АННОТАЦИЯ

«6D072300 – Техникалық физика» мамандығы бойынша философия докторы (PhD) дәрежесін алуға ұсынылған диссертация

ЖАҚЫПОВ ӘЛІБЕК СЕРІКҰЛЫ

Модификацияланған GST қабықшаларына негізделген ақпаратты оптикалық және электрлік жазуға арналған энергияға тәуелсіз жад элементтері

Жұмыстың жалпы сипаттамасы. Диссертациялық жұмыс $Ge_2Sb_2Te_5$ негізіндегі күміспен модификацияланған функционалдық қабаттан жасалған оптикалық және электрлік ақпарат жазуға арналған энергияға тәуелсіз жады элементтерін эксперименттік зерттеуге арналған.

Зерттеудің өзектілігі. Қазіргі заманда цифрлық ақпарат көлемінің қарқынды өсуіне байланысты үлкен деректер ағындарын жинақтап, тасымалдай алатын жады құрылғыларына деген сұраныс үздіксіз артып келеді. Өндіріс көлемінің ұлғаюы мен дамудың жоғары қарқынына қарамастан, ақпаратты өңдеу тиімділігі дәстүрлі технологиялармен қамтамасыз етілмейді.

Кірістірілген жаңа буын энергияға тәуелсіз жады (eNVM – embedded non-volatile memories) жоғары масштабталуымен, төмен энергия тұтынуымен және қайта жазу циклдарының көптігімен сипатталады, әрі жақын болашақта дәстүрлі жады құрылғыларын алмастыруы мүмкін. Энергонезависимая фазалық ауысымды жады (PCM – Phase Change Memory) жаңа буын жады құрылғыларын жүзеге асыру үшін қарастырылып отырған ықтимал технологиялардың бірі болып табылады. PCM технологиясы материалдың аморфты және кристалдық күйі арасындағы қайтымды фазалық ауысуына негізделген және бұл ауысым лазерлік сәуле немесе электр өрісінің импульстері арқылы жүзеге асады

Дәстүрлі технологиялармен салыстырғанда, мысалы, Flash-жады (NOR, NAND), динамикалық (DRAM) және статикалық (SRAM) жедел жады түрлері, сондай-ақ жаңа буынның бірнеше өңделіп жатқан жады технологияларымен, соның ішінде спин моментін тасымалдау негізіндегі жадымен (STT-RAM) және резистивтік жадымен (ReRAM), PCM технологиясы бірқатар артықшылықтарымен ерекшеленеді. Атап айтқанда, бұл технология ақпаратты оқу жылдамдығының салыстырмалы түрде жоғары болуымен (~10 нс), жазу уақытының аздығымен (≥50 нс), жазу кезіндегі энергия тұтынудың төмендігімен (~0,1 пДж/бит), сондай-ақ қайта жазу циклдарының көптігімен (10^8–10^{15}) сипатталады.

PCM түріндегі жады құрылғыларының негізін халькогенидті шынытәрізді жартылай өткізгіштер (ХШЖ) құрайды. Бұл материалдар кристалдық емес жартылай өткізгіштер класына жатады және бірқатар бірегей қасиеттерге ие, мысалы, фотоқұрылымдық түрленулер, ауысу және жады эффектілері. Халькогенидті жартылай өткізгіштердің бұл қасиеттері олардың атомдық құрылымының лабильділігімен түсіндіріледі, өйткені бұл материалдардың атомдары жұптаспаған электрондар жұбын (lone electron pairs) қамтиды. Сонымен қатар, ХШЖ-лар құрылымдық өздігінен пайда болатын зарядталған ақауларға байланысты жоғары локализацияланған электрондық күйлердің тығыздығымен сипатталады. Бұл ақаулар Ферми деңгейін тыйым салынған зонаның ортасында бекітеді.

