

Козловский Артем Леонидовичтің, 6D060500 – Ядролық физика мамандығы бойынша философия докторы (PhD) ғылыми дәрежесін ізденуіне ұсынылған «Ядролық тректік мембраналардың негізіндегі нанокұрылымдалған материалдардың синтезі және қасиеттері» тақырыбындағы диссертациялық жұмысына

ТҮСІНІКТЕМЕ

Диссертациялық зерттеудің жалпы сипаттамасы

Жұмыс ядролық тректік мембраналардың қуыстарына металл нанотүтіктерінің синтезін, сонымен қатар алынған нанотүтіктердің құрылымы мен өткізгіштік қасиеттеріне иондаушы және электрондық сәулеленудің әсерін зерттеуге арналған. Электрхимиялық тұндыру шарттарынан (электролит температурасы, кернеу) құрылымдық және өткізгіштік қасиеттерінің өзгеру тәуелділігі анықталды. Магниттік моменттерінде теңықтималдық бағдарлану байқалатын Fe нанотүтіктерінен ерекшеленетін, құрамында темір бар екі компонентті нанотүтіктерінің осының бойында Fe атомдарының магниттік моменттерінің басым бағыты бар магниттік текстура анықталды. Энергиясы 5 МэВ электрондық сәулелену арқылы Co, Cu и Zn нанотүтіктерінің құрылымдық және өткізгіштік қасиеттеріне бірінші рет бақыланбалы түрлендіру жүргізілді. Сәулелендірудің нәтижесінде ақаулардың электрондық босаңдауы болатыны, және оның салдарынан өткізгіштігі артса да кристаллиттердің орташа өлшемдерінің өзгермейтіні көрсетілген. Сонымен қатар уақыт пен термиялық босаңдатуға байланысты металдық нанотүтіктердің өткізгіштік қасиеттерінің өзгеруінің екі кезеңді үдерісі анықталған.

Алынған тәжірибелік мәліметтердің жоғары қолданбалы маңыздылығы Қазақстан Республикасының екі патентімен расталған. Зерттеулер Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің, ҚР ЭМ Ядролық физика институтының және М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу Мемлекеттік университетінің базаларында жүргізілген.

Зерттеу тақырыбының өзектілігі

Қазіргі заманда нанокұрылымды материалдар өздерінің бірегей қасиеттері және энергияны түрлендіргіш пен аккумулятор батареясынан бастап ақпарат иесі мен биосенсорларға дейінгі қолданыс салаларының кеңдігі арқасында зерттеуші топтар тарапының назарын күннен күнге арттыра аударуда. Ғылым мен техника облыстарындағы алға басу біріншіден материалдардың және олардың негізіндегі құрылғылардың экстремалдық жағдайларда, соның ішінде иондаушы өрісте немесе магниттік сәулелендіруде жұмыс істеу қабілеттерімен анықталады. Жаңа материалдар мен бұйымдарды қолдану тек олардың әр түрлі сәулелендіру немесе жылулық әсерлердің түрлеріне төзімділігін бағалау ғана емес, сонымен қатар иондаушы сәулелендіруді, материалдардың құрылымдық және электрмагниттік сипаттамаларын жақсарту мақсатымен қолдану мүмкіндігінің қажеттілігін мәжбүрлейді. Нанотүтіктердің бірегей механикалық сипаттамалары бұл

құрылымдарды болашақта өзінде жоғары термиялық және химиялық тұрақтылықты үйлестірген, сонымен қатар массивті материалдармен салыстырғанда электрөткізгіштігі мен кедергісінің мәні төмен негізгі материалдардың типтері қылады.

Әртүрлі сәулелену түрлерімен радиациялық сәулелендіру материалдардың қасиеттерін өзгертуге арналған тәсілдердің бірі болып табылады. Массивті материалдарға радиациялық әсерін зерттеу бірнеше онжылдық бойы жүргізілуде. Иондаушы сәулеленудің затпен әсерлесуінің теориясы едәуір жақсы пысықталғанын айта кеткен жөн, бірақ радиациялық сәулеленудің наноматериалдардың қасиеттеріне әсерімен байланысты облыс жеткіліксіз зерттелген. Қазіргі таңда иондаушы сәулеленудің наноматериалдардың құрылымы мен өткізгіштік қасиеттеріне әсерін талдауға бағытталған бірқатар жұмыстар бар, бірақ жұмыстардағы келтірілген нәтижелер айтарлықтай қарама-қайшы. Тап осы кезде наноөлшемді материалдардағы радиациялық әсерлерінің ерекшеліктері мен олардың құрылымдары мен өткізгіштік қасиеттеріне әсерлерінің, сонымен қатар олардың негізінде дайындалған бұйымдардың сипаттамаларының жалпы қабылданған сипаттамасы жоқ.

