрлендіргіш спектрометрін пайдалану арқылы өлшенді. Өлшеулер бөлме температурасында ауада табиғи немесе жазық поляризацияланған біріншілік сәуленің шоғының қалыпты түсуі жағдайында жүзеге асырылды.

Модельдеу

КК қабықшалары мен КНТ массивтерін инфрақызыл спектралды аумақта эффективті диэлектрлік өтімділік бар эффективті оптикалық орта ретінде қарастыруға болады. Бұл жердегі диэлектрлік өтімділікті Бруггеманның жалпыланған формуласының көмегімен есептеп шығаруға болады [2,5]:

$$f_{Si} \frac{(e_{eff} - e_{Si})}{e_{eff} + L_{Si}(e_{Si} - e_{eff})} + f_{pore} \frac{(e_{eff} - e_{pore})}{e_{eff} + L_{pore}(e_{pore} - e_{eff})} = 0, \quad (1)$$

мұндағы, ε_{eff} – эффективті диэлектрлік өтімділік; ε_{Si} and $\varepsilon_{кеуек}$ – сәйкесінше кремний нанокристаллдары мен кеуектерінің диэлектрлік өтімділігі; f_{Si} , f_{pores} және L_{Si} , L_{pore} – сәйкесінше сәйкес келетін компоненттің толтыру коэффициенттері мен деполяризация факторы.

Кремний нанокристаллдары мен кеуектерінің анизотропиясының формасын деполяризация факторын қолдану арқылы сипаттауға болады, ол эллипсоидтың жартылай осьтерінің қатынасына, x тәуелді болады. Деполяризация факторы барлық компоненттерінің қосындысы бірге тең болатын тензорлық шама болып табылады [2]:

$$L_{\parallel} + 2L_{\perp} = 1. \quad (2)$$

Сәуленің эллипсоидтың айналу осінің бойына түскен жағдайдағы деполяризация факторы келесі өрнектен анықталады [5]:

$$L_{\parallel} = \frac{1}{1-x^2} \left(1 - x \frac{\arcsin \sqrt{1-x^2}}{\sqrt{1-x^2}} \right). \quad (3)$$

(3) тендеуін қолдану арқылы кез келген айналатын эллипсоид (сфероидтың) қасиеттерін сипаттауға мүмкін болады. Мысалы, жартылай осьтердің қатынасы $x=1/3$ және 0 сәйкесінше сфера мен цилиндр жағдайларына сәйкес келеді.

Зерттелінетін үлгілерді қозғалатын еркін заряд тасымалдаушылардан (электрондар мен кемтіктер) тұратын анизотропты кремний нанокристаллдарының ансамбльдері ретінде қарастырайық. Қарастырылып отырған кристаллдық кремнийдің эллипсоидтарының, жазықтықтарының немесе наноталшықтарның өлшемдері кванттық өлшемдік эффектіден тысқары жатады, алайда жарықтың толқын ұзындығымен салыстырғанда айтарлықтай кішкентай болады. Бұл бізге эффективті орта теориясының электростатикалық жақындатылуын қолдануға мүмкіндік береді [2]. Ортаның нанокристаллдарының байланыстарының толығымен немесе жартылай есепке алған жағдайда ε_{eff} (1) тендей көмегімен жақсы сипаттала алады, мұнда еркін заряд тасымалдаушылары бар кремний

нанокристалдарының диэлектрлік өтімділігі келесідей Друде моделі арқылы сипаттала алады [5]:

$$\varepsilon_{Si} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\omega\tau - 1}, \quad (4)$$

мұндағы, $\varepsilon_{\infty} = 11.7$ – c-Si-дің жоғары жиілікті диэлектрлік тұрақтысы, ω – инфрақызыл сәуленің жиілігі, τ – еркін кемтіктердің шашырау уақыты және ω_p – плазмалық жиілік ($\omega_p^2 = \sqrt{4\pi N_p e^2 / m_p}$, мұндағы, N_p және m_p – еркін кемтіктердің концентрациясы мен эффективті массасы) және $i = \sqrt{-1}$.

