

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i4.01>

## Peculiarities of the switching and memory effect in bismuth-doped radiation-resistant $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ nanoscale films

N. Almas<sup>1\*</sup>, N. Zhakiev<sup>1</sup>, S. Dyussebayev<sup>2</sup>, A. Aldongarov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Astana IT University, Astana, Kazakhstan

<sup>2</sup>Kazatomprom, JSC Volkovgeologiya, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

\*Corresponding author: [n.almas@astanait.edu.kz](mailto:n.almas@astanait.edu.kz)

**Abstract.** The physics and technology of noncrystalline materials is one of the rapidly developing areas of condensed matter physics, materials science, and nanotechnologies. Among the variety of materials with a non-crystalline structure, a special place is occupied by the class of chalcogenide glassy semiconductors (CGS) with unique properties and phenomena, such as the switching effect, photostructural transformations. The switching effect is observed in thin CGS films and is associated with a fast-reversible phase transition of the structure from the glassy state to the crystalline state under the action of voltage pulses or laser radiation. Based on this effect, a separate class of information carriers has been formed for non-volatile storage devices such as PCM (Phase Change Memory) with high performance and reliability. Materials for use in PCM devices are CGSs of complex compositions lying on the GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> quasi-binary boundary, and thin films of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> composition are the most promising for use in PCM devices. The ability to control the electronic properties of such functional materials based on CGS significantly expands the scope of their application and is an important scientific and practical task, since traditional methods for purposefully changing the electronic properties of crystalline semiconductors, such as doping during synthesis or the thermal diffusion method, turned out to be ineffective for CGS. Impurities introduced into CGS at low concentrations by the methods indicated above usually do not show electrical activity, since they are compensated by their charged structural defects, and an increase in the impurity concentration leads to significant crystallization. In this work, the atomic composition of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> nanosized films with a bismuth content of more than 12 at.%, obtained by ion-plasma deposition in the direct current mode, was studied by the method of energy dispersive analysis using a scanning electron microscope. In addition, the current-voltage characteristics of the samples were measured. It has been found that the transition voltage and the time, which characterize the switching and memory effects, depend significantly on the film thickness and composition. The addition of bismuth reduces the film switching time. A decrease in the film thickness leads to a decrease in the threshold voltage  $U_{th}$  and the switching time. We believe that the results of this work are useful for the development of optical memory based on phase change materials.

**Keywords:** radiation resistance, ion-plasma spraying, nanoscale film, atomic structure, phase transition, switching effect, memory.

### 1. Кіріспе

Ғарышта үнемі болатын энергетикалық электрондар, протондар және фотондар түріндегі сәулелену ол арқылы жұмыс істейтін немесе жүретін электрондық жүйелерге үлкен қауіп төндіреді. Сәулеленудің электроникаға және баспа платаларына әсері уақытша істен шығудан тұрақты тозуға немесе толық өшіруге дейін болуы мүмкін. Бұл қауіппен күресу жолдарын зерттеу аэроғарыш компанияларының, NASA мен әскерилердің басты назарында болды және болып қала береді. Бүгінгі күні ең жақсы қорғаныс ғарыштық жағдайлар үшін радиацияға төзімді электрониканы пайдалану болып табылады. Фазаны өзгертуге негізделген оперативты жады (PCRAM - Phase Change Random Access Memory) технологиясы деканометрлік диапазонға дейін масштабтау мүмкіндігі бар [1] және жоғары радиацияға төзімділігі жаңа буын перспективалықтарының бірі болып табылады [2-6]. Бұл материалдардың сәулеленуге төзімділігі олардың

құрылымындағы  $U$  – орталықтары [7] деп аталатын меншікті ақаулардың жоғары концентрациясына тікелей байланысты. Андерсон ХШЖӨ-ің легирленбеу феноменологиясын түсіндіретін модельді ұсынды. Оған сәйкес халькогенидті шыныларда тыйым салынған аумақтың ортасында Ферми деңгейін бекітетін  $U$ – минус орталықтары деп аталатын теріс корреляциялық энергиясына ие зарядталған ақаулар бар. Андерсонның болжамына сәйкес, ХШЖӨ материалдарында тор мен өзара әрекеттесетін спиндері әртүрлі екі жұпталмаған электрондар арасында тиімді тартылыс болады. Электрондар арасында оң итеруші энергия пайда болғандықтан және тордың өзі теріс зарядталғандықтан, мұндай жүйеде тиімді корреляциялық әсерлесу энергиясы теріс болады. Бұл жағдайда атомдардың жергілікті деңгейде жақындауына байланысты байланыс түзіледі. ХШЖӨ-де, әдетте,  $U$ – минус орталықтары құрылымында ұзақ мерзімді тәртіптің болмауына байланысты қос координация бұзылған, бір координацияланған халькоген

