

**Икрамова Салтанат Бауыржанқызының «6D071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін алу үшін ұсынылған «Нанокұрылымды шалаөткізгішті сенсорлардың электрлік және оптикалық қасиеттеріне кеуектіліктің әсері» тақырыбындағы диссертациялық жұмысқа**

**АНДАТПА**

**Жұмыстың жалпы сипаттамасы.** Диссертациялық жұмыста бетіне алтын нанобөлшектері отырғызылған кремний жіп тәріздес нанокұрылым қабаттарынан тұратын қатты дене электроникасы құрылғылары және қондырғыларымен интеграциялауға болатын молекулалық сенсориканың сезімтал элементінің параметрлері мен сипаттамаларын тәжірибелік зерттеу нәтижелері көрсетілген.

**Тақырыптың өзектілігі**

Төмен жұмыс температурасы, жылдам динамикалық реакциясы және жоғары селективтілігі бар химиялық сенсорлар қоршаған орта мен денсаулықты бақылауда сұранысқа ие. Сенсорлардың сезімталдығы мен селективтілігі сезімтал материалдың қасиеттерімен анықталады. Сондықтан да, шалаөткізгіш сезімтал элементтің электрлік және оптикалық сенсорлық сезімталдығын зерттеу қазіргі электрониканың өзекті мәселелерінің бірі болып табылады.

$\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{PdO}$ ,  $\text{In}_2\text{O}_3$  кеуекті кең зоналы шалаөткізгіш металл оксидтеріне негізделген әр түрлі типтегі газ сенсорлары белсенді түрде әзірленуде және қолданылады. Дегенмен, мұндай сенсорлардың елеулі кемшіліктеріне олардың реакциясының тұрақтылығының жеткіліксіздігі, сондай-ақ сезімтал элементті ( $250\text{-}500^\circ\text{C}$ ) температураға дейін қыздыру қажеттілігі жатады. Бұл қосымша энергия шығындарына, уақыт өте келе сезімтал қабат материалының деградациясына және өрт және жарылыс қаупі бар атмосферада жұмыс істеуге байланысты белгілі бір тәуекелдерге әкелуі мүмкін. Сондықтан бөлме температурасына жақын температурада қоршаған ортадағы молекулаларды анықтау үшін жаңа шалаөткізгіш сезімтал элементтерді жасау өте маңызды.

Әртүрлі сезімтал материалдардың ішінде кремний наножіптері перспективті сенсорлық қасиеттерімен, биоүйлесімділігімен, үлкен меншікті беттік ауданымен, оны әртүрлі функционалдық топтармен өзгерту мүмкіндігімен, жылдам жауап беруімен және бөлме температурасында оптикалық және электрлік сипаттамалардың жақсы қайталануымен, сондай-ақ қазіргі заманғы кремний негізіндегі шалаөткізгіш технологиясымен үйлесімділігімен ерекше назар аудартты.

Металл-ынталандырылған химиялық жеміру (МАСЕ) көмегімен кеуекті кремний қабатын өсіру газ және сұйық молекуласын адсорбциялау үшін белсенді сенсорлық материал ретінде қызмет ете алатын кремний наножіп массивтерінің түзілуіне алып келеді. Кремний наножіптерінің түзілу заңдылықтары мен

физикалық қасиеттері туралы көптеген ғылыми еңбектерге қарамастан, мұндай құрылымдарда молекулалық зондтау бойынша аяқталған зерттеулер жоқ.

Кеуекті кремний наножіптері массивтерінде өткізгіштігі жоғары металл нанобөлшектерінің болуы мұндай жүйелерде сенсорлық қолданбалар үшін маңызды болып табылатын бірқатар жаңа бірегей қасиеттердің пайда болуына әкелетіні белгілі. Олардың ішінде көрінетін спектрлік облыста электромагниттік сәулеленудің металл нанобөлшектерінің бос беттік электрондарымен байланысына негізделген жарықтың беттік күшейтілген комбинациялық шашырау эффектісі (алып рамандық шашырау немесе SERS-эффект) жатады. Қазіргі таңда SERS эффектісі экология, химиядан биосенсорикаға дейінгі көптеген қосымшалар үшін маңызды өте төмен концентрациядағы мақсатты молекулаларды анықтау үшін кеңінен қолданылады.