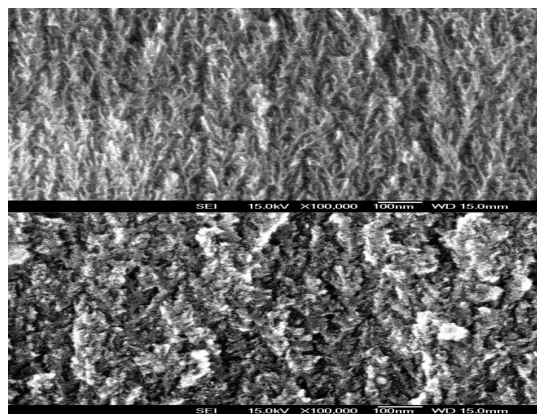
(1)-(4) тендеулерін есепке ала отырып эффективті диэлектрлік өтімділік пен сәйкесінше эффективті жұтылу коэффициенті, сыну көрсеткіші және өткізу коэффициенті есептелінді. Кремний нанокұрылымдарының симметрия осімен анықталатын жүйенің оптикалық осіне перпендикуляр ε_{\perp} және параллель ε_{\parallel} болатын жарық толқынының электр өрісінің бағыттары үшін оптикалық өткізу мен жұтылу спектрлерін есептеуге баса назар аударылды.

Қозғалатын заряд тасымалдаушылардың үлесін талдау мақсатында еркін заряд тасымалдаушылардың (электрондар мен кемтіктер) концентрациялары үшін келесі шамалар таңдалы-

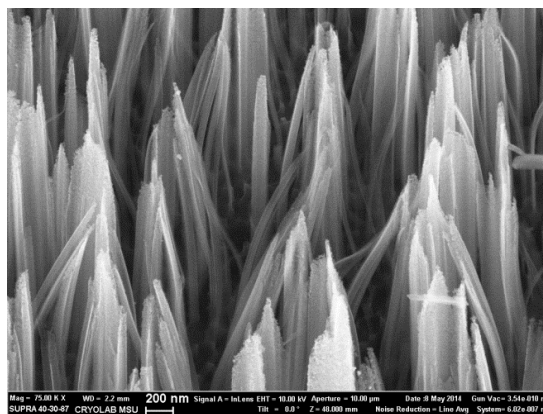
нып алынады N_p 10^{15} -ден 10^{20} см^{-3} -ге дейін. Кремний нанокұрылымдарының кеңістіктік (кеуектілік) толтыру коэффициенті 0-ден 1-ге дейінгі (1-ден 0-ге дейінгі) аралықта өзгеріп отырады. Таңдалынып алынған жиіліктердің аумағы (0,03 – 300 ТГц) 1-ден 10000 см^{-1} -ге дейінгі толқындық санға сәйкес келеді.

Нәтижелер және оларды талқылау

1а және 1ә-суреттерде сәйкесінше зерттелген КК және КНТ-дың қарапайым СЭМ суреттері көрсетілген. Жартылай реттелген талшық тәріздес құрылымдар екі үлгіге де тиесілі болса, нанокұрылымдардың орташа өлшемі әр түрлі болады. Расында КК мен КНТ үшін оның мәні сәйкесінше 10 нм-ден кіші және 100 нм-ден үлкен болады. КК қабықшалары {100} кристаллографиялық бағытында кеуектердің ориентациясының басым болуына байланысты жазықтықтық анизотропияға ие болады [4]. Соған байланысты оптикалық анизотропия қалыпты жарық түскен жағдайда жарықпен оңай өлшене алады. Дайындалған КНТ массивтері күшті анизотропты болатындығы анық. Алайда бұл анизотропия қалыпты жарықтың түскен жағдайында байқалмайды.



