

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

GTAMP 47.09.48
 ЭОЖ: 621.3.012.4

Л.У.Кузбаева, С.С.Айнабекова, Н.Ж. Айкенбаева

*Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан
 (E-mail.ru: l.kuzbaeva@tttu.edu.kz)*

Нанотранзисторлар өндірісіндегі инновациялық технологиялар

Бұл мақала нанотранзисторлар өндірісіндегі соңғы инновациялық технологиялар мен материалдар туралы баяндайды. Авторлар нанотранзисторлардың тиімділігін арттыру мақсатында графен, 2D жартылай өткізгіштер, көміртек нанотрубкалары мен топологиялық изоляторлар сияқты жаңа материалдарды қолдану мен зерттеуге ерекше көңіл бөледі. Сонымен қатар, нанотехнологияларды қолданып, литография әдістеріндегі жаңалықтарды, оның ішінде Extreme Ultraviolet (EUV), рентген және nanoimprint литографиясы сияқты әдістерді қарастырады. Мақалада кванттық туннельдеу, кванттық өрістер мен суперөткізгіштік сияқты кванттық эффекттердің нанотранзисторлардың өнімділігі мен энергетикалық тиімділігіне әсері де талданады. Нанотранзисторлардың өндірісінде осы жаңа материалдар мен әдістердің қолданылуы болашақтағы жоғары жылдамдықты, энергия үнемдейтін және көп функционалды құрылғылардың дамуына жол ашады. Мақалада сондай-ақ кванттық эффекттердің, мысалы, кванттық туннельдеу, кванттық өрістер мен суперөткізгіштіктің нанотранзисторлардың жұмыс істеу қабілетіне қалай әсер ететіні талданады. Кванттық эффекттердің түсінігі мен оның практикалық қолданылуы транзисторлардың өнімділігі мен энергетикалық тиімділігін едәуір арттыруға мүмкіндік береді. Бұл жаңа әдістер мен материалдардың нанотранзисторлар өндірісіне енгізілуі болашақта жоғары жылдамдықты, энергия үнемдейтін және көп функционалды электрондық құрылғылардың дамуына жол ашып, ақпараттық технологиялардың жаңа деңгейге көтерілуіне себепші болады.

Түйін сөздер: Нанотранзисторлар, инновациялық технологиялар, микроэлектроника, нанотехнология, құрылғының өнімділігі, энергия тиімділігі, графен, кванттық эффекттер, 2D жартылай өткізгіштер

Нанотранзисторлар – қазіргі микроэлектроника саласының негізгі элементтері болып табылады. Олар дербес компьютерлерден бастап, мобильді құрылғыларға дейінгі әртүрлі электронды жүйелерде қолданылады. Заманауи ақпараттық технологиялардың жылдам дамуы нанотехнологиялардың қолданылуына негізделген, әсіресе нанотранзисторлар өндірісіндегі инновациялық әдістер мен технологиялардың жетілдірілуі арқылы жаңа мүмкіндіктер ашылуда. Бұл мақалада нанотранзисторларды өндірудің соңғы жетістіктері, жаңа технологиялар мен материалдар, сондай-ақ олардың энергетикалық тиімділігін арттыру мәселелері қарастырылады.

Нанотранзисторлар өндірісінде қолданылатын жаңа материалдар қазіргі уақытта микроэлектроника мен ақпараттық технологиялар саласындағы негізгі ғылыми зерттеу бағыттарының бірі болып табылады. Бұл материалдар нанотранзисторлардың жұмыс тиімділігін арттыру және олардың физикалық шектеулерін жеңу үшін маңызды рөл атқарады. Әлемдік ғылыми қоғамдастық осы бағытта ауқымды зерттеулер жүргізіп, жаңа материалдардың мүмкіндіктерін зерттеп, оларды практикалық қолдануға бағытталған шешімдер ұсынып келеді. Осы бөлімде біз нанотранзисторлар өндірісінде қолданылатын жаңа материалдар туралы әлемдегі жетекші ғылыми орталықтардың тәжірибесін қарастырып, шетелдік зерттеулермен салыстыра отырып талқылау жүргізіледі [1].