Иондаушы сәулеленудің әсерінен наноматериалдарда пайда болатын радиациялық әсерлер ұқсас микро- және макроөлшемді нысандарғы әсерлерден бірқатар өзгешеліктерге ие. Космостық аппараттар жабдықтарының жаңа элементтерін құруға бағытталған практикалық қолдану көзқарасы шаблондық синтез әдісімен алынған мыс және мырыш негізіндегі нанотүтіктерге қызығушылық танытады. Наноқұрылымдармен космостық сәулелену энергиясымен салыстырмалы энергиямен иондар әсерлескенде, оған тек соғылған бөлшектің энергиясының шамалы бөлігі ғана таралады. Осыған байланысты, наноөлшемді құрылымдарда құрылымдық ақаулардың немесе қосымша заряд тасушылардың аз мөлшері пайда болады. Сонымен бірге, соғылған бөлшектердің энергиясының өсуімен құрылатын ақаулар мен заряд тасушыларының саны энергияны сызықты тасымалдаудың азаюына және наноқұрылымдар заттарының атомдарымен әсерлесу қимасының азаюына байланысты төмендейді, сол екі арада қарапайым материалдарда соғылған бөлшектердің энергиясының өсуімен құрылымның ақаулары мен заряд тасушыларының сомалық саны артады.

Өз кезегінде, металл наноқұрылымдарын электрондық сәулелендіру материалдардың құрылымдық, оптикалық, электрлік және магниттік сияқты қасиеттерін бақыланбалы түрлендіруді жігерлендіруге арналған тиімді құрал болып табылады. Материал арқылы өткенде өздерінің энергияларын нысананың атомдарына тасымалдайтын жоғары энергиялы электрондармен сәулелендірген кезде электродық қоздыру, яғни атомдардың алғашқы орындарынан ауытқуы болады. Материалдарды радиациялық түрлендірудегі бақылау сәулелендіруге қолданылатын бөлшектердің энергиясын реттеу жолымен жүргізіледі, сонымен қатар олардың негізіндегі микроэлектрондық құрылғылардың жұмысы кезіне энергия тұтынудың төмендеуіне әкеп соғатын, наноқұрылымдардың кедергісін төмендететін қосымша заряд тасушыларды

енгізуге және ақауларды босандату есебінен металл нанокұрылымдарының өткізгіштік қасиеттері мен құрылымын өзгертуге мүмкіндік береді.

Нанокұрылымдарды медицина саласына қолдану, нанотехнологияларды дамытудың тағы бір перспективті бағыты болып табылады. Наномедицина – нанокұрылымдардың әртүрлі типтерін қолдана отырып сырқаттардың жалпы спектрін емдеу, диагностика жасау және аурулардың алдын алу әдістерін қамтитын, соңғы онжылдықта белсенді дамып келе жатқан бағыт. Синтездеу кезеңінде нанокұрылымдардың пішінін, өлшемдерін және химиялық құрамын басқару, оларға физикалық қасиеттер беруше мүмкіндік береді және биоқолданысқа жаңа мүмкіндіктер ашады. Пайдалы жүктерді (емдік дәрі-дәрмектерді немесе ақуыздарды) магнит өрісі көмегімен атаулы жеткізу, нанокұрылымдарды қолданудың айтарлықтай тартымды мүмкіндігі болып табылады. Бұл әдісте дәрі-дәрмек немесе ақуыз магнитті нанокұрылымдағы функционалды топтарға тіркеліп, қан тамыры жүйесіне енгізіледі, содан кейін магнит өрісі арқылы проблемалық аймаққа жеткізіледі. Көбінесе дәрі-дәрмектер мен ақуыздардың тасымалдаушысы ретінде сфералық магниттік нанобөлшектері қарастырылады. Алайда, бұл бөлшектердегі магнит моментінің аздығы оларға магнит өрісін жинастыруды қиындатады, сонымен қатар тамырлардағы қан ағынына қарсы кедергі жасауға мүмкіндік бермейді. Нанотүтіктердегі магниттік өзегінің болмауы нәтижелердің қайталануына кепілдік беретін біртекті өріс коммутациясы бар нанокұрылымдар құруға мүмкіндік береді; аз меншікті тығыздық сұйықта (сондай-ақ биологиялық сұйықтықта) қалқуға және оларды биотехнологияда қолдануға мүмкіндік береді; беттің меншікті ауданының үлкен болуы функционалды байланыстардың саны көп болуын қамтамасыз етіп, атаулы жеткізу кезінде мақсатты компоненттердің көп мөлшерін тасымалдауға мүмкіндік береді. Магнитті нанокұрылымдар жасау үшін ең перспективті материалдардың бірі болып, таза Co, Ni және Fe ферромагнитті металдарымен салыстырғанда, өзінің магниттенген мәні айтарлықтай жоғары темірдің кобальтпен немесе никельмен қорытпасы табылады.