а

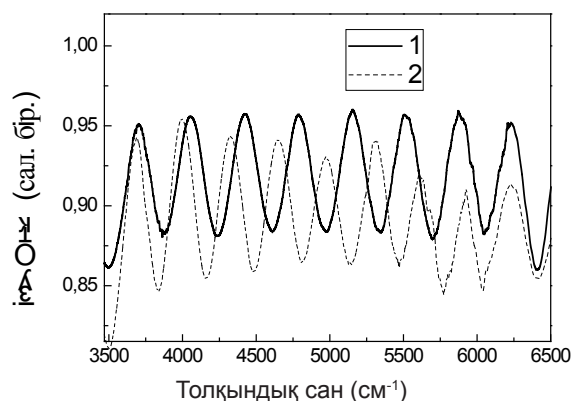


ә

1-сурет – (а) КК (110) қабықшаларының және (ә) КНТ массивтерінің СЭМ суреттері

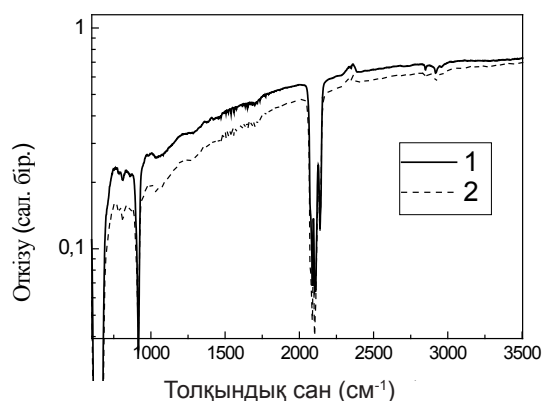
2-суретте [001] кристаллографиялық бағытындағы жазықтық бойымен және оған перпендикуляр поляризацияланған жарық үшін өлшенген КК қабықшасының өткізу спектрі көрсетілген. Өткізу коэффициенті жұқа қабықшадағы Фабри-Перо интерференциясына байланысты интерференциялық жолақтар арқы-

лы модуляцияланады. Интерференцияның периоды әр түрлі жазықтықтағы интерференцияның бағыттары үшін әр түрлі болып келеді. Бұл қасиет КК-дің кремний нанокристалдары мен кеуектерінің анизотропиясын қалыптастырумен байланысты болатын эффективті сыну көрсеткішінің жазықтықтағы анизотропиясын көрсетеді.



$L = 10$ мкм, $P = 60\%$. [001] кристаллографиялық бағыттың жазықтығы бойымен (1) және оған перпендикуляр (2) жарықтың поляризациясы үшін өлшенген.

2-сурет – Бормен қатты легирленген меншікті кедергісі 1-5 мОм · см және беттік ориентациясы (110) c-Si пластиналарынан дайындалған жазықтықтық анизотропты КК қабықшасының өткізу спектрі



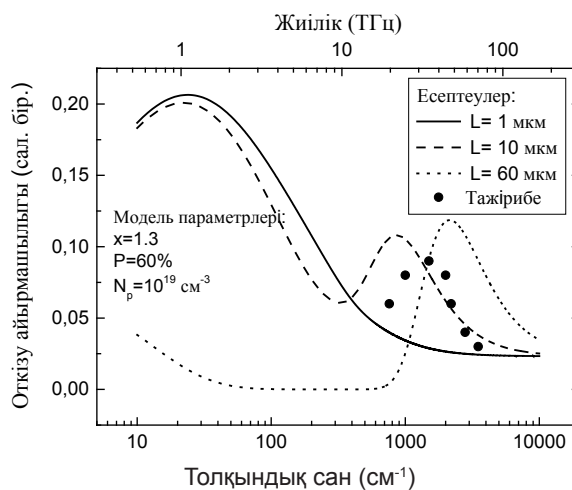
$L = 60$ мкм, $P = 60\%$. [001] кристаллографиялық бағыттың жазықтығы бойымен (1) және оған перпендикуляр (2) жарықтың поляризациясы үшін өлшенген.