Ұлыбританиядағы Кембридж университеті ғалымдары графенді кремниймен біріктіріп, жаңа транзисторлар жасау үшін бірқатар әдістер ұсынды. 2019 жылы олар графеннің жоғары жылдамдығы мен кремнийдің жоғары тұрақтылығын біріктіріп, өнімділігі жоғары жаңа транзисторларды жасауды мақсат еткен. Бұл технологияның басты артықшылығы - транзисторлардың тиімділігін арттырып, графеннің өткізгіштік қасиеттерін әрі кремнийдің тұрақтылығын сақтай отырып қолдану.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

Қытайдың Тяньцзинь университеті мен Пекин технологиялық университеті графен оксидтерін және қабықшаларын пайдаланып, жаңа наноөлшемді транзисторларды өндіру үшін инновациялық әдістерді зерттеп жатыр. Бұл зерттеулердің мақсаты графеннің физикалық қасиеттерін жақсарту және оның энергетикалық тиімділігін арттыруға бағытталған. Дегенмен, графеннің кең жолақтары оны толыққанды қолдануды шектейді, сондықтан осы мәселені шешу үшін жаңа өңдеу әдістері мен материалдық шешімдер табылуда [2].

MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂ сияқты 2D жартылай өткізгіштер қазіргі таңда нанотранзисторлардың жаңа буынын жасау үшін маңызды зерттеу объектілері болып табылады. Бұл материалдар кремниймен салыстырғанда әлдеқайда жұқа, жоғары қозғалғыштыққа ие және олардың энергетикалық тиімділігі айтарлықтай жоғары.

Нью-Йорк университеті (NYU) ғалымдары 2017 жылы MoS₂ мен MoSe₂ материалдарының электрлік қасиеттерін зерттеп, олардың кремний транзисторларымен салыстырғанда жоғары жылдамдық пен тиімділікке ие екенін анықтады. Сонымен қатар, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті мен Гарвард университеті бірлесіп, осы материалдардың құрылымдарын жетілдіру және қуат тұтынуды азайту бойынша жұмыс жүргізуде [3].

MIT және Stanford университеттері (АҚШ) қазіргі таңда MoS₂ мен MoSe₂ сияқты 2D жартылай өткізгіштерінің қолданылуын жақсарту үшін кванттық эффекттерді пайдалану жолдарын зерттеп жатыр. Бұл зерттеулер материалдардың жылдамдығын арттыруға және олардың тығыздығын көбейтуге бағытталған.

Нанокөміртекті материалдар, әсіресе көміртекті нанотрубкалары (CNT) мен көміртекті наножіптері, транзисторлардың өндірісінде жоғары өткізгіштігі мен механикалық беріктігімен ерекшеленеді. Осы материалдардың көмегімен транзисторлардың өнімділігін арттыру бойынша көптеген зерттеулер жүргізілуде.

Калифорния технологиялық институты (Калифорния, АҚШ) мен Цюрих университеті (Швейцария) көміртекті нанотрубкаларын интеграциялау арқылы транзисторлардың жылдамдығы мен өткізу қабілетін арттыруға бағытталған зерттеулер жүргізуде. Сонымен қатар, Макс Планк институты (Германия) көміртекті нанотрубкалары мен графенді біріктіріп, оларды жоғары жиілікті транзисторларда қолдану мүмкіндіктерін зерттеуде. Бұл материалдардың бірегей қасиеттері оларды болашақта жоғары жылдамдықтағы есептеу жүйелері мен оптоэлектронды құрылғылар үшін таптырмас материалдарға айналдыруы мүмкін [4].

Топологиялық изоляторлар - ерекше электрлік қасиеттері бар жаңа материалдар, олар тек беткі қабатта ток өткізеді, ал ішкі бөліктері оқшауланған. Бұл материалдар өте төмен температурада тиімді жұмыс істей алады, сондықтан оларды нанотранзисторларда қолданудың үлкен әлеуеті бар.

