

«8D06201 – Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» білім беру бағдарламасы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін диссертациялық жұмысқа

АНДАТПА

ДУЙСЕБАЕВ ТОЛАҒАЙ САБЫРЖАНҰЛЫ

РЕЗИСТИВТІ АУЫСУ ӘСЕРЛЕРІ ЖӘНЕ ОРГАНИКАЛЫҚ ЗАТТАРДЫ СЕЗУ ҚАСИЕТТЕРІ БАР ЖАРТЫЛАЙ ӨТКІЗГІШТЕР НЕГІЗІНДЕГІ ЭЛЕКТРОНДЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

Жұмыстың жалпы сипаттамасы

Осы диссертациялық жұмыста резистивті ауысу эффектілері мен ұшпа органикалық қосылыстардың газ сенсорикасы қасиеттеріне ие жартылай өткізгіш материалдар негізіндегі электрондық жүйелерді зерттеу нәтижелері ұсынылған. Заманауи талдау әдістерін, сондай-ақ газ сенсорикасы саласында алғаш рет қолданылған эллипсометрия әдісін пайдалану арқылы оның жартылай өткізгіш құрылымдар бетінде газдардың адсорбциялану процестерін зерттеудегі перспективалығы көрсетілді. Кеуекті кремний және металл-оксидті гетероқұрылымдар негізіндегі құрылымдардың электрлік гистерезис түрінде байқалатын мемристорлық қасиеттерге ие екені дәлелденді. Тығыздық функционалдық теориясы (DFT) әдістерін қолдану арқылы газ адсорбциясы кинетикасының механизмдері есептеліп, расталды.

Зерттеудің өзектілігі

Микро- және наноэлектрониканың заманауи дамуы ақпаратты өңдеу мен сақтаудың жаңа парадигмаларына, соның ішінде нейроморфты есептеу жүйелеріне, заттар интернетіне (IoT) және интеллектуалды сенсорлық желілерге көшуімен сипатталады. Бұл бірнеше функцияны бір құрылымда біріктіре алатын энергия тиімді және көпфункционалды құрылғыларды жасауды талап етеді. Осыған байланысты жоғары жылдамдықпен жұмыс істейтін, аз энергия тұтынатын және заманауи электрондық жүйелермен үйлесімді жаңа материалдарды зерттеуге ерекше назар аударылуда.

Қазіргі электрониканың перспективалы бағыттарының бірі — резистивті ауысу эффектісіне негізделген жартылай өткізгіш құрылымдар. Мұндай құрылғылар мемристорлардың негізін құрайды және энергонезависимді жадының (ReRAM) негізгі элементтері ретінде қарастырылады. Сонымен қатар, өткізгіштікті аналогтық түрде басқару мүмкіндігі олардың нейроморфты есептеу жүйелерінде жасанды синапс ретінде қолданылуына мүмкіндік береді.

ZnO, TiO₂, SnO₂ сияқты металл оксидті жартылай өткізгіштер жоғары химиялық тұрақтылығымен, дамыған беткі құрылымымен және газдарға сезімталдығымен ерекшеленеді. Сондықтан олар мемристорлық құрылғыларда

ғана емес, газдар мен ұшқыш органикалық қосылыстарды анықтайтын жоғары сезімтал сенсорлар ретінде де кеңінен зерттелуде.

Соңғы жылдары резистивті ауысу эффектісі мен сенсорлық қасиеттерді бір құрылымда біріктіруге қызығушылық артып келеді. Мұндай құрылғылар ақпаратты сақтау, өңдеу және сыртқы әсерлерді анықтау функцияларын қатар атқара алады. Бұл оларды заттар интернеті, робототехника және интеллектуалды электрондық жүйелер үшін перспективалы технологияға айналдырады.

Резистивті ауысу мен сенсорлық әсердің механизмдері көбіне ұқсас физика-химиялық процестермен байланысты. Олардың негізінде оттектік вакансиялардың миграциясы, өткізгіш арналардың түзілуі және беткі адсорбция-десорбция процестері жатыр. Дегенмен, құрылғылардың тұрақтылығы, қайталанғыштығы және сенімділігі мәселелері әлі де толық шешілмеген.