Әдетте SERS белсенді төсемнің тиімділігі төсем морфологиясына және плазмондық нанобөлшектердің физикалық қасиеттерінен тәуелді болатын күшейту коэффициентімен сипатталады. SERS-тің максималды тиімділігі металл нанобөлшектерінің жақын орналасуынан пайда болған электр өрісінің «ыстық нүктелеріне» байланысты. SERS сигналының қайталануы мен тұрақтылығы SERS белсенді беттерінің тиімділігін бағалаудың маңызды көрсеткіші болып табылады. Бұл төсем бетінің жақсы басқарылатын және ұзақ уақыт бойы тұрақты болуы керек дегенді білдіреді. Сондықтан, әмбебап және тиімділігі жоғары SERS төсемдеріндегі биомолекулалар үшін тиімді электронды құрылғыларды (сенсор) жасау әлі де жалғасуда. Жаңа технологиялар әзірленіп, жаңа наноқұрылымды материалдар және оларды қолдану әдістері ұсынылып келеді.

Оптоэлектронды құрылғыларға арналған кремний наножіптерінің негізгі физика-химиялық қасиеттері егжей-тегжейлі зерттелгеніне қарамастан, шалаөткізгіш сезгіш элементтердің кеуектілігінің электрлік және оптикалық сенсорлық сезімталдыққа әсері сияқты сенсорика үшін маңызды бірқатар мәселелер жеткілікті түрде зерттелмеген. Молекулалық сенсорикадағы кеуекті кремний наноқұрылымдарының электрлік сенсорлық сезімталдығын пайдалануға кедергі келтіретін ықтимал себептердің бірі – олардың бетінің біртіндеп тотығу факторы, ол кеуектілікке де байланысты. Бүгінгі таңда радиоэлектроника мен оптоэлектрониканың өзекті міндеттерінің бірі кеуекті кремний наножіптері құрылымдарында бір мезгілде электрлік және оптикалық жауаптарды қолдануға негізделген тиімді электронды сенсорлық құрылғыларды құру болып табылады.

**Жұмыстың мақсаты** бетіне алтын нанобөлшектері отырғызылған кремний наножібі наноқұрылымы қабаттары негізіндегі шалаөткізгіш сенсорлық элементтің электрлік және оптикалық сенсорлық сезімталдығына кеуектіліктің әсерін тәжірибелік түрде зерттеу болып табылады.

### **Зерттеу міндеттері**

1. Бетіне алтын нанобөлшектері отырғызылған кремний наножіптері негізіндегі молекулалық сенсордың шалаөткізгіштік элементін дайындаудың технологиялық режимдерін оңтайландыру және құру.

2. Молекулалық сенсордың сезімтал элементінің кеуектілігінің газ тәріздес аммиак буындағы электрлік сенсорлық сезімталдығына әсерін зерттеу және ең жоғары сезімталдыққа жету үшін кеуектіліктің оңтайлы мәнін анықтау.

3. Сенсорлық құрылымдағы органикалық бояғыштар молекулаларынан жарықтың комбинациялық шашырауының салыстырмалы интенсивтілігі сигналына кеуектіліктің әсерін зерттеу және мұндай құрылымдарда сенсорлық сигналдың пайда болуының негізгі заңдылықтарын ашу.

**Зерттеу нысандары:** кеуекті кремний наножібі негізіндегі молекулалық сенсорлық элементтер, алтын нанобөлшектері, беттік плазмондар, кеуектілік.

**Зерттеу пәні:** морфология, бетіне алтын нанобөлшектері отырғызылған кремний наножіптері негізіндегі сенсорлық материалдың электрлік және оптикалық қасиеттері, жарықтың беттік-күшейтілген комбинациялық шашырауы, плазмоника, молекулалық сенсорика.

**Зерттеу әдістері:** металл-ынталандырылған химиялық жеміру, скандаушы және трансмиссиялық электронды микроскопия, энергодисперсті рентгендік спектроскопия, рамандық спектроскопия, box-counting, ImageJ, сынаптық порометрия, сұйық ерітінді көмегімен металлдарды химиялық отырғызу, NI ELVIS II+ цифрлық әмбебап станция көмегімен зерттелінетін үлгілердің вольт-амперлік сипаттамаларын өлшеу әдісі, Ntegra Spectra, NT-MDT спектروفотометрін қолданып сенсорлардың оптикалық сипаттамаларын тіркеу.