Диссертациялық зерттеудің мақсаты және ғылыми нәтижелері. Шаблон ретінде ядролық тректік мембраналар қолданылған қуыс цилиндр пішінді металл нанокұрылымдарының реттелген массивтері синтезінің әдістемелік негіздерін зерттеу, термиялық босандату мен иондаушы сәулеленумен сәулелендірудің нанотүтіктердің құрылымдық, өткізгіштік әрі магниттік қасиеттеріне әсерін расторлық электрондық микроскопия, рентгенқұрылымдық және энергиядисперсиялық талдау, мессбауэр спектроскопия әдістерін қолданып зерттеу жұмыстың мақсаты болып табылады.

Зерттеудің нысаны ядролық тректік мембраналардың қуыстарында шаблонды синтез әдісі арқылы алынған біркөпкомпонентті (Co, Cu, Zn) және екікомпонентті (FeCo, FeNi) қуыс цилиндр пішінді металл нанокұрылымдары болып табылады. Зерттеудің нысаны диссертациялық зерттеудің тақырыбына, қойылған мақсаты мен міндеттеріне сәйкес.

Диссертациялық зерттеудің пәні полиэтилентерефталат негізіндегі

тректік мембраналардың қуыстарында нанотүтіктердің құрылуының негізгі заңдылықтарын зерттеу, сонымен қатар энергиясы 5 МэВ Xe^{+22} ауыр иондарымен және электрондармен сәулелендіру жолымен алынатын металл нанотүтіктерінің құрылымдық және өткізгіштік қасиеттерін бағытталған түрлендіру болып табылады. Термиялық босандату нәтижесінде нанотүтіктердің құрылымдарының өзгеруін зерттеу. Құрылымдық, өткізгіштік қасиеттердің тәуелділігін, сонымен қатар темір триадасы элементтерінің (Fe, Co, Ni) негізіндегі екікомпонентті нанотүтіктердің магниттік текстурасын зерттеу.

Зерттеудің міндеттері:

- Полимерлі шаблондардың қабырғаларында тұздардың сулы ерітінділерінен нанотүтіктердің біртектес массивтері түзілген біркомпонентті (Co, Cu, Zn) және екікомпонентті (Fe/Co, Fe/Ni) нанокұрылымдардың электрхимиялық синтез заңдылықтарын зерттеу;
- Синтезделген нанокұрылымдардың құрылымы мен құрамын заманауи физика-химиялық әдістермен зерттеу: энергиядисперсиялық талдау, расторлық электрондық микроскопия, рентгендік дифракция, сәуле түсіруші электрондық микроскопия, мессбауэр спектроскопия;
- ДЦ – 60 үдеткішінің мүмкіндіктерін ескере отырып нанотүтіктерді тиімді түрлендіру үшін ауыр ионды таңдау мақсатымен синтезделген нанотүтіктердің материалдарымен үдетілген ауыр иондардың әсерлесу үдерісін модельдеу;
- Co, Cu, Zn негізіндегі біркомпонентті нанотүтіктердің құрылымы мен өткізгіштік қасиеттеріне термиялық босандату және иондаушы сәулелену әсерін зерттеу;
- Синтез шарттарынан темір триадасы элементтерінің (Fe, Co, Ni) негізіндегі екікомпонентті нанотүтіктердің құрылымдық және өткізгіштік қасиеттерінің тәуелділігін зерттеу.