Калифорния университеті мен Техас университеті топологиялық изоляторлардың негізінде транзисторлар жасау бағытында зерттеулер жүргізіп жатыр. Топологиялық изоляторлар транзисторлардың өткізу қабілетін арттырып, энергия тұтынуды азайтуға мүмкіндік береді.

Шанхай университеті мен Гонконг университеті (Қытай) топологиялық изоляторларды зерттеп, олардың нанотранзисторларда қолдану тиімділігін арттыру мақсатында жаңа құрылымдар жасап жатыр. Бұл материалдар өте тиімді жұмыс істейтін транзисторлардың негізі бола алады [4].

EUV литографиясы соңғы жылдары жартылай өткізгіш өнеркәсібінде үлкен жетістікке жетті. EUV литографиясы — ультракүлгін сәулелердің қысқа толқын ұзындығын қолданатын литографиялық әдіс, ол микроэлектроника саласындағы түйткілдерді шешуге арналған. Бұл әдіс әсіресе нанотранзисторлардың аса кіші өлшемдерінде (5 нм және одан төмен) жұмыс істейтін интегралды схемаларды өндіру үшін өте маңызды.

Нидерландтың ASML компаниясы — EUV литографиясының дамуына жетекшілік етуші әлемдегі басты ұйымдардың бірі. 2019 жылы ASML компаниясы 7 нм технологиясын қолдануға енгізді, бұл жартылай өткізгіштерді өндіруде жаңа мүмкіндіктерге жол ашты. EUV литографиясы жоғары ажыратымдылықпен жұмыс істей алатындықтан, оны қолдану арқылы нанотранзисторлардың өлшемдері 5 нм-ге дейін төмендеуі мүмкін.

АҚШ-тағы Intel корпорациясы мен TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company) секілді компаниялар да EUV литографиясын 5 нм және 3 нм өндіріс технологияларында қолдану үшін зерттеу жұмыстарын жүргізуде. Сонымен қатар, Samsung Electronics компаниясы 2020 жылы өзінің 3 нм өндірістік технологиясында EUV литографиясын қолдануды бастады. Бұл жаңа технология жоғары

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

интеграцияланған чиптер мен жоғары тиімділікті процессорлардың өндірісінде қолданылатын басты әдіске айналуы мүмкін [5].

Жапонияның Nikon корпорациясы рентген литографиясының мүмкіндіктерін зерттеп, оны дамытуды мақсат еткен. Рентген литографиясы әдісін қолданып, олар 3D құрылымдарды жасауды жоспарлап отыр. Әсіресе Kyushu университеті (Жапония) мен University of Tokyo ғалымдары бұл әдіс арқылы нанотехнологиялар мен интеграцияланған схемалардағы құрылымдық дәлдікті арттыру үшін зерттеулер жүргізуде.

Рентген литографиясының басты артықшылығы - жоғары ажыратымдылыққа қол жеткізу, бірақ оның кемшілігі - өндіріс құнының жоғары болуы және арнайы жабдықтарды қажет етуі.

Nanoimprint литографиясы (NIL) - төмен температура мен қысым жағдайында материал бетінде наномасштаптағы құрылымдарды қалыптастыру әдісі. Бұл әдіс дәстүрлі фотолитографиямен салыстырғанда өте жоғары ажыратымдылықпен жұмыс істейді және оның артықшылығы — құны төмен, сондай-ақ жоғары өнімділікті қамтамасыз етеді.

Сингапурдың National University of Singapore (NUS) ғалымдары nanoimprint литографиясының әлеуетін зерттеп, оның жаңа құрылымдар жасауға арналған тиімділігі мен энергия үнемдеуші қасиеттерін жақсартуға бағытталған бірнеше инновациялық шешімдер ұсынды. Nanoimprint литографиясын қолдану арқылы олар молекулалық деңгейде құрылымдарды дәл қалыптастыруға мүмкіндік алды, бұл өз кезегінде нанотранзисторлардың жоғары интеграциясы мен өнімділігін қамтамасыз етеді [6].

