

**САКЕНОВА РИММА ЕРБОЛАТКЫЗЫНЫҢ**  
**«Кремний иондарымен имплантталған CrN/ZrN/Cr/Zr**  
**наноқұрылымды жабындағы диффузия және микросегрегация процестері»**  
тақырыбындағы

6D072300 – «Техникалық физика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алу үшін дайындаған диссертациясына

**АНДАТПА**

Диссертациялық жұмыс CrN/ZrN/Cr/Zr негізіндегі көпқабатты наноөлшемді нитридті жабынды кремний ионымен импланттауға дейінгі және дозасы  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ , энергиясы 60 кэВ дозалы кремний ионымен имплантталғаннан кейінгі эксперименттік және теориялық зерттеулерге арналған. Жұмыста жабынның микроқұрылымын, құрылымдық-фазалық күйін, элементтік құрамын анықтау, радиацияның әсерінен туындайтын микросегрегация мен атомдардың диффузиясын зерттеу, атомдық конфигурация процестерін зерттеуде молекулалық динамика әдісінің көмегімен теориялық есептеулер жүргізу арқылы алынған нәтижелері көрсетілген. Si иондарымен импланттау кезінде сегрегация процесіне металл атомдарының әсері, сонымен бірге, микроқұрылымды қалыптастыру, атомдардың қайта үлестірілу процесінің үйкеліс кезіндегі тозуға әсері және үйкеліс коэффициенті мен микроқаттылығын анықтауда алынған нәтижелері көрсетілген.

**Зерттеу тақырыбының өзектілігі.** Ғарышта, әуе техникасында және ядролық реакторларда жұмыс істеуге арналған заманауи құрылғыларда, механизмдер мен аппараттарда құрылымдық материалдардың бөлшектер, плазма және сәулелену ағындарына радиациялық төзімділігін, яғни жоғарғы өнімділік қасиеттерімен қатар, тозуға төзімділігін, үйкеліс коэффициентін, қаттылығын, коррозияға төзімділігін және тағы да басқа қасиеттерінің жоғары болуын талап етеді. Беттік модификация құралдар мен бұйымдардың қызмет ету мерзімін ұзартудың тиімді және үнемді шешімдерінің бірі екені белгілі. Оған қатты жабындарды қолдану арқылы оңай қол жеткізуге болады. Жабындардың қаттылығын жоғарылатудың көптеген тәсілдері түйіршіктің мөлшерін өзгерту арқылы материалдарды қатайту Холл-Петч заңына негізделген. Алайда, қатты жабындар әдетте сынғыш болып келеді және зақымдануға қарсы тұру үшін олардың тиісті иілгіштік қасиеті мен тұтқырлығын сақтау маңызды. Жабындардың көпқабатты құрамасы жарылудың қабатаралық бөлімнен төсенішке дейін таралуын болдырмауға көмектеседі, бұл басылымға шыққан көптеген жұмыстардың нәтижелерімен дәлелденген. Нитрид қабаттарын әдеттегідей ауыстырып орналастырудан басқа, көпқабатты жабынды алу тәсілін Me/MeN архитектурасы арқылы жүзеге асыруға болады, мұнда Me және MeN сәйкесінше металл және металл нитридінің қабаттары болып табылады. Қатты нитрид пен жұмсақ металл фазаларының қабаттарын алма-кезек тұндыру және ығысу модульдерінің айтарлықтай айырмашылығының болуы Me/MeN жабындарының функционалдық қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік береді. Атап айтқанда, жұмыста қатты және морт сынғыш металл нитридтерін сәйкестендіруге

болатындығы дәлелденген және салыстырмалы түрде жұмсақ металл фазаларының көпқабатты архитектурада үйлесуін қарастырғанда Келлер моделіне сәйкес әр құраманың тозуға төзімділігі жақсарған.