Осыған байланысты мемристивті және сенсорлық қасиеттері біріктірілген металл оксидті жартылай өткізгіш құрылымдарды зерттеу қазіргі микро- және наноэлектрониканың өзекті ғылыми бағыттарының бірі болып табылады.

Жұмыстың мақсаты

Бұл диссертацияның мақсаты металл-оксидті жартылай өткізгіш құрылымдардың құрылымдық, морфологиялық, электрлік және оптикалық сипаттамалары мен олардың газға сезімтал қасиеттері арасындағы өзара байланысты анықтау, сондай-ақ олардың негізінде резистивті ауысу эффектілері мен органикалық заттарды сенсорлық анықтау қасиеттеріне ие көпфункционалды электрондық жүйелерді әзірлеу болып табылады.

Зерттеу объектілері: Сенсорлық және жады элементтерін жүзеге асыруға арналған кеуекті кремний және металл-оксидті гетероқұрылымдар негізіндегі жартылай өткізгіш құрылымдар.

Зерттеу пәні: Кеуекті кремний және металл-оксидті гетероқұрылымдар негізіндегі жартылай өткізгіш құрылымдардағы газға сезімтал жауаптың қалыптасу физикалық механизмдері мен заңдылықтары, сондай-ақ олардың электрлік және оптикалық сипаттамаларын және сенсорлық әрі жады элементтерінің функционалдық параметрлерін анықтайтын резистивті ауысу эффектілері.

Зерттеу әдістері

Жұмыста жартылай өткізгіш құрылымдарды қалыптастыру және зерттеудің кешенді әдістері қолданылды. Кеуекті кремний электрохимиялық әдіспен, ал металл-оксидті гетероқұрылымдар магнетрондық тозаңдату әдісімен алынды. Құрылымдық және морфологиялық сипаттамалар сканерлеуші электрондық микроскопия (SEM), атомдық-күштік микроскопия (AFM) және рентгендік дифракция (XRD) әдістері арқылы зерттелді. Беттік қасиеттері сулану бұрышын өлшеу арқылы бағаланды. Электрофизикалық сипаттамалар ван дер Пау әдісімен және вольт-амперлік сипаттамаларды (I-V) талдау арқылы анықталды, ал оптикалық параметрлер спектрофотометрия әдісімен зерттелді. Газға сезімтал қасиеттер органикалық заттардың әсері кезінде зерттелді, бұл ретте спектралдық эллипсометрия құрылымдар бетінде жүретін адсорбциялық процестерді *in situ* режимінде тіркеудің сезімтал әдісі ретінде қолданылды.

Нәтижелерді өңдеу эксперименттік және аналитикалық әдістерді пайдалану арқылы жүргізілді.

Зерттеу міндеттері

1. Электрохимиялық жеміру арқылы алынған кеуекті кремнийге негізделген сенсорлық элементті әзірлеу және сипаттау, сондай-ақ электрондық өлшеу жүйесінің бөлігі ретінде органикалық заттарды анықтаған кезде оның сезімталдығы, жауап беру уақыты және селективтілігі сияқты газды сезу сипаттамаларын бағалау.

2. $\text{SnO}_2/\text{por-Si}$ гетероқұрылымындағы металл-оксидті қабат қалыңдығының органикалық заттар буларының әсері кезіндегі газға сезімтал жауапқа ықпалын спектралдық эллипсометрия әдісін қолдана отырып зерттеу.

3. NiO/MgO гетероқұрылымындағы резистивті ауысу эффектілерін зерттеу және электрлік әсер ету режимі мен электродтар конфигурациясына байланысты анизотропты өткізгіштік параметрлері мен HRS/LRS күйлерінің қатынасын анықтау.

Диссертациялық жұмыстың ғылыми жаңалығы:

1. Кеуекті кремнийдің электрохимиялық синтез режимдеріне тәуелді газға сезімтал жауаптың қалыптасу заңдылықтары анықталды, олар электрондық өлшеу жүйесіне интеграциялау жағдайында аммиакқа максималды сезімталдық пен минималды жауап беру уақытын қамтамасыз етеді.