ХШЖ аморфты жұқа қабыршақтарына күшті электр өрістері әсер еткен кезде олардың электрлік кедергісі тез және секірмелі түрде төмендеп, сыртқы электрлік әсер алынғаннан кейін бастапқы күйіне қайта оралуы бақыланды, бұл құбылыс кейіннен ауысу эффектісі деп аталды. Егер ауысу эффектісінен кейін ХШЖ-ның локалдық құрылымы қайта құрып, нәтижесінде кристалдану жүріп, төмен кедергі күйі сыртқы электр өрісінің болмауына қарамастан сақталса, онда бұл құбылыс жады эффектісі деп аталады. Қазіргі фазалық ауысымды жады (PCM) құрылғыларында қолданылатын материалдар — $GeTe$–Sb_2Te_3 квазибинарлық қимасының бойында орналасқан күрделі құрамды халькогенидті жартылай өткізгіштер. Бұл ретте құрамы $Ge_2Sb_2Te_5$ (GST) болатын жақсы зерттелген жұқа

қабыршақтар осындай құрылғыларда қолдануға ең перспективалы функционалдық қабаттар ретінде қарастырылады. GST функционалдық қабаттарының негізгі кемшіліктеріне жазу/өшіру циклдарының шектеулі саны, фазалық күйлер арасындағы ауысудың салыстырмалы түрде баяулығы және параметрлердің температуралық өзгерістерге сезімталдығы жатады. Бұл материалдардың құрылымдық және электрондық қасиеттерін басқару энергияға тәуелсіз жады құрылғыларының өнімділігін арттырумен қатар, олардың ықтимал қолдану аясын едәуір кеңейтуге мүмкіндік береді.

GST функционалдық қабаттарының жоғарыда аталған қасиеттерін жақсартуға мүмкіндік беретін тиімді әдістердің бірі — электрондық қасиеттерді құрылымдық және қоспалық модификациялау әдісі болып табылады. Құрылымдық модификация әдісі материал құрамын өзгертпестен, GST құрылымын әртүрлі алу тәсілдерін қолдана отырып басқаруға негізделген. Ал қоспалық модификацияның ерекшелігі — қоспаның жоғары концентрациясы кезінде де аморфты құрылымды сақтау мүмкіндігін қамтамасыз ететін әдістерді қолдану болып табылады.

Бүгінгі таңда GST және қоспаларды иондық-плазмалық жоғары жиілікті магнетронды бірлесіп бүрку әдісі аталған екі тәсілді де жүзеге асыруға мүмкіндік береді және модификацияланған GST қабаттарының электрондық қасиеттерін кең ауқымда басқаруға жол ашады. Сонымен қатар, бұл әдіс құрамдас бөліктердің берілген қатынасымен күрделі құрамды функционалдық қабаттарды алуға мүмкіндік береді.

GST функционалдық қабаттарын модификациялаушы қоспа ретінде басқа қоспалармен қатар күміс те қолданылады. Күміспен модификацияланған GST қабаттарында кристалдану температурасы мен жылдамдығының жоғарылауы, электрлік импульс әсерінен ауысу уақытының қысқаруы және оптикалық қасиеттердің өзгеруі байқалады. Бұған қоса, күміс қоспа атомдарының жоғары диффузиялық қабілеті фазалық ауысымды материалдардың функционалдық қабаттарында қоспаның біркелкі таралуын қамтамасыз етеді.

Алайда күміспен модификацияланған GST функционалдық қабаттарына қатысты жүргізілген numerous зерттеулерге қарамастан, ақпарат жазу үшін маңызды болып табылатын мынадай процестер әлі толық зерттелмеген: лазерлік сәулелену кезінде құрылымның трансформация кинетикасы және жады ұяшықтарындағы күміс қоспасының ауысу эффектісіне тигізетін әсері.

Диссертациялық жұмыстың мақсаты ақпаратты оптикалық және электрлік жазу үшін күміспен модификацияланған $Ge_2Sb_2Te_5$ функционалды қабаттарына негізделген энергияға тәуелсіз жадтың функционалды қабаттарын эксперименттік зерттеу.

Аталған мақсатты іске асыру үшін келесі өзара логикалық байланысқан және бірізді міндеттер қойылды:

1. Күміспен модификацияланған $Ge_2Sb_2Te_5$ ($Ge_2Sb_2Te_5$<Ag>) құрамының аморфты құрылымы бар фазалық ауысымды функционалдық қабаттарын алу технологиясын иондық-плазмалық жоғары жиілікті магнетронды бірлесіп бүрку әдісін қолдана отырып әзірлеу;

2. Күміспен модификацияланған $Ge_2Sb_2Te_5$ фазалық ауысымды функционалдық қабаттарының оптикалық қасиеттерін зерттеу, лазерлік сәулеленудің тиімді ену тереңдігін және көрінетін спектр аймағындағы GST материалының оптикалық контрастының спектрлік таралуын анықтау, $Ge_2Sb_2Te_5$ және $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> функционалдық қабаттарының құрылымдық трансформациясының in situ кинетикасын лазерлік сәулеленудің әсері кезінде зерттеу;

3. Дайындалған күміспен модификацияланған фазалық ауысымды $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> функционалдық қабаттары негізінде жасалған жады ұяшықтарының электрлік сипаттамаларына және параметрлеріне күміс қоспасының әсерін зерттеу.