3-сурет – Бормен қатты легирленген меншікті кедергісі 1-5 мОм см және беттік ориентациясы (110) c-Si пластиналарынан дайындалған жазықтықтық анизотропты КК қабықшасының өткізу спектрі

3-суретте интерференциялық эффектер орындалмайтын қалың КК қабықшасының поляризацияланған өткізу спектрі көрсетілген. 3-суреттен өткізу коэффициентінің [001] кристаллографиялық бағытына перпендикуляр поляризацияланған жарықпен салыстырғанда сол бағыттың бойымен поляризацияланған жарықтың үлкен болатындығы көрінеді. Бұл эффект ИҚ сәулеленудің анизотропты кремний нанокристаллдарында еркін заряд тасымалдаушылармен (еркін кемтіктер) әсерлесуі салдарынан болатын жұтылудың анизотропиясымен (дихроизммен) байланысты болуы мүмкін [5].

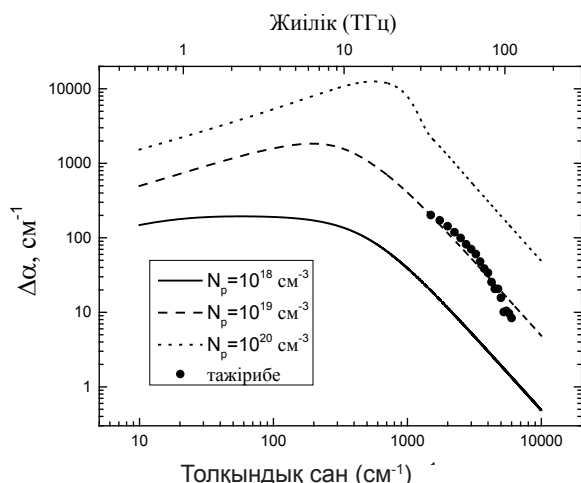
4-суретте өлшенген КК қабықшаларының өткізу коэффициенттері (қара домалақтар) мен есептелген [001] кристаллографиялық бағытының жазықтығы бойымен және оған перпендикуляр поляризацияланатын жарық (сызықтар) үшін айырмашылық спектрі көрсетілген. Суреттен көрінетіні дифференциалдық өткізу коэффициенті жарық жиілігінің (толқындық сан) монотонды функциясы емес және ол КК қабатының қалыңдығына қатты тәуелді болады. $L = 60$ мкм болатын КК қабықшасы үшін тәжірибелік спектр есептелгенімен сапасы жағынан бірдей болады. 1000 см^{-1} (жиілігі 20 ТГц) жанындағы дифференциалды ауысудың жоғары жиілікті максимумын КК-дегі еркін заряд тасымалдаушылардың Друде жұтылуы мен шағылуының бір уақытта

әсер етуімен түсіндіруге болады. Модельдеу мәліметтеріне сүйенетін болсақ, КК-дегі қалдық еркін тасымалдаушылардың концентрациясы шамамен 10^{19} см^{-3} болады, бұл бастапқы c-Si төсенішімен салыстырғанда бір шамаға аз болады.



Тәжірибелік мәліметтер 3-суретте көрсетілген спектрлерге сәйкес келеді және осыған ұқсас үлгілер бормен қатты легирленген меншікті кедергісі 1-5 мОм см мен беттік ориентациясы (110) болатын c-Si пластиналарынан дайындалды.

4-сурет – КК қабықшаларының есептелген (сызықтар) және өлшенген дифференциалдық өткізу спектрлері