Сонымен қатар, иондық импланттау бетті түрлендірудің жақсы құралы болып табылатыны белгілі, оның басқа беттік өңдеу әдістерімен салыстырғанда бірқатар артықшылықтары бар. Мысалы, негізгі материалдағы қасиеттердің тұрақтылығы, беттің кедір-бұдырлығының аздығы, адгезияның жоғарылығы сияқты нәтижелерді көрсетуімен ерекшеленеді. Нәтижелі тәсілдердің бірі нитридтерге негізделген қабықша қоспаларын өндіру, олар бір қабатты және көпқабатты түрінде алынған жабынның беткі қабатының қаттылығы мен иілгіштігінің едәуір артуын қамтамасыз етеді. Үйкеліс коэффициенті төмен болып келетін тозуға төзімді жабындарға деген сұраныстың артуы нашар байланысқан нанобөлшектер мен фазалардың өзін өзі майлау қасиеттеріне негізделген нақты құрылымдық процесті қажет етеді. Жоғарыда аталған тұжырымдамамен бірге бөлшектердің қызмет ету мерзімі мен өнімділігіннің едәуір артуына қол жеткізуге болады. Сонымен, қазіргі уақытта механикалық тұрақтылықты сақтай отырып, нанокөпозиттік архитектура мен өзін-өзі майлау құрылымын құрудың жаңа әдістері қажет. Осындай әдістердің бірі – иондық импланттау. Осындай әдістердің бірі – иондық импланттау. Атап айтсақ, кремний ионымен импланттау материал бетіне жақын аймақта р-ауысуларын жасау үшін интегралды сызбаларды алуда танымал технология. Демек, жабындағы шектік кернеуді бақылау мен импланттау тереңдігінің жоғары дәлдігі керекті қоспаның таралуы мен концентрациясын алуда тиімді болып табылады. Жақында гетерокұрылымдардың конструкциясына иондық импланттау енгізілді, бұл наноөлшемді қабаттарда жаңа фазалар мен құрылымдар жасауға мүмкіндік береді. Жоғарыда аталған металдарға негізделген нитридтер туралы әдеби деректер олардың жоғары механикалық және трибологиялық қасиеттерін көрсетеді және бұл қасиеттерінің болуы жабындардың қолданылу аясын кеңейтеді. Сонымен, кесу құралының кейбір түрлерінің үйкеліс коэффициентін төмендету үшін хром нитридінен алынған жабындар белсенді қолданылғанын көреміз. Сонымен бірге, цирконий нитридінің жабындары жоғары қаттылыққа, ауада 600 °С-қа дейінгі температуралық тұрақтылыққа ие. Көпқабатты нанокөпозитті жабын құрылымындағы бұл ерекше қасиеттер жеке алынған қабаттардың қасиеттерінен әлдеқайда артық екенін көрсетеді.

**Диссертациялық жұмыстың мақсаты** CrN/ZrN/Cr/Zr көпқабатты нанокөпозитті жабындағы радиациялық-үдетілген диффузия мен микросегрегация процестерін, жабынның физикалық-механикалық қасиеттерінің оның микроқұрылымымен және элементтік құрамымен байланысын зерттеу болып табылады.

Бұл мақсатқа жету үшін төмендегідей **негізгі міндеттер** қойылды:

– Вакуумды-доғалы, ионды-плазмалық тұндыру негізіндегі CrN/ZrNCr/Zr көпқабатты нитридті жабындыларды алу әдісін әзірлеу.

– Көпқабатты наноқұрылымды жабынды энергиясы 60 кэВ, дозасы  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  кремний иондарымен импланттауға дейінгі және кейінгі оның элементтік-фазалық құрамын субқұрылымы мен бөліну шекарасын зерттеу.

– Si иондарымен импланттаудың «интерфейстердің иондық араласуына», элементтердің қайта үлестірілуіне, профильдерді қалыптастыру процестеріне әсерін бағалау және ығысқан атомдар мен бос орындардың SRIM есептеулері бойынша алынған нәтижелерімен салыстыру.

– Молекулалық динамика әдісін қолдана отырып импланттау нәтижесінде кремнийдің бөліну шекарасындағы (интерфейс) микроқұрылым мен ішкі кернеудің микросегрегация мен диффузия процесіне және механикалық қасиеттеріне әсерін бағалау үшін есептеулер жүргізу.

– Импланттауға дейінгі және одан кейінгі наноқұрылымды көпқабатты жабынның механикалық сипаттамаларын, тозуға төзімділігін, үйкеліс коэффициентін, тереңдігі бойынша қаттылығын зерттеу.

**Зерттеу нысаны** – CrN/ZrN/Cr/Zr негізіндегі жабындардың Si (60 кэВ) иондарымен импланттау нәтижесінде микроқұрылымының, құрамының, қасиеттерінің қалыптасу процестері.

**Зерттеу мәні** – импланттауға дейінгі және энергиясы 60 кэВ, дозасы  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  кремний иондарымен импланттаудан кейінгі CrN/ZrN/Cr/Zr жабынның фазалық құрамы, элементтік құрамы, микросегрегациясы, диффузиясы, стехиометриясы, термодинамикалық және механикалық қасиеттері.