Зерттеу нысандары аргон атмосферасында иондық-плазмалық жоғары жиілікті магнетрондық бірлесіп бүрку әдісі арқылы алынған күміс қоспасымен модификацияланған $Ge_2Sb_2Te_5$ құрамына негізделген фазалық ауысымды функционалдық қабаттар**.**

Зерттеу пәні $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> функционалдық қабаттарының құрамы, құрылымы, электромагниттік сәулеленудің әсерінен құрылымдық трансформация кинетикасы мен оптикалық қасиеттері, сондай-ақ олардың негізінде жасалған жады ұяшықтарының вольт-амперлік сипаттамаларын зерттеу болып табылады.

Зерттеу әдістері.

Диссертациялық жұмыстың мақсатын жүзеге асыру және қойылған міндеттерді сәтті орындау үшін модификацияланған функционалдық қабаттарды зерттеудің келесі эксперименттік әдістері қолданылды: функционалдық қабаттардың құрылымы мен құрамын зерттеу рентгенқұрылымдық талдау әдісімен (Rigaku MiniFlex 600), сканирлеуші электрондық микроскопия әдісімен (Quanta 3D 200i), энергия-дисперсиялық талдау әдісімен (Quanta 3D 200i, жоғары вакуум режиміндегі EDAX приставкасымен), сондай-ақ комбинациялық жарық шашырау спектрометрімен (Solver Spectrum 600/600, He-Ne лазерімен, $\lambda = 633$ нм) жүргізілді. Құрылымдық трансформацияны зерттеу кезең-кезеңімен жүргізілген термиялық шынықтыру арқылы жүзеге асырылды, бұл үшін температура контроллері (Omron E5CZ), қорек көзі (Tektronix PWS2326) және пикоамперметр (Keithley 6485, дербес компьютермен) қолданылды, сондай-ақ лазерлік сәулелендіру комбинациялық шашырау әдісімен (Solver Spectrum 600/600, He-Ne лазерімен, $\lambda = 633$ нм) жүргізілді. Функционалдық қабаттардың оптикалық және электрлік қасиеттері Shimadzu UV2000 оптикалық спектрофотометрі арқылы және вольт-амперлік сипаттамаларды зерттеу әдістерімен, импульстік генератор (Актаком АНР-1011) және осциллограф (Gwinstek GDS-71062A) қолдану арқылы зерттелді.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы

1. $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> модификацияланған фазалық ауысымды функционалдық қабаттарының құрылымдық трансформация кинетикасына лазерлік сәулеленудің қуаты мен ұзақтығының ($\lambda = 633$ нм) әсері алғаш рет *in situ* режимінде Раман спектроскопиясы әдісімен зерттелді және фазалық ауысулардың ерекшеліктері анықталды, олар лазерлік сәулелену қуатымен және қоспа концентрациясымен басқарылады.

2. $Ge_2Sb_2Te_5$ фазалық ауысымды функционалдық қабаттарын күміспен модификациялау кезінде 300–650 нм аралығындағы кең спектралдық диапазонда олардың оптикалық контрастын айтарлықтай арттыру алғаш рет анықталды. Оптикалық контрасттың ең елеулі артуы (60%-ға дейін) қоспа концентрациясы 12,3 ат.% болатын функционалдық қабаттарда байқалды.

3. $Ge_2Sb_2Te_5$ негізіндегі фазалық ауысымды модификацияланған функционалдық қабаттардан жасалған жады ұяшықтарында ақпаратты электрлік жазу параметрлеріне күміс қоспасының әсері алғаш рет зерттелді. Қоспа концентрациясы артқан сайын ауысу үшін қажетті шекті кернеу мен ауысу уақытының азаятындығы анықталды. Ең төмен энергия тұтыну $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag 7,0 ат.%> құрамындағы жады ұяшықтарына тән екені белгіленді.