2. Алғаш рет $\text{SnO}_2/\text{por-Si}$ гетероқұрылымдарындағы металл-оксидті қабат қалыңдығының органикалық заттар буларына газға сезімтал жауап шамасына әсері эллипсометрия әдісі арқылы анықталды.

3. NiO/MgO гетероқұрылымдарындағы анизотропты резистивті ауысу эффектілері анықталып, жүйелендірілді, бұл HRS/LRS күйлері қатынасының жоғары мәндерін қамтамасыз ететінін және оларды энергияға тәуелсіз жад элементтерінде әрі жаңа типтегі функционалдық электрондық құрылғыларда қолдану мүмкіндігін негіздейтінін көрсетті.

Қорғауға ұсынылатын негізгі тұжырымдамалар:

1. Электрохимиялық жеміру әдісімен алынған және ток тығыздығы $j = 12 \text{ мА/см}^2$, кернеуі $U = 9 \text{ В}$ және жеміру уақыты $t = 45 \text{ мин}$ (кеуектілігі 52%) параметрлерімен дайындалған кеуекті кремнийден жасалған, электрондық жүйеге интеграцияланған сенсорлық элемент аммиакқа ең жоғары сезімталдықты – 42% көрсетеді, ал жауап беру уақыты $t_{\text{res}} = 35 \text{ с-қа}$ тең.

2. Эллипсометрия әдісіне негізделген $\text{SnO}_2/\text{por-Si}$ гетероқұрылымын зерттеу барысында металл-оксидті қабаттың қалыңдығы 100 нм-ден 300 нм-ге дейін артқан кезде этанол және пропанол буларына сезімталдығы 50%-дан астамға артатыны анықталды.

3. Анизотропты резистивті ауысу қасиетіне ие алынған NiO/MgO гетероқұрылымы $\pm 5 \text{ В}$ кернеу мәндерінде және электродтардың параллель конфигурациясында HRS/LRS қатынасының ең жоғары мәнін – 10^2 көрсетеді.

Теориялық маңыздылығы

Диссертациялық жұмыстың теориялық маңыздылығы кеуекті кремний және металл-оксидті гетероқұрылымдар негізіндегі жартылай өткізгіш

құрылымдардың құрылымдық, морфологиялық, электрлік және газға сезімтал қасиеттері арасындағы өзара байланысты анықтауда жатыр. Алынған нәтижелер резистивті ауысу механизмдері, газдардың адсорбция процестері және металл-оксидті қабаттар қалыңдығының газға сезімтал жауаптың қалыптасуына әсері туралы түсініктерді кеңейтеді. Сонымен қатар, газ сенсорикасы міндеттерінде адсорбциялық процестерді зерттеу үшін спектралдық эллипсометрия әдісін қолданудың перспективалылығы көрсетілді.

Практикалық маңыздылығы

Жұмыстың практикалық маңыздылығы әзірленген жартылай өткізгіш электрондық жүйелерді экологиялық мониторинг, өнеркәсіптік қауіпсіздік және медициналық диагностика жүйелерінде ұшпа органикалық қосылыстарды (ҰОҚ) анықтау үшін пайдалану мүмкіндігінде жатыр. Алынған нәтижелерді сондай-ақ резистивті ауысу эффектілеріне негізделген энергияға тәуелсіз жад элементтері мен жаңа буындағы функционалдық құрылғыларды жасау кезінде қолдануға болады. Бұдан бөлек, зерттеу нәтижелері сенсорлық және мемристивтік қасиеттерді біріктіретін құрылғылардың жаңа класы – газисторларды әзірлеу перспективаларын ашады.