**Зерттеу әдістері мен тәсілдері.** Қойылған міндеттерге сәйкес келесі талдау әдістері қолданылды: растрлы электронды микроскопия (SEM); энергия дисперсиясы бар рентгендік микроталдау (EDS); Резерфордтық кері шашырау спектроскопиясы (RBS); рентгендік дифракция (XRD); электронды диффракциясы бар жарықтандырғыш электронды микроскопия (TEM); сканерлеуші және жарықтандырғыш электронды микроскопия (STEM); жоғарғы ажыратылымдығы бар жарықтандырғыш электронды микроскопия (HRTEM); екінші реттік иондық масс-спектрометрия (SIMS); молекулалық динамика әдістері; наноқаттылықты, микроқаттылықты өлшеу және тозу мен үйкеліске арналған тестер. Көпқабатты жабындарды компьютерлік модельдеуге арналған SRIM-2008 жасақтамалық бағдарламасы.

#### **Жұмыстың ғылыми жаңашылдығы:**

– Вакуумды-доғалы ионды-плазмалық тұндыруға негізделген CrN/ZrN/Cr/Zr көпқабатты нитридті жабындарды алу әдісі алғаш рет жасалды.

– Көпқабатты наноқұрылымды жабынды иондық импланттау кезінде оның еркін жүру жолының 150 нм-ді құрайтын тереңдігінде ең жоғарғы концентрациясы 10 ат.% және төменгісі 6 ат.% болатын Si иондарының үлестірілу ерекшеліктері алғаш рет анықталды.

– Көпқабатты жабынды Si иондарымен импланттау кезінде атомдық соқтығысу процестерінің нәтижесінде ZrN (жайылған) қабатының қалыңдығы (25÷26) нм-ден 36 нм-ге дейін артады және бәсекелес диффузия мен микросегрегация процестері CrN/ZrN/CrN жабынның алғашқы үш қабатының

интерфейс шекарасында кремнийдің қосдөнес пішінді үлестірілуін қалыптастырады.

– Si иондарымен көпқабатты жабынды импланттағанда алғашқы үш қабатта түзілген өлшемі аз силиконитридтердің түзілу нәтижесінде бөліну шекарасының маңында үйкеліс коэффициенті 0,40-тен 0,18-ге дейін төмендегені анықталды.

#### **Қорғауға шығарылатын негізгі қағидалар:**

1 CrN/ZrN/Cr/Zr композицияларына негізделген жабындарды дайындау әдісі бойынша алынған наноөлшемді көпқабатты жабындардың микроқұрылымы мен элементтік құрамын зерттеу нәтижелері.

2 Көпқабатты наноқұрылымды CrN/ZrN/CrN жабындарының алғашқы 3 қабатының тереңдігі бойынша кремениймен байытылған, яғни бөліну шекарасына жақын маңда кремнийдің ең жоғары 10 ат.%, ал CrN қабатының орта тұсында 6 ат.% болатын концентрацияның қосдөнес формалы таралуының қалыптасу заңдылықтары.

3 Энергиясы 60 кэВ, дозасы  $1 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$  Si иондарымен импланттау кезінде CrSi және SiN<sub>x</sub> бөлшектерінің түзілу нәтижесінде олардың үйкеліс процесінде майлаушы қызметін атқаруы салдарынан үйкеліс коэффициенті 0,40-тан 0,18-ге дейін төмендейді.

#### **Жұмыстың ғылыми және практикалық маңыздылығы.**

Диссертациялық жұмыс техникалық физика мен материалтану саласындағы іргелі мәселелерге, атап айтқанда иондардың көпқабатты құрылым ішінде өзара әрекеттесуі, хром нитридінің қабаттарының бөліну шекарасында кремний тудырған микросегрегация, сонымен қатар екі процестегі кремний атомдарының сегрегациясы мен диффузиясының бәсекелестігі, қабат микроқұрылымның өзгеруі және сәйкесінше көпқабатты наноқұрылымды жабындардың механикалық сипаттамаларының өзгеру заңдылықтарын зерттеуге арналған. «Қатты жабындыны вакуумды-доғалық ионды-плазмалық тұндыру тәсілі» атты өнертабысқа патент алынды, ҚР ӘМ «Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК, №34722, бюллетень 20.11.2020 жыл. Диссертациялық жұмыстың нәтижелерін оқу процесіне енгізу актілері және «Машзауыт» ЖШС болашақ жобаларында қолдану үшін экономикалық қаражатсыз өндіріске енгізу актісі алынды.

**Диссертациялық жұмыс тақырыбының ғылыми-зерттеу жобаларымен байланысы.** Диссертациялық жұмыс «Д.Серікбаев атындағы ШҚТУ» КЕАҚ, «С.Аманжолов атындағы ШҚУ» КЕАҚ және Сумы мемлекеттік университетінде гранттық қаржыландырудың келесі мемлекеттік бюджеттік жобаларын іске асыру аясында жүргізілді:

1 «Машина жасау бұйымдарына арналған тозуға төзімді материалдар алудың инновациялық технологияларын зерттеу және әзірлеу» тақырыбы бойынша, мемлекеттік тіркеу №0118РК00989, №197 16.03.2018 жылдан басталған келісім шартпен, Қазақстан Республикасы, Білім және Ғылым министрлігінің Ғылым комитетінің қаржыландыруымен.