Қорғауға шығарылатын ережелер

1. Ионды-плазмалық жоғары жиілікті (13,56 МГц) магнетрондық бүрку әдісі арқылы поликристалдық жартылай өткізгішті $Ge_2Sb_2Te_5$ және Ag құрамындағы біріктірілген нысанадан аморфты құрылымы бар және құрамында Ag қоспасы 12,3 ат.% дейін болатын $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> фазалық ауысымды функционалдық қабаттарын алуға болады. Бұл қабаттар жоғары кристалдану температурасымен (280 °C) ерекшеленеді.

2. $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> фазалық ауысымды функционалдық қабаттарына лазерлік сәулеленудің ($\lambda = 633$ нм) әсері олардың құрылымының аморфты күйден кристалдық күйге фазалық ауысуына алып келеді (ақпаратты оптикалық жазу). Бұл фазалық ауысудың ерекшеліктері (аралық фазаның болуы немесе болмауы) сәулеленудің қуаты мен ұзақтығына байланысты және Ag модификациялаушы қоспасының концентрациясымен басқарылады. $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> функционалдық қабаттарының оптикалық контрасты Ag қоспасы концентрациясы артқан сайын барлық практикалық қолданылатын лазерлік сәулелену толқын ұзындықтары үшін айтарлықтай өседі.

3. $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> фазалық ауысымды функционалдық қабаттарына негізделген жады ұяшықтарында ақпаратты электрлік жазу параметрлері Ag модификациялаушы қоспасының концентрациясы арқылы кең диапазонда басқарылады. Күміс концентрациясы 0-ден 12,3 ат.% дейін артқан кезде ауысу үшін қажет шекті кернеу және ауысу уақыты тиісінше 1,74 В-тан 1,06 В-қа және 70 нс-тен <50 нс-ке дейін төмендейді. Жазу үшін қажет ең аз қуат $Ge_2Sb_2Te_5$ құрамындағы Ag концентрациясы 7,0 ат.% болған кезде байқалады.

Зерттеудің теориялық және практикалық маңыздылығы

Алынған нәтижелер жартылай өткізгіш материалдар технологиясын дамыту, оптикалық дискілер мен электрлік жады ұяшықтары үшін энергияға тәуелсіз жады элементтерін жобалау және дайындау саласында $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> негізіндегі жаңа перспективалы фазалық ауысымды функционалдық қабаттар негізінде үлкен технологиялық және практикалық құндылыққа ие. Сонымен қатар, зерттеу нәтижелері техникалық физика саласындағы магистранттар мен докторанттарды даярлау бойынша оқу процесі үшін маңызды болып табылады.

Фазалық ауысымды материалдар негізіндегі функционалдық қабаттарда деректерді жазу жылдамдығы мен сенімділігін арттыруға бағытталған зерттеулер қазіргі заманғы цифрлық технологиялар мен жасанды интеллекттің дамуына елеулі әсер етуі мүмкін.

Алынған нәтижелердің **дұрыстығы мен негізділігі** қазіргі заманғы зерттеу әдістері мен аспаптық жабдықтарды қолданумен қамтамасыз етілген. Сонымен қатар, нәтижелердің шынайылығы олардың алыс шетелдің жоғары импакт-факторы бар ғылыми журналдарында, Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым және жоғары білім саласында сапаны қамтамасыз ету комитеті (ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК) ұсынған басылымдарда, сондай-ақ жақын және алыс шетелдердегі халықаралық ғылыми конференциялар материалдарында жариялануымен расталады.

Автордың жеке үлесі

$Ge_2Sb_2Te_5$ және $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> құрамды фазалық ауысымды функционалдық қабаттарды алу технологиясын әзірлеу автор тарапынан ионды-плазмалық жоғары жиілікті магнетрондық бүрку әдісі арқылы жүргізілді. Оптикалық және электрлік сипаттамаларды зерттеу бойынша нәтижелерді алу, өңдеу және талдау жұмыстарын автор дербес орындады.

Жарияланымдар

Диссертациялық жұмыс материалдары бойынша барлығы 12 баспа жұмысы жарияланды, оның ішінде 2 мақала Scopus және Web of Science дерекқорына кіретін журналдарда, 2 мақала ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдарда және 8 баяндама тезистері халықаралық ғылыми конференциялар материалдарында жарық көрді.