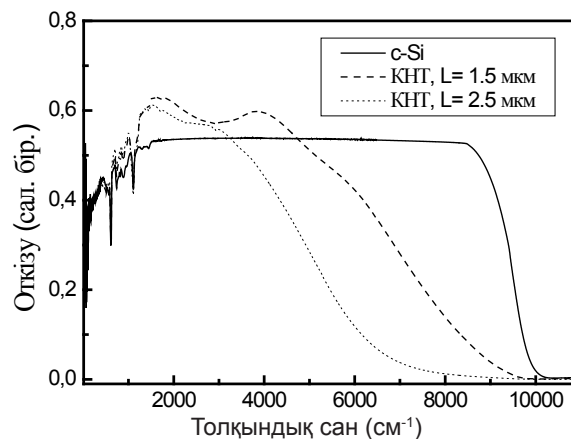
Тәжірибелік мәліметтер кристаллографиялық бағыттың жазықтығы бойымен және перпендикуляр поляризацияланған жарықтың өлшенген жұтылу коэффициентіндегі айырмашылыққа сәйкес келеді және 3- суретте көрсетілген осыған ұқсас үлгілер бормен қатты легирленген меншікті кедергісі $1-5 \text{ мОм} \cdot \text{см}$ мен беттік ориентациясы (110) болатын c-Si пластиналарынан дайындалды.

5-сурет – Анизотропты кремний қабықшаларының есептелген (сызықтар) және өлшенген (қара домалақтар) дифференциалдық жұтылу спектрлері

(1)-(3) теңдеулерін және Друде жұтылу формуласын қолдану арқылы алынған жазықтықтық анизотропиялық КК қабықшаларының дифференциалдық жұтылуының (дихроизмінің) есептелген және өлшенген спектрлері логарифмдік шкала бойынша 5- суретте салынған. КК қабықшасы қалыңдығының берілген дихроизм спектріне әсер етуі мүмкін емес. Суреттен көрініп тұрғандай тәжірибелік және модельденген дихроизмнің екеуі де жарықтың жиілігі 100 ТГц-тан 20 ТГц-қа дейін төмендеген кезде экспонента бойынша шамамен 2-ге өсіп отырады. Бұлай болуы Друде жұтылуының жиілікке тәуелділігімен байланысты. Алыс инфрақызыл аумаққа сәйкес келетін төменгі жиіліктер үшін дихроизм Друде жұтылуындағы өшіруші эффектінің болуынан ақырындап кемиді. Модельдеудің нәтижесі дихроизмнің еркін заряд тасымалдаушылардың концентрациясы жоғары болатын КК-де күштірек болатынын көрсетті. Алынған нәтижелер КК қабатының жазықтықтық анизотропиясы спектралды аумақтың кең бөлігінде инфрақызыл сәуленің интенсивтілігін бақылау үшін қолданыла алатындығын көрсетті.

Біздің орта және алыс инфрақызыл спектралды аумағындағы түсудің көлбеу бұрышында жүргізген өлшеулердің нәтижесінде КНТ массивте-

рінде ұқсас екілік сәуленің сынуы мен дихроизм анықталды (көрсетілмеген). Алайда оптикалық анизотропияны бақылау КНТ мен c-Si төсенішінің екеуінің де шағылу коэффициенттеріне Френель факторын ендіру арқылы қиындатыла түседі. 6-суретте сәуленің қалыпты түсуі кезіндегі КНТ-дың (L) екі әр түрлі ұзындықты c-Si төсеніші мен КНТ/c-Si құрылымдарының спектрлері көрсетілген.



c-Si төсенішінің өткізу спектрі тұтас сызықпен салынған.

6-сурет – Бормен аздап легирленген меншікті кедергісі $10-20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ және беттік ориентациясы (100) c-Si пластиналарынан дайындалған кеуектілігі $P = 70\%$, $L = 1.5$ (үзік сызықтар) және 2.5 мкм (нүктелік сызықтар) КНТ қабықшасының өткізу спектрі.

$1000-4000 \text{ см}^{-1}$ болатын спектралды аумақтағы $L=1.5-2.5 \text{ мкм}$ болатын КНТ-ның өткізу коэффициенті 50% -дан көп болады, бұл c-Si төсенішімен салыстырғанда үлкенірек болады. Аталған жайт КНТ-ның эффективті сыну көрсеткішінің төмен болуымен түсіндіріледі. Осылайша КНТ қабаты сол спектралды аумақта c-Si төсеніші үшін эффективті жарықтандырығыш агент ретінде әрекет етеді. $L > 2 \text{ мкм}$ үшін бақыланатын интерференциялық тербелістер бізге КНТ массивтерінің эффективті сыну көрсеткіші мен кеуектілігін бағалауға мүмкіндік берді, бұл (1)-(3) теңдеулердің негізіндегі эффективті орта есептеулерімен жақсы үйлеседі.