Қорғауға шығарылатын негізгі қағидалар:

- Тұндыру шарттарының нанотүтіктердің фазалық құрамына, құрылымына, өткізгіштік және магниттік қасиеттеріне әсерін зерттеудің нәтижелері. Электролит ерітіндісінің температурасының және (немесе) потенциалдар айырмасының артуы нанотүтіктердің қабырғаларының қалыңдығының азаюына әкеп соғатыны анықталды.
- Біркомпонентті Co, Cu, Zn нанотүтіктерінің қасиеттеріне термиялық босандатудың әсерін зерттеудің нәтижелері. Термиялық босандату уақытына тәуелді өткізгіштік қасиеттердің екі кезенді өзгеру үдерісі анықталды: бірінші кезеңде кедергінің шамалы төмендеуі байқалады, бұл құрылым ақауларының термиялық босандатуымен шартталады, екінші кезеңде құрылымда оттектік фазалардың құрылуының арқасында кедергі шұғыл өседі.
- ДЦ – 60 үдеткішінің мүмкіндіктерін ескере отырып металл нанотүтіктерінің атомдық құрылымындағы шоғырдың таралу үдерісіне модельдеу жүргізілді. Энергиясы 200 МэВ жоғары Xe^{22+} ауыр иондарын қолдану нанотүтіктердің тұла бойына құрылымдық қасиеттерінің түрлендіруін

жүргізуге мүмкіндік береді. Co, Cu және Zn нанотүтіктері үшін оларды толығымен бұзылуына алып келетін Xe^{22+} ауыр иондарымен максималды сәулелендіру мөлшері анықталған.

Алынған нәтижелердің практикалық мәні:

Әртүрлі аспектілі ара қатысты, элементтік құрамды, кристалдық құрылымды металдық бір- және екікомпонентті нанотүтіктердің электрхимиялық синтезі туралы мәліметтер нанотехнологияларды дамытуға қолданылуы мүмкін, сонымен бірге тәжірибелік жұмыста қолданылған амалдар материалтану обылындағызаманауи тенденцияларға сәйкес келеді.

Co, Cu, Zn негізіндегі металл нанокұрылымдарының термиялық өңдеу нәтижелерінің деректері, сонымен қатар босандату уақытына тәуелділігінен алынған кедергінің қисықтары нанокұрылымды материалдардың өткізгіштік қасиеттерінің жақсарту мақсатымен оларды бағытталған түрлендіру әдісін әзірлеу кезінде қолданылуы мүмкін.

Біркомпонентті нанотүтіктерге иондаушы сәулеленудің әсері болашақта наноөлшемді материалдардағы радиациялық әсер құрылуын және олардың құрылымдық және өткізгіштік қасиеттеріне әсерін, сонымен қатар олардың негізінде жасалған бұйымдардың сипаттамаларын сипаттайтын модельді әзірлеу кезінде қолданылуы мүмкін.

Диссертациялық зерттеудің нәтижелері бойынша қорытынды.

- Ядролық тректік мембраналардың қуыстарында элементтік және фазалық құрамы, геометриялық сипаттамалары белгіленген цилиндр пішінді бікомпонентті және екікомпонентті металл нанотүтіктерінің синтезі әдістері толығымен жасалған.

- Нанотүтіктердің элементтік және фазалық құрамына, құрылымдық және өткізгіштік қасиеттеріне компоненттердің электрхимиялық тұндыру шарттарына әсері анықталған. Ашып айтқанда, электролит ерітіндісінің температурасы және (немесе) потенциалдар айырмасыны өскен сайын нанотүтіктердің қабырғаларының қалыңдығы кішірейеді. Бұл ретте кристаллиттердің өлшемдерінің кішіреюі байқалады, есесіне нанотүтіктердің өткізгіштігі өседі. Екікомпонентті нанотүтіктер үшін потенциалдар айырымының өсуі қалпына келу потенциалы бар құраушының салыстырмалы мөлшері өсуіне әкелетіні көрсетілген, бұл екікомпонентті нанотүтіктердің өткізгіштік қасиеттерін анықтайды.

- ^{57}Fe ядроларында Ядролық гамма-резонанс әдісі арқылы Магниттік моменттерінде теңқтималдық бағдарлану байқалатын Fe нанотүтіктерінен ерекшеленетін, құрамында темір бар екі компонентті нанотүтіктерінің осының бойында Fe атомдарының магниттік моменттерінің басым бағыты бар магниттік текстура анықталды. Нанотүтіктердің элементтік құрамы мен Fe атомдарының бірінші координаттық сферасының атомдық құрамына тәуелділігіне темір құрамды нанотүтіктері Fe^{57} ядроларының мессбауэр спектрларының аса жұқа құрылымдарының параметрлерінің мәні анықталды.