Нәтижелердің сенімділігі мен жарамдылығы

Диссертациялық жұмыстың нәтижелерінің сенімділігі мен негізділігі Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің басылымдарында, сондай-ақ халықаралық ақпараттық ресурстарға кіретін Web of Science (Clarivate Analytics, АҚШ) және Scopus (Elsevier, Нидерланды) журналдарында және халықаралық ғылыми конференцияларда жарияланған еңбектердің болуымен, сонымен қатар басқа авторлар алған нәтижелермен сәйкестігі арқылы расталады.

Автордың жеке үлесі

Автор диссертациялық жұмыстың барлық кезеңдеріндегі зерттеу жұмыстарына тікелей қатысты. Автор нанокұрылымдарды алу, газ бөлшектерінің олардың электрлік сипаттамаларына әсерін зерттеу, сондай-ақ үлгілердің оптикалық, морфологиялық және электрлік сипаттамаларын зерттеу нәтижелерін өңдеу мен талдау жұмыстарын жүргізді. Зерттеу міндеттері мен жұмыс жоспарын бекіту, сондай-ақ нәтижелерді талқылау ғылыми жетекшілермен бірлесіп жүзеге асырылды.

Диссертациялық жұмысты апробациялау

Диссертация тақырыбы бойынша 4 жұмыс Scopus/Web of Science халықаралық ақпараттық ресурстарына енгізілген ғылыми басылымдарда жарияланды. Сондай-ақ 1 авторлық куәлік бар.

Scopus/Web of Science халықаралық ғылыми дерекқорына енгізілген басылымдарда жоғары импакт-факторы бар мақалалар:

1. A.Skabylov, L.Abdizhalilova, M.Ibraimov, B.Khaniyev, Y.Tezekbay, M.Abdullah, R.Azamat, O.Toktarbaiuly and **T.Duisebayev**. Wireless Ammonia Gas Sensor based on P-type Porous Si: Methods, Materials and Design. Engineered Science, 2025, V.37. [IF = 12.5, Процентиль 96%]
<http://dx.doi.org/10.30919/es1704>.

2. M.Ibraimov, B.Khaniyev, Y.Tezezbay, R.Azamat, N.Yakovlev, O. Toktarbaiuly, M.Zhazitov, M.Karibayev, B.Akilbekov, S.Piskunov, J.Liu, **T.Duisebayev**. Ellipsometry optical gas sensor of SnO₂/porous-Si heterostructure for organic compounds detection. Advanced Sensor Research [Q2, IF = 3.5, процентиль 70%] <https://doi.org/10.1002/adsr.202500194>

3. **T.Duisebayev**, B.Khaniyev, M.Ibraimov, O.Toktarbaiuly, M.Zhazitov, M. Abdullah, Y. Tezezbay, A. Syrlybekov, T. Serikov, N. Nuraje. Anisotropic Resistive switching in NiO Thin Films Deposited on Stepped MgO Substrates. Nanomaterials. [Q1, IF = 4.3, процентиль 76%] <https://doi.org/10.3390/nano15221703>.

4. **T.Duisebayev**, M.Ibraimov, B.Khaniyev, A.Tileu, D.Alimbetova. Development of memory elements based on surface-modified nanostructured porous silicon. WSEAS Transactions on Electronics, 15 2024 [IF=1.1, процентиль 25%] <https://doi.org/10.37394/232017.2024.15.8>.

Авторлық куәлік:

№685501 11 наурыз 2026ж. «Органикалық заттарды эллипсометриялық әдіспен анықтау», Дүйсебаев Т.С., Ибраимов М.К.

Жұмыстың ғылыми жобалармен байланысы:
Жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі Ғылым комитеті қаржыландыратын № АР19678266 «Өнеркәсіптік қауіпсіздікті қамтамасыз ету үшін нанокұрылымды жартылай өткізгіштер негізінде жарылғыш және зиянды заттарға арналған селективті газ сенсорын әзірлеу» жобасы аясында орындалды (2023–2025 жж.).

Диссертациялық жұмыстың құрылымы мен көлемі

Диссертация кіріспеден, 3 бөлімнен, қорытындыдан және әдебиеттер тізімінен тұрады. Жұмыста 66 сурет, 28 формула, 4 кесте, 106 әдебиеттер тізімі және 107 бет бар.