Диссертациялық жұмысты апробациялау

Диссертациялық жұмыс шеңберінде алынған нәтижелер келесі халықаралық конференцияларда баяндалып, талқыланды: V Халықаралық ғылыми конференция «Конденсацияланған күй физикасының, нанотехнологиялар мен наноматериалдардың қазіргі мәселелері», 2018 жылғы 17–18 мамыр, Алматы; International Conference on Amorphous and Nanostructured Chalcogenides, 2019 жылғы 30 маусым – 4 шілде, Кишинев, Молдова Республикасы; The 7th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS), 2019 жылғы 7–9 тамыз, Алматы; Студенттер мен жас ғалымдардың халықаралық ғылыми конференциясы «ФАРАБИ ӘЛЕМІ», 2020 жылғы 6–9 сәуір, Алматы, Қазақстан; The 8th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2020), 2020 жылғы 6 тамыз, Нұр-Сұлтан; Халықаралық ғылыми конференция «Аморфты және микрокристалды жартылай өткізгіштер», 2021 жылғы 19–21 қараша, Санкт-Петербург, Ресей; The 10th International Conference on Nanomaterials and Advanced Energy Storage Systems (INESS-2022), 2022 жылғы 4–6 тамыз, Нұр-Сұлтан; Халықаралық ғылыми конференция «Аморфты және микрокристалды жартылай өткізгіштер», 2023 жылғы 3–5 шілде, Санкт-Петербург, Ресей.

Импакт-факторлы, халықаралық ғылыми Scopus және Web of Science дерекқорына кіретін мақалалар:

– O.Yu. Prikhodko, G.A. Ismailova, **A.S. Zhakypov**, A.V. Kolobov, K.N. Turmanova, R.R. Nemkaeva, S.Ya. Maksimova, Zh.K. Tolepov, S.L. Peshaya. Structural transformation of thin $Ge_2Sb_2Te_5$<Ag> films produced by ion-plasma co-sputtering under laser irradiation // Journal of Electronic material. – 2023. – 52(4). – P. 2492-2498.

– S.L. Mikhailova, O.Yu. Prikhodko, Y.S. Mukhametkarimov, K. Dautkhan, U.A. Doseke, S.A. Kozyukhin, G.A. Ismailova, S.Ya. Maksimova, A.Yu. Tarapeyeva, **A.S. Zhakypov**. Thermal stability of the structure and optical properties of nanostructured TiO_2 films // Russian Physics Journal. – 2021. – 63(12). – P. 2045-2051.

ҚР ҒЖБМ ҒЖБССҚК ұсынған басылымдарда жарияланған мақалалар:

– **А.С. Жақыпов**, Ж.К. Төлепов, Г.А. Исмайлова, С.Л. Пешая, М.Н. Уалханова. $Ge_2Sb_2Te_5$<Bi> наноөлшемді аморфты үлдірлерінің құрылымындағы өзгерістер лазерлік сәулелену кезінде // Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің Хабаршысы. – 2022. – №3. – Б. 104–111.

- С.А. Фефелов, Л.П. Казаков, Н.А. Богословский, А.Б. Былев, Е.В. Гущина, Ж.К. Төлепов, **А.С. Жақыпов**, О.Ю. Приходько. Ві қоспасының фазалық жадысы бар $Ge_2Sb_2Te_5$ жартылай өткізгішінің вольт-амперлік сипаттамаларының негізгі параметрлеріне әсері // Жартылай өткізгіштер физикасы және техникасы. – 2024. – Т. 58, №8. – Б. 443–447.

Диссертация тақырыбың ғылыми жұмыс жоспарларымен байланысы

Диссертациялық жұмыс № AP05133499 «Шыны-кристалл күйлеріндегі фазалық жадысы бар металлмен модификацияланған халькогенидті жартылай өткізгіштердің нанокөлемді қабыршақтарының құрылымы мен электрондық қасиеттері» ғылыми-зерттеу жобасының жоспарларына сәйкес орындалды (2018-2020 жж.).

Диссертацияның көлемі мен құрылымы

Диссертациялық жұмыс шартты белгілер мен қысқартулар тізімін, кіріспені, төрт бөлімнен тұратын негізгі бөлімді, қорытындыны және пайдаланылған әдебиеттер тізімін қамтиды. Жұмыс 111 беттен тұрады, 58 сурет, 11 кесте және 181 библиографиялық дереккөз қамтылған.