#### **Қорғауға ұсынылатын негізгі ережелер**

1. Кремний наножіптері қабаттарына негізделген, кейін олардың бетіне алтын нанобөлшектері отырғызылған бөлме температурасында электрлік және оптикалық сигналдарды қабылдау арқылы молекулаларды анықтауға арналған оптоэлектронды сенсор келесі параметрлерде ең жоғары тиімділікті көрсетеді: кремний наножіптерінің ұзындығы 5-тен 35  $\mu\text{m}$  дейін, көлденең қимасы шамамен 100 нм, алтын нанобөлшектерінің өлшемі шамамен 10 нм және қабықшаның кеуектілігі 50-ден 85 % аралығында.

2. Ұзындығы шамамен 10  $\mu\text{m}$  және кеуектілігі шамамен 70 % кремний наножіптері массивтеріне негізделген сенсорлық құрылымдардағы шамамен 100 ppm концентрациядағы аммиак буына электрлік сенсорлық сезімталдық наножіптердің бетіне алтын нанобөлшектерін қосқан жағдайда 5-7 есе артады және құрылымдарға түсірілген 1-10 В кернеу және 1-25 мА ағынды ток кезінде байқалады.

3. Алтын нанобөлшектері бар кремний наножіптері құрылымында адсорбцияланған органикалық бояғыштар молекулаларында жарықтың алып комбинациялық шашырау эффектісіне негізделген оптикалық сенсорлық сезімталдық белсенді элементтің кеуектілігі шамамен 50 % болғанда ең үлкен мәндерге жетеді, салыстырмалы интенсивтілік сенсорлық сигналын күшейту коэффициенті шамамен  $10^5$  құрайды, ал аналит молекулалары  $10^{-15}$  моль анықтау шегімен детектрленеді.

#### **Жұмыстың ғылыми жаңалығы келесідей**

1. Газ тәріздес аммиак буында алтын нанобөлшектері отырғызылған кремний наножіптері негізіндегі шалаөткізгіш сезімтал материалдардың электрлік сенсорлық жауабына кеуектіліктің әсері тәжірибелік түрде зерттелінді

және максималды сезімталдыққа қол жеткізу үшін шамамен 70% кеуектіліктің оңтайлы мәні табылды.

2. Алтын нанобөлшектері отырғызылған кремний наножіптері негізіндегі наноқұрылымды сенсорлық материалдардағы органикалық бояғыштар молекулаларынан оптикалық сенсорлық жауаптар зерттелінді және молекулаларды анықтау үшін мұндай құрылымдардың оңтайлы кеуектілігі шамамен 50% болатыны анықталды.

3. Алтын нанобөлшектері отырғызылған кремний наножіптері негізіндегі сенсорлық материалдарды шамамен  $10^{-15}$  моль концентрациядағы органикалық бояғыш молекулаларын детектрлеу үшін пайдаланылуы мүмкін екендігі анықталды.

### **Зерттеудің ғылыми-практикалық маңыздылығы**

1. Зерттеу нәтижелері шағын мақсатты молекулаларды анықтау үшін алтын нанобөлшектері бар кремний наножіптерінің тығыз массивтерін шығаратын сенсорлық элементтерді алудың технологиялық режимдерін табуға мүмкіндік береді, бұл биомедициналық және экологиялық қолданбалар үшін оптоэлектрондық сенсордың сезімтал элементін дайындауда пайдалы болуы мүмкін.

2. Кремний наножіптері кеуектілігінің сенсорлық материалдардың электрлік және оптикалық жауаптарына әсерін зерттеуде алынған нәтижелерді молекулалық сенсорлардың жаңа түрлерін өндіруде және олардың жұмысының тиімділігін арттыруда қолдануға болады.

**Зерттеу көздері** болып қазіргі заманғы наноэлектрониканың негізгі тәжірибелік ережелері, сондай-ақ сенсорлық технология, плазмоника сияқты ғылым мен техниканың сабақтас салалары, сонымен қоса пайдаланылған әдебиттер тізімінде келтірілген түпнұсқалы ғылыми еңбектердің нәтижелері жатады.