- Біркомпонентті Co және Zn нанотүтіктерінің қасиеттеріне термиялық босандатудың әсерін зерттеудің нәтижелері. Термиялық босандату уақытына

тәуелді өткізгіштік қасиеттердің екі кезенді өзгеру үдерісі анықталды: бірінші кезеңде кедергінің шамалы төмендеуі байқалады, бұл құрылым ақауларының термиялық босандатуымен шартталады, екінші кезеңде құрылымда оттектік фазалардың құрылуының арқасында кедергі шұғыл өседі.

- ДЦ – 60 үдеткішінің мүмкіндіктерін ескере отырып металл нанотүтіктерінің атомдық құрылымындағы шоғырдың таралу үдерісіне модельдеу жүргізілді. N, C, O және Ne иондарын энергиясы 100 МэВ дейін қолдану, олардың имплантациясына әкеледі, атап айтқанда нанотүтіктердің қасиеттерін түрлендіру тереңдігі бойынша әртекті болатыны көрсетілді. Энергиясы 200 МэВ жоғары Хе⁺²² ауыр иондарын қолдану нанотүтіктердің тұла бойына құрылымдық қасиеттерінің түрлендіруін жүргізуге мүмкіндік береді. Хе²²⁺ иондарымен сәулелендіру мөлшерін $5.0E+10$ 1/см² арттыру металл нанотүтіктерінің кристалдық құрылымының бұзылуына және өткізгіштік қасиеттерінің нашарлауына әкелетіні расторлық электрондық микроскопия мен рентгенқұрылымдық талдау әдістерімен анықталды. Co, Cu және Zn нанотүтіктері үшін оларды толығымен бұзылуына алып келетін Хе⁺²² ауыр иондарымен максималды сәулелендіру мөлшері анықталған.

- Энергиясы 5 МэВ электрондық сәулелену арқылы Co, Cu и Zn нанотүтіктерінің құрылымдық және өткізгіштік қасиеттеріне бірінші рет бақыланбалы түрлендіру жүргізілді. Сәулелендірудің нәтижесінде ақаулардың электрондық босаңдауы болатыны, және оның салдарынан өткізгіштігі артса да кристаллиттердің орташа өлшемдерінің өзгермейтіні көрсетілген.

Жұмыстың мемлекеттік ғылыми бағдарламалардың жоспарымен байланысы.

Жұмыс келесі ғылыми-зерттеу бағдарламаларымен үйлестіріле жасалған:

ХҒТО-тың қолдауымен ҚР ИЖТМ АЭК Ядролық физика институтының Брукхевен ұлттық зертханасымен бірлескен «Development of scientific principles of track-etched membranes application in modern materials science» жобасы (К-2051)

Қазақстан Республикасының Білім және ғылым министрлігінің «Полиэтиленерефталатты және поликарбонатты тректік мембраналардың негізіндегі жаңа функционалды материалдарды әзірлеу, мембраналардың жаңа типтері мен түрлерін қолдану бойынша іргелі және тәжірибелік-конструкторлық зерттеулер жүргізу» ғылыми-зерттеу бағдарламасының № 561 от 07.04. 2015 г.

055 «Ғылыми және/немесе ғылыми-техникалық іс-әрекет», ішкі бағдарлама 101 «Ғылыми зерттеулерді гранттық қаржыландыру» «Полимерлі тректік мембраналардың негізінде магнитті наноматериалдарды алу» жобасы келісім шарт №45 «12» ақпан 2015 ж.

Ізденушінің жеке салымы

ПЭТФ мембраналары негізіндегі шаблонды матрицаларды химиялық өңдеу жолымен алу, сонымен қатар қуыстарының геометриясы цилиндр және асимметриялы (конус тәрізді) шаблондарды алудың оңтайлы параметрлерін таңдау, тұндырудың әртүрлі шарттарында металл наноқұрылымдарын электрхимиялық тұндыру, алынған наноқұрылымдардың құрылымдық және