$L > 1 \text{ мкм}$ болатын КНТ қабаттарының $0,3-1 \text{ мкм}$ спектралдық аумақта толық шағылу коэффициентінің 1% -дан қатты төмендеуі байқалады, бұл оларды фотовольтаикада кері шағылдырығыш қабат ретінде қолдануға мүмкіндік береді. Сонымен қатар дайындалған КНТ $600-1000 \text{ нм}$

спектралдық облысында эффективті фотолуменесценцияға (ФЛ) ие болады, бұл КНТ-ның ішкі қабырғаларында орналасқан өлшемдері 2-5 нм кішкентай кремний нанокристаллдарындағы экситондардың сәулелік рекомбинациясының болуымен түсіндіріледі. КНТ-ның ФЛ УК фотондық энергиясын бастапқы түрлендіруге c-Si негізіндегі күн элементтерінің эффективтілігін арттыру үшін қолданыла алады. (1)-(3) теңдеулеріне негізделген сандық модельдеу шағылу мен жұтылудың екеуінде де 1 мкм-ден кіші спектралдық диапазонда КНТ-ның ядроларында концентрациясы 10^{18} см⁻³-тан жоғары болатын еркін заряд тасымалдаушылардың эффективтісінің болу мүмкіндігін болжайды, бұл КК-ден алынған нәтижелерге ұқсайды.

Қорытынды

c-Si пластиналарын электрохимиялық жемірумен қалыптастырылған анизотропты кеуекті

кремний қабықшалары мен фтор қышқылы ерітіндісінде металл индуцирленген химиялық жеміру арқылы алынған кремний наноталшықтары тәжірибелік түрде инфрақызыл спектралдық аумағында өткізу мнн жұтылудың оптикалық спектроскопиясы әдістері көмегімен зерттелді. Эффективті орта моделі кең спектралдық аумақтағы алыс инфрақызыл аумақты қоса алғанда дайындалған қабықшалардың оптикалық қасиеттерін түсіндіреді. Тәжірибелік мәліметтер мен модельдеуден алынған нәтижелердің екеуі де сыну коэффициенті (екі сәулелік сыну) мен жұтылудың (дихроизм) күшті анизотропияға ие болатынын көрсетті, бұл еркін заряд тасымалдаушылардың концентрациясы арқылы қайтадан орнына келе алады. Бұл нәтижелер анизотропты кремний наноқұрылымдарын инфрақызыл спектралды аумақта поляризатор, түрлендіргіштер мен модуляторлар секілді фотоникалық құрылғыларда түрлендіргіш оптикалық материал ретінде қарастыруға мүмкіндік береді.