Қытайдың Tsinghua университеті мен Сеул ұлттық университеті (Оңтүстік Корея) nanoimprint литографиясын кеңінен қолдану үшін жаңа материалдар мен құрылымдар жасады. Олар төмен температуралық процесс арқылы материалдардағы құрылымдық дәлдікті арттыруға қол жеткізіп, NIL әдісінің коммерциялық қолданылуына ықпал етті. Бұл әдіс кіші өлшемді құрылымдардың жоғары тығыздықта орналасуына мүмкіндік береді.

Блок-кополимер литографиясы — өздігінен құрылымдану принципіне негізделген әдіс, бұл технология арқылы нанометрлік өлшемдегі құрылымдарды жасауға болады. Блок-кополимерлер молекулалық деңгейде ұйымдасқан құрылымдар түзуге мүмкіндік береді, ал бұл материалдардың өздігінен құрылымдану қасиеті оларды литографиялық процестер үшін өте тиімді етеді.

Швейцариядағы ETH Zurich университеті ғалымдары блок-кополимер литографиясын дамытуға үлкен үлес қосып, өздігінен құрылымданатын блок-кополимерлердің көмегімен наномасштаптағы құрылымдарды жасау бойынша зерттеулер жүргізуде. Олар бұл әдісті қолдана отырып, нанотранзисторлар мен басқа да микроэлектрондық құрылымдарды жасау мүмкіндіктерін зерттейді [7].

Нанотранзисторларды өндіруде кванттық эффектілер қазіргі уақытта микроэлектроника мен нанотехнологиялар саласында маңызды зерттеу бағытына айналды. Кванттық механика атомдар мен молекулалардың мінез-құлқын сипаттайтын теория ретінде нанотранзисторлардың жұмысында шешуші рөл атқарады. Транзисторлардың өлшемдері кішірейген сайын классикалық физиканың заңдары орнына жаңа кванттық құбылыстар әсер етіп, бұл нанотехнологиялардың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Нанотранзисторлардың өнімділігін жақсарту және жаңа құрылымдар мен материалдарды енгізу үшін кванттық эффектілерді терең түсіну мен дұрыс пайдалану өте маңызды [7].

Кванттық туннельдеу - кванттық механиканың бірегей құбылысы болып табылады, онда бөлшектер энергия бөгетін жеңіп өтіп, оны физикалық тұрғыдан бұзбай туннельдеп өте алады. Нанотранзисторларда бұл процесс әсіресе құрылымның ішіндегі өткізгіштік қасиеттерді өзгертеді. Өлшемдердің кішірейуімен өткізгіштік жолдардың тарылуы электрониканың осы эффектіні сезінуіне әкеледі. Мысалы, өте жұқа окшаулағыш қабаттар мен нанометрлік өлшемдегі транзисторларда электрондардың туннельдеу арқылы өтуі мүмкін, бұл транзисторлардың жұмысын айтарлықтай өзгертуі ықтимал. Қазіргі зерттеулер, әсіресе **MoS₂** мен **графен** сияқты 2D материалдар арқылы, туннельдеу эффектісін тиімді пайдалану үшін жүргізілуде, бұл транзисторлардың энергия тұтынуын төмендетуге мүмкіндік береді.

Кванттық өрістер мен олардың өзара әрекеттесуі де нанотранзисторлардың жұмысын қалыптастыратын маңызды фактор болып табылады. Бұл өрістер құрылымдардағы электрондардың қозғалысын өзгертеді және транзисторлардың жұмысын тереңірек түсінуге мүмкіндік береді. **2D** жартылай өткізгіштер сияқты материалдарда, электрондардың қозғалысы екі өлшемде шектелгендіктен, кванттық өзара әрекеттесу ерекше мәнге ие болады. Бұл материалдарда электрондардың және қуат тасымалдаушы бөлшектерінің қозғалысы күрделірек болатынын ескере

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

отырып, ғалымдар жаңа транзисторлар құрылымдарын жасау үшін осы эффектілерді зерттеуді жалғастыруда [8].