өткізгіштік сипаттамаларына расторлық электрондық микроскопияны, энергиядисперсиялық және рентгенфазалық талдауларды автор Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігі Ядролық физика институтының Астаналық филиалының Қатты денелер физикасы зертханасының қызметкерлерімен бірге қолданып жасаған. Металл нанотүтіктеріндегі үдетілген иондардың өту ұзындығының теориялық есептеулерін, иондаушы сәулеленудің оңтайлы параметрлерін таңдау, сонымен қатар құрылымдық сипаттамалардың бағытталған түрлендірілуіне арналған термиялық өңдеулерді автор жеке өзі орындаған. Сонымен бірге диссертациялық зерттеудің барлық аралық және қорытынды нәтижелері диссертациялық жұмыстың ғылыми жетекшісі профессор, ф.-м.ғ.д. Қ.К.Қадыржановпен, бірлескен жетекші М.В. Ломоносов атындағы ММУ Физика факультетінің профессоры, ф.-м.ғ.д. В.С. Русаковпен, ҚР ЭМ ЯФИ АФ директоры, доцент М.В. Здоровецпен, Материалтану бойынша Беларусь ҰҒА ҒТО аға ғылыми қызметкері ф.-м.ғ.к. Е.Ю. Канюковпен талқыланған.

Жұмыстың апробациясы. Диссертациялық жұмыстың нәтижелері «INPC 2013» Ядролық және Радиациялық Физика 9-шы халықаралық конференциясында (Алматы, Қазақстан, 2013), «Ғылым және білім - 2014» Студенттер мен жас ғалымдарға арналған IX халықаралық конференциясында, (Астана, Қазақстан, 2014), «Ion implantation and other applications of ions and electrons» 10-шы халықаралық конференциясында (Казимир Дольны қ., Польша), на 19 международной конференции «Ion Beam Modification of Materials» 19-шы халықаралық конференциясында (Левен қ., Бельгия, 2014), на Международной научной конференции «Наноматериалдар мен материалтануға арналған перспективті технологиялар, құрылғылар және аналитикалық жүйелер» XII халықаралық конференциясында. ШҚТМУ, (Өскемен, Қазақстан, 2015), «Ғылым және білім - 2015» Студенттер мен жас ғалымдарға арналған X халықаралық конференциясында (Астана, Қазақстан, 2015), «Сәулеленудің қатты денемен әсерлесуі» (ВИТТ – 2015) 11-й халықаралық конференциясында (Минск қ., Беларусь, 2015), «АРСТР – VLTP JINR Joint Workshop Modern Problems of Nuclear and Elementary Particle Physics» 9-шы X халықаралық конференциясында (Алматы, Қазақстан, 2015), «Swift Heavy Ions in Matter» 9-шы X халықаралық симпозиумда, (Дармштадт қ., Германия, 2015), «Физика СПб – 2015» Халықаралық конференциясында (Санкт-Петербург қ., Ресей Федерациясы, 2015), «Жастар ғылымда - 2015» X халықаралық конференциясында (Минск қ., Беларусь Республикасы, 2015), Конденсирленген Күй Физикасы бойынша «ФКС – 2016» ПЯФИ 50-ші Мектебінде, (Гатчина, Санкт-Петербург қ., Ресей Федерациясы, 2016), «Ғылым және білім - 2016» Студенттер мен жас ғалымдарға арналған XI халықаралық конференциясында (Астана, Қазақстан, 2016), «Қатты дене физикасы» XIII халықаралық конференциясында (Астана, Қазақстан, 2016) жарияланған.

Жарияланымдар. Диссертациялық зерттеудің негізгі нәтижелері диссертация тақырыбына толығымен сәйкес 36 баспа жұмыстарында жарияланған: оның ішінде 6 мақала Scopus және Web of Science базаларына кіретін импакт-факторы нөлдік емес дәйексөзді ғылыми журналдарда, 2 патент,

11 мақала ҚР БҒМ Білім беру және ғылым саласындағы бақылау комитеті ұсынған тізбеге кіретін басылымдарда, 17 Халықаралық және Республикалық конференциялардың ғылыми жинақтарындағы тезистер мен баяндамаларға мақалалар.

Диссертацияның көлемі және құрылымы. Диссертация Кіріспеден, бес тараудан, қорытындыдан және дәйексөз алынған әдебиеттер тізімінен тұрады. Әр тараулардың қорытынды параграфтарында қысқаша нәтижелер тұжырымдалған. Диссертацияның көлемі 141 машинамен басылған беттерден тұрады, оған 75 сурет, 23 кесте және 171 әдебиет тізімі кіреді.