Әдебиеттер

- 1 Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based optoelectronics //Surface science reports. – 2000. – V. 38,N. 1. – P. 1-126.
- 2 Головань Л. А., Тимошенко В. Ю., Кашкаров П. К. Оптические свойства нанокомпозитов на основе пористых систем // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, №. 6. – С. 619-638.
- 3 Sivakov V., Christiansen S. Novel discovery of silicon //Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2012. – V. 7. – N. 6. – P. 583-590.
- 4 Künzner N., Kovalev D., Diener J., Gross E., Timoshenko V. Yu., Polisski G., Koch F., Fujii M. Giant birefringence in anisotropically nanostructured silicon //Optics letters. – 2001. – V. 26,N. 16. – P. 1265-1267.
- 5 Timoshenko V.Yu., Osminkina L.A., Efimova A.I., Golovan L.A., Kashkarov P.K., Kovalev D., Künzner N., Gross E., Diener J., Koch F. Anisotropy of optical absorption in birefringent porous silicon //Physical Review B. – 2003. – V. 67,N. 11. – P. 113405.
- 6 Kashkarov P.K., Golovan L.A., Fedotov A.B., Efimova A.I., Kuznetsova L.P., Timoshenko V. Yu., Sidorov-Biryukov D.A., Zheltikov A.M., Haus J.W. Photonic bandgap materials and birefringent layers based on anisotropically nanostructured silicon // JOSA B. – 2002. – V. 19,N. 9. – P. 2273-2281.
- 7 Peng K.Q., Yan Y.-J., Gao S.-P., Zhu J. Synthesis of large-area silicon nanowire arrays via self-assembling nanoelectrochemistry //Advanced Materials. – 2002. – V. 14,N. 16. – P. 1164.
- 8 Boarino L., Boratto C., Geobaldo F. NO₂ monitoring at room temperature by a porous silicon gas sensor //Materials Science and Engineering: B. – 2000. – V. 69. – P. 210-214.
- 9 Pancheri L., Oton C.J., Caburro Z. Very sensitive porous silicon NO₂ sensor //Sensors and Actuators B: Chemical. – 2003. – V. 89,N. 3. – P. 237-239.
- 10 Osminkina L.A., Gonchar K.A., Marshov V.S., Bunkov K.V., Petrov D.V., Golovan L.A., Talkenberg F., Sivakov V.A., Timoshenko V. Yu. Optical properties of silicon nanowire arrays formed by metal-assisted chemical etching: evidences for light localization effect //Nanoscale research letters. – 2012. – V. 7,N. 1. – P. 1-6.
- 11 Oh J., Yuan H.C., Branz H.M. An 18.2%-efficient black-silicon solar cell achieved through control of carrier recombination in nanostructures //Nature nanotechnology. – 2012. – V. 7, N. 11. – P. 743-748.

References

- 1 O. Bisi, S. Ossicini, L. Pavesi, Surface science reports, 38(1), 1-126, (2000).
- 2 L.A. Golovan, V. Yu. Timoshenko, P.K. Kashkarov, Physics-Uspekhi, 177(6), 619-638, (2007) (in russ).
- 3 V. Sivakov, S. Christiansen, Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 7(6), 583-590, (2012).
- 4 N. Künzner, D. Kovalev, J. Diener, E. Gross, V. Yu. Timoshenko, G. Polisski, F. Koch, M. Fujii, Optics letters, 26(16), 1265-1267, (2001).

- 5 V.Yu. Timoshenko, L.A. Osminkina, A.I. Efimova, L.A. Golovan, P.K.Kashkarov, D. Kovalev, N. Künzner, E. Gross, J. Diener, F. Koch, *Physical Review B*, 67(11), 113405, (2003).
- 6 P.K. Kashkarov, L.A. Golovan, A.B. Fedotov, A.I. Efimova, L.P. Kuznetsova, V.Yu. Timoshenko, D.A. Sidorov-Biryukov, A.M. Zheltikov, J.W. Haus, *JOSA B*, 19(9), 2273-2281, (2002).
- 7 K.-Q. Peng, Y.-J. Yan, S.-P. Gao, J. Zhu, *Advanced Materials*, 14(16), 1164, (2002).
- 8 L. Boarino, C. Boratto, F. Geobaldo, *Materials Science and Engineering: B*, 69, 210-214, (2000).
- 9 L. Pancheri, C. J. Oton, Z. Caburro, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 89(3), 237-239, (2003).
- 10 L.A. Osminkina, K.A. Gonchar, V.S. Marshov, K.V. Bunkov, D.V. Petrov, L.A. Golovan, F. Talkenberg, V.A. Sivakov, V.Yu. Timoshenko, *Nanoscale research letters*, 7(1), 1-6, (2012).
- 11 J. Oh, H.C. Yuan, H.M. Branz, *Nature nanotechnology*, 7(11), 743-748, (2012).