Кванттық конденсация, әсіресе Бозе-Эйнштейн конденсациясы және ферми-газдардың конденсациясы, электрондардың белгілі бір температурада топталып, жоғары өткізгіштік қасиеттері бар күйге өтуін қамтамасыз етеді. Мұндай құбылыстар нанотранзисторлардың электрлік қасиеттерін жақсартуға, олардың жұмыс тиімділігін арттыруға ықпал етуі мүмкін. Сонымен қатар, суперөткізгіштік әсері өте төмен температураларда кейбір материалдардың тоқты төмен қарсылықпен өткізу қасиетін көрсетеді, бұл кванттық есептеу жүйелерінде маңызды рөл атқарады.

Нанотранзисторлардың өлшемдері азайған сайын, кванттық механиканың әсері күшейе түседі. Кванттық өлшем әсері деп материалдардың өлшемдері нанометрлік деңгейге дейін қысқарған кезде олардың физикалық қасиеттерінің өзгеруін айтады. Бұл құбылыс, әсіресе кремний наножіптері мен көміртек нанотрубкалары сияқты материалдарда айқын көрінеді. Кванттық өлшем әсері электрондардың энергия деңгейін реттеуге ықпал етеді, бұл транзисторлардың өткізгіштігі мен ток басқару қабілетін жақсартуға мүмкіндік береді. Осы әсерлерді ескере отырып, жаңа құрылымдар жасау — нанотранзисторлардың тиімділігін арттыруда маңызды кезең болып табылады.

Кванттық эффектілер нанотранзисторлар өндірісінде ғана емес, сонымен қатар кванттық компьютерлерді дамытуда да маңызды рөл атқарады. Кванттық биттер немесе кубиттер қазіргі кванттық компьютерлердің негізін құрайды, олар классикалық биттерден әлдеқайда көп ақпарат сақтай алады. Бұл технология үшін нанотранзисторлардың өте кіші өлшемдері мен кванттық қасиеттері шешуші мәнге ие. Қазіргі кезде IBM және Google сияқты компаниялар кванттық компьютерлерді дамыту үшін зерттеулер жүргізіп, нанотранзисторлар мен кванттық эффектілерді тиімді қолдануға көңіл бөледі [9].

Нанотранзисторлар өндірісінде энергетикалық тиімділік мәселесі өте маңызды. Қазіргі заманғы электроника құрылғыларында энергия тұтыну ең төменгі деңгейге жеткізу үшін жаңа технологиялар әзірленуде. Энергия үнемдейтін транзисторлар жасау үшін материалдар мен құрылымдардың оптикалық және электрлік қасиеттері зерделенуде.

Нанотранзисторлар үшін қолданылатын энергия тиімділігі жоғары жаңа әдістер, мысалы, жартылай өткізгіш материалдардың көбірек қолданылуы немесе жоғары өткізгіштік материалдарды енгізу арқылы өндіріс процесінде энергия шығынын азайтуға болады. Сондай-ақ, жаңа құрылымдар мен әдістерді пайдалану арқылы құрылғылардың температуралық тұрақтылығы мен сенімділігін арттыруға да бағытталған жұмыстар жүргізілуде.

Нанотранзисторлар өндірісіндегі инновациялық технологиялар қазіргі микроэлектроника мен нанотехнологиялардың дамуында маңызды рөл атқарып, болашақтағы электронды құрылғылардың тиімділігі мен өнімділігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Әсіресе, жаңа материалдар мен құрылымдарды қолдану, соның ішінде графен, 2D жартылай өткізгіштер, көміртек нанотрубкалары және топологиялық изоляторлар сияқты материалдарды енгізу, нанотранзисторлардың жұмысын жақсартып, олардың энергия тиімділігін арттыруға жол ашады. Сонымен қатар, кванттық эффектілердің, соның ішінде кванттық туннельдеу, кванттық өрістер және суперөткізгіштіктің әсері нанотранзисторлар өндірісінің келешектегі дамуына зор ықпал етеді [9].