2 «Үйкеліс пен тозудан қорғауға арналған өзгермелі архитектурасы бар нанометрлі масштабтағы көпкомпонентті және көпэлементті жабындар»

тақырыбы бойынша, мемлекеттік тіркеу №AP05130362, №104, 05.04.2018 жылдан басталған келісім шартпен, Қазақстан Республикасы, Білім және Ғылым министрлігінің Ғылым комитетінің қаржыландыруымен.

**Автордың жеке үлесі.** Автор зерттеу тақырыбы бойынша әдеби деректерге шолу жасады, эксперименттік жұмыстардың негізгі бөлігін орындады, алынған нәтижелер бойынша мақалалар жазды және алынған нәтижелерді конференцияларда баяндады. Ғылыми кеңесшілермен бірге зерттеудің мақсаттары мен міндеттері анықталды. Жабындарға энергиясы бойынша дисперсиясы бар рентгендік микроталдаулар жүргізуге, сканерлеу мен жарықтандырғыш электронды микроскоппен зерттеулер жүргізуге және оны талдауға, сонымен бірге микроқаттылығы мен наноқаттылығын өлшеу бойынша жұмыстарды жүргізуге көмек көрсетті.

**Жұмыста алынған нәтижелер мен жасалған қорытындылардың сенімділік деңгейі және түсіндірмесі.** Қазіргі заманғы талдау әдістері бойынша Қазақстан мен Украинаның жетекші ғылыми орталықтарында SEM, HRTEM, STEM, RBS және ионмен сәулелендіру, SIMS, TEM, XRD, EDS және теріс зарядталған иондары бар жоғары дәлдіктегі имплантердің бірегей жабдықтарымен зерттеулер жүргізу, сондай-ақ алынған нәтижелерді шетелдік зертханаларда алынған әдеби деректердің кейбір үзінділерімен салыстыра отырып, растау жұмыстары жүргізілді.

**Диссертациялық жұмыстың апробациясы.** Диссертациялық жұмыстың материалдары ғылыми конференцияларда баяндалды және талқыланды:

1. 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP 2017), Одесса, Украина, 2017;

2. 8th International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP-2018), Затока, Украина, 2018;

3. «Уәлиев оқулары-2018»: «Қазіргі замандағы ғылым және білімнің дамуындағы тенденциялар» атты халықаралық ғылыми-тәжірилік конференция, С.Аманжолов атындағы ШҚМУ, Өскемен қ., 2018;

4. «Жастар шығармашылығы – Қазақстанның инновациялық дамуына» атты студенттердің, магистранттардың және жас ғалымдардың VI Халықаралық ғылыми-техникалық конференциясы. Д.Серікбаев атындағы ШҚМТУ, Өскемен қ. 2020;

5. «Энергия және ресурстар үнемдеу технологиялары: тәжірибелер және келешегі» атты II Халықаралық ғылыми-тәжірибелік online конференция материалдары. Қызылорда: Қорқыт Ата атындағы Қызылорда мемлекеттік университеті, 2020.

6. Advanced materials manufacturing and research: new technologies and techniques (AMM&R2021) international conference to be hosted virtually by D.Serikbayev East Kazakhstan technical university, 2021.

Негізгі нәтижелер, «Д.Серікбаев атындағы ШҚТУ» КЕАҚ базалық инженерлік дайындық факультетінің және Сумы мемлекеттік университетінің «Наноэлектроника» кафедрасының семинарларында баяндалып, талқыланды (мамыр, 2018 жыл).

**Мақалалар.** Диссертация тақырыбы бойынша барлығы 14 ғылыми мақала, оның ішінде 6 мақала ҚР БЖҒ министрлігінің білім беру және ғылым саласындағы бақылау Комитеті бекіткен ғылыми жарияланымдарда, сонымен бірге, 2 мақала Web of Science Core Collection және Scopus халықаралық ақпараттық ресурстарына кіретін шетелдік ғылыми журналдарда жарияланған, журналдағы мақала квантилдері – Q2 және Q1, импакт факторлары – 4,65 және 8,758, 6 мақала халықаралық конференция материалдарының жинақтарында, оның ішінде 2-і шетелдік халықаралық конференция материалдарының жиынтығында жарық көрді, өнертабысқа 1 патент алынды.

**Диссертациялық жұмыстың құрылымы мен көлемі.** Диссертация кіріспеден, төрт тараудан, қорытынды мен пайдаланылған әдебиеттер тізімінен тұрады, барлығы 129 бет, 48 сурет, 8 кесте, 165 қолданылған әдебиеттер тізімі.