**Автордың жеке үлесі.** Жұмыстың негізгі кезеңдері, кремний наножіптері үлгілерін алу және олардың бетіне металл нанобөлшектерін отырғызу, үлгілер бетіне контактілерді орнату, электрлік және оптикалық қасиеттерді зерттеу, кеуектілікті анықтау және нәтижелерді талдауды автордың жеке өзі орындады. Сканерлеуші және трансмиссиялық электронды микроскоптың көмегімен алынған микрофотографияларды автор Астана қаласында өткен тағылымдама аясында жеке алды. Негізгі ғылыми зерттеу жұмыстары Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ-і, физика-техникалық факультетіндегі Ашық типтегі Ұлттық нанотехнологиялық зертханасында және шалаөткізгіш аспаптар зертханасында орындалды. Астана қаласындағы Назарбаев Университетінің материалдар мен лазерлік технологияларды тереңдетілген зерттеулер зертханасында (AMRELAT) таза кеуекті кремний наножіптерінің және алтын және күміс нанобөлшектері бар кеуекті кремний наножіптерінің микрофотографияларын түсіру, оптикалық қасиеттерін өлшеу жұмыстары жүргізілді. Автор зерттеу тобының құрамында кремний наножіптерінің жұқа қабықшаларының электрондық және оптикалық қасиеттерін алу технологиясы мен құрылымдық және плазмоникалық түрлендіру әдісін әзірледі. Қорғалатын ережелер, негізгі нәтижелер мен қорытындылар ғылыми кеңесшілермен бірлесіп жасалынды.

**Жұмыс нәтижелерінің сенімділігі** құрылымдық, электрлік, оптикалық бірін-бірі толықтырушы кешендерді қолдану арқылы қамтамасыз етіледі: трансмиссиялық және сканерлеуші электрондық микроскопия, рентгендік энергия-дисперстік спектроскопия, Раман спектроскопиясы, оптикалық шағылу спектроскопиясы, сенсорлардың вольт-амперлік сипаттамаларын өлшеу және наноқұрылымдардың кеуектілігін анықтау.

#### **Жұмысты апробациялау**

Зерттеу нәтижелері бойынша 11 мақала жарияланды, оның ішінде ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласындағы сапаны қамтамасыз ету комитеті ұсынған жарияланымдарда 4, Web of Science және/немесе Scopus индекстейтін халықаралық ғылыми журналдарда 2 (International Journal of Molecular Sciences – Q1, IF 6.628; Applied Sciences – Q2, IF 2.921), ресейлік ғылыми дәйексөздер индексінің дерекқорына енгізілген ғылыми басылымдарында 1, халықаралық конференциялардың тезистер жинақтарында 3 жарияланым, соның ішінде 1 шетелдік (The 6-th International Symposium and Schools for Young Scientists on Physics, Engineering and Technologies for Biomedicine. November 20-24, 2021. Moscow) конференция және 1 авторлық куәлік (№28638, 7.09.2022 ж.).

#### **Диссертация тақырыбының ғылыми жұмыс жоспарымен байланысы**

Диссертациялық жұмыс ҚР ҒЖБМ ҒК ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру бағдарламасы бойынша «Наноқұрылымданған шалаөткізгіштердің бейсызық электрлік, оптикалық және фракталдық-геометриялық сипаттамаларының өзара байланысы», № ГР 0118РК00200 (2018 - 2020 ж) және Назарбаев Университетінің бірлескен зерттеулер бағдарламасы (CRP) «Бүйрек ауруларының биомаркерлері ретінде несеп протеиндерінің механикохимиялық қасиеттерін инвазивті емес бағалау үшін гибриді Brillouin-Raman спектроскопиясын әзірлеу және валидациялау» № 091019CRP2105 (2020-2022 ж.) тақырыптарындағы ҒЗЖ шеңберінде орындалды.

**Диссертацияның құрылымы мен көлемі.** Жұмыс кіріспеден, негізгі бөлімнен (әдебиеттік шолу, тәжірибелік бөлім, нәтижелер және оларды талқылау), қорытындыдан, пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады. Диссертацияның көлемі 109 бет машинамен басылған мәтінді құрайды, оның ішінде 82 сурет, 6 кесте, 31 формула және 123 пайдаланылған әдебиеттер.