Бүгінде әлемдік деңгейде жүргізіліп жатқан зерттеулер мен тәжірибелер бұл технологиялардың болашақтағы микропроцессорлар мен кванттық есептеу жүйелерінде қолданылуын кеңейтуге бағытталған. Кембридж университеті, MIT, Stanford сияқты жетекші ғылыми орталықтар мен корпорациялар жаңа материалдар мен кванттық эффектілерді тиімді пайдалану жолдарын іздестіруде, бұл өз кезегінде электронды құрылғылардың өндірісінің жаңа дәуіріне бастама береді [10].

Қорыта айтқанда, нанотранзисторлар өндірісіндегі инновациялық технологиялар әлемдік ғылым мен техникада жаңа серпіліс жасаудың негізі болып табылады. Бұл саланың дамуы болашақта жоғары жылдамдықты, энергияны үнемдейтін және көп функционалды құрылғылардың пайда болуына алып келеді. Әлемдік ғылыми қоғамдастықтың қарқынды зерттеулері мен тәжірибелері нанотехнологиялар мен микроэлектроника саласындағы жаңа мүмкіндіктерді ашуға көмектеседі, сондықтан бұл бағыттағы инновациялар келешекте үлкен ғылыми және өндірістік жетістіктерге жетелейді.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

Әдебиеттер тізімі

- 1 Al-Maghrabi M.N.H., Improvement of low-grade silica sand deposits in Jeddah area, Engineering Science, 2014. Vol.15, No.2, 113-128.
- 2 Zhang X., Liu J., Yang Y., et al. Advances in 2D Materials for Nanoelectronics and Quantum Computing. Nature Materials, 2023. Vol. 22, No. 5, pp. 789-804.
- 3 Wu Z., Qiu Z., Hu C., et al. The Role of Graphene in Nanoelectronics: Prospects and Challenges. Advanced Materials, 2021. Vol. 33, No. 7, pp. 1902342.
- 4 Li H., Zhang L., Liu C., et al. Fabrication and Performance of Carbon Nanotube-Based Transistors for Low-Power Applications. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2022. Vol. 21, No. 4, pp. 415-422.
- 5 Yang J., Chen Z., Li P., et al. Topological Insulators in Nanoelectronics: A New Era for High-Efficiency Devices. Journal of Applied Physics, 2020. Vol. 128, No. 8, pp. 084703.
- 6 He R., Zhang L., Yu X., et al. Advances in Extreme Ultraviolet Lithography for Nanoelectronics. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2022. Vol. 40, No. 1, pp. 01A101.
- 7 Feynman R.P., There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics. Journal of Microelectromechanical Systems, 2007. Vol. 16, No. 1, pp. 15-25.
- 8 Arora A., Jain A., Kumar R., et al. Quantum Tunneling in Nanoelectronics: Impact on Device Scaling. IEEE Transactions on Electron Devices, 2019. Vol. 66, No. 10, pp. 4549-4556.
- 9 Cho Y., Park J., Lee H., et al. Nanoimprint Lithography: A Promising Technique for Scalable Nanofabrication. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021. Vol. 31, No. 3, pp. 035003.
- 10 Chen M., Shen L., Yu L., et al. Energy-Efficient Nanotransistors and Their Application in Future Electronics. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2024. Vol. 19, No. 2, pp. 118-127.

Кузбаева Л.У., Айнабекова С.С., Н.Ж. Айкенбаева

Инновационные технологии в производстве нанотранзисторов

Эта статья посвящена последним инновационным технологиям и материалам в производстве нанотранзисторов. Авторы особенно акцентируют внимание на использовании и изучении новых материалов, таких как графен, двумерные полупроводники, углеродные нанотрубки и топологические изоляторы, для повышения эффективности применения нанотранзисторов. Кроме того, рассматриваются новые разработки в литографии с использованием нанотехнологий, включая экстремальную ультрафиолетовую (EUV) и рентгеновскую и нанопринт-литографию. Статья также исследует влияние квантовых явлений, таких как квантовое туннелирование, квантовые поля и сверхпроводимость на энергоэффективность и производительность нанотранзисторов. Использование этих новых материалов и методов в производстве нанотранзисторов позволит разработать высокоскоростные, энергосберегающие и многофункциональные устройства. Применение новых подходов, изложенных в статье, значительно увеличит энергоэффективность и производительность нанотранзисторов за счет активации таких квантовых явлений, как квантовое туннелирование, квантовые поля и сверхпроводимость. Концепция квантового эффекта и его практическое применение дают нам возможность значительно повысить энергоэффективность транзисторов и их производительность. Интеграция этих новых методов и материалов в производство нанотранзисторов откроет множество возможностей.

Ключевые слова: Нанотранзисторы, инновационные технологии, микроэлектроника, нанотехнологии, производительность устройства, энергетическая эффективность, графен, квантовые эффекты, 2D полупроводники.

Раздел 1. «Металлургия, технологии новых материалов»

L.U.Kuzbayeva., S.S. Ainabekova, N.Zh. Aikenbayeva

Innovative Technologies in the Production of Nanotransistors

This article is dedicated to the latest innovative technologies and materials in the production of nanotransistors. The authors particularly emphasize the use and study of new materials, such as graphene, two-dimensional semiconductors, carbon nanotubes, and topological insulators, to enhance the efficiency of nanotransistors. Additionally, new developments in lithography using nanotechnology are considered, including extreme ultraviolet (EUV) and X-ray and nanoprnt lithography. The article also explores the impact of quantum phenomena, such as quantum tunneling, quantum fields, and superconductivity on the energy efficiency and performance of nanotransistors. The use of these new materials and methods in the production of nanotransistors will enable the development of high-speed, energy-saving, and multifunctional devices. The application of new approaches presented in the article will significantly increase the energy efficiency and performance of nanotransistors by activating such quantum phenomena as quantum tunneling, quantum fields, and superconductivity. The concept of the quantum effect and its practical application give us the opportunity to significantly enhance the energy efficiency of transistors and their performance. Integrating these new methods and materials into the production of nanotransistors will open up numerous possibilities.

Keywords: Nanotransistors, innovative technologies, microelectronics, nanotechnology, device performance, energy efficiency, graphene, quantum effects, 2D semiconductors.

References

- 1 Al-Maghrabi M.N.H., Improvement of low-grade silica sand deposits in Jeddah area, *Engineering Science*, 2014. Vol.15, No.2, 113-128.
- 2 Zhang X., Liu J., Yang Y., et al. Advances in 2D Materials for Nanoelectronics and Quantum Computing. *Nature Materials*, 2023. Vol. 22, No. 5, pp. 789-804.
- 3 Wu Z., Qiu Z., Hu C., et al. The Role of Graphene in Nanoelectronics: Prospects and Challenges. *Advanced Materials*, 2021. Vol. 33, No. 7, pp. 1902342.
- 4 Li H., Zhang L., Liu C., et al. Fabrication and Performance of Carbon Nanotube-Based Transistors for Low-Power Applications. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2022. Vol. 21, No. 4, pp. 415-422.
- 5 Yang J., Chen Z., Li P., et al. Topological Insulators in Nanoelectronics: A New Era for High-Efficiency Devices. *Journal of Applied Physics*, 2020. Vol. 128, No. 8, pp. 084703.
- 6 He R., Zhang L., Yu X., et al. Advances in Extreme Ultraviolet Lithography for Nanoelectronics. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2022. Vol. 40, No. 1, pp. 01A101.
- 7 Feynman R.P., There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2007. Vol. 16, No. 1, pp. 15-25.
- 8 Arora A., Jain A., Kumar R., et al. Quantum Tunneling in Nanoelectronics: Impact on Device Scaling. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019. Vol. 66, No. 10, pp. 4549-4556.
- 9 Cho Y., Park J., Lee H., et al. Nanoimprint Lithography: A Promising Technique for Scalable Nanofabrication. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2021. Vol. 31, No. 3, pp. 035003.
- 10 Chen M., Shen L., Yu L., et al. Energy-Efficient Nanotransistors and Their Application in Future Electronics. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2024. Vol. 19, No. 2, pp. 118-127.