атомы түріндегі салбыраған байланыс типінің ақаулары деп саналады. Егер C20 халькогенінің (С-халькоген, 2-валенттілік, 0-заряд) сыртқы орбитальда 6 электроны болса, оның 2-і байланыс түзсе, онда 4 электрон жалғыз орбитальдарды құрайды. Егер кемтікте 1 электрон болса, онда ол бейтарап болып саналады және C10 деп жазылады. Егер кемтіктерде 2 электрон болса, онда олар C1+ және C1- деп белгіленеді. Ал мұндай екі күй арасындағы тепе-теңдік күйі былай жазылады:  $2C10 \rightarrow C1+ - C1-$ . Егер ақаулар көршілес тізбектегі ұқсас жалғыз жұппен әрекеттесе, онда байланыс пайда болады. Бұл әрекеттесу C1- кемістігіндегі 2 электрон арасындағы кулондық тебілудің орнын толтырады. Бұл өзара әрекеттесу нәтижесінде теріс корреляциялық энергиясы пайда болады.

PCRAM жады ұяшықтарының дамуы үшін перспективті қосылыстардың бірі  $Ge_2Sb_2Te_5$  жұқа қабықшалары болып саналады [8-9]. Мұндай ұяшықтардың жұмысы сыртқы электрлік импульс немесе жылу әсерінен туындаған наноөлшемді халькогенидті қабықшаларда пайда болатын, кедергінің бірнеше реттік шамадағы секіріс тәрізді өзгеруімен бірге жүретін «аморфты ↔ кристалдық күй» жылдам, қайтымды фазалық ауысуларға негізделген. Фазалық ауысулар 1960 жылдары халькогенидті шыны тәрізді жартылай өткізгіштерде табылған коммутация және жады эффектісіне негізделген [10]. Дегенмен, сыртқы әсерлер кезінде жұқа  $Ge_2Sb_2Te_5$  қабықшаларындағы фазалық ауысулардың ерекшеліктері әлі де талқылау тақырыбы болып табылады. Қоспасыз  $Ge_2Sb_2Te_5$  қабықшаларындағы қайтымды фазалық ауысуларды тікелей бақылау олардың екі сатылы табиғатын ашуға мүмкіндік берді [11]. Қабықшалардың кристалдануының бастапқы кезеңі олардың аморфты күйден поликристалды күйге, содан кейін поли- кристалдық күйден монокристалдық күйге өтуіне сәйкес келеді. Әрбір күй белгілі бір электрлік кедергіге сәйкес келеді. Аралық кедергі мүмкіндігі PC-RAM-ды көп деңгейлі сақтау үшін тамаша етеді. Аралық кедергілер PCM-де аморфты матрицадағы кристалдық түйіршіктердің мөлшері мен таралуы арқылы құрылатыны белгілі [12]. Бұл аралық қарсылық мәндері наноөлшемдегі кристалдық және аморфты фазалар арасындағы перколяцияға байланысты деп саналады. Сондай-ақ, дәлнін орташа мөлшеріне аморфты қоспасыз  $Ge_2Sb_2Te_5$  қабыршақтарын бірқалыпты күйдіру тәжірибелері көрсетілгендей, температураның бірқалыпты жылдамдығы қатты әсер етеді [13].  $Ge_2Sb_2Te_5$  қабықшаларының электрондық қасиеттерін мақсатты түрде өзгертудің тиімді әдістерінің бірі оларға қоспа енгізу болып табылады [14]. Дегенмен, көптеген шынытәріздес жартылай өткізгішті (ХШЖ) материалдар (солардың арасында GST225 құрамыда) тыйым салынған зонаның ортасына жақын орналасқан Ферми деңгейін бекітетін меншікті ақаулардың жоғары тығыздығына байланысты қоспаларға сезімталдықты көрсетеді [15]. Дегенмен, Ge-Sb-Te жүйесінің қабықшаларының қасиеттерін жақсарту тәсілдерінің бірі металл қоспасын енгізу арқылы электрондық параметрлерді өзгерту болып табылады. Ge-Sb-Te қосылысы үшін модификациялаушы қоспаны таңдау кезінде негізгі компоненттердің бірімен изовалентті және изоморфты элементті енгізу алмастыру механизмі арқылы легирлеуге мүмкіндік береді деп

болжам жасауға болады [16-18]. Сонымен қатар,  $Ge_2Sb_2Te_5$  қосылысында метатұрақты кристалдық құрылымда катионды бос орындар бар, олардың концентрациясы әртүрлі бағалаулар бойынша 10-нан 20% -ға дейін. Тиісінше, құрамдас бөліктердің бірінің өлшемдеріне жақын атомдық және иондық өлшемдері бар элементтің материалды матрицаға елеулі деформациялар енгізбестен бар бос орындарды алу мүмкіндігі бар. Висмут - осындай қоспалардың бірі. GST225-ке висмутты енгізу таза висмут қосылмаған GST225-пен салыстырғанда кристалдану уақытының 30%-ға төмендеуіне әкелетіні көрсетілген бірнеше жұмыстар бар [19, 20]. Висмут енгізілгеннен кейін жұқа GST225 қабықшаларының жарықтың Раман шашырауының спектрінде айтарлықтай өзгеріс байқалады [21]. Қазіргі уақытта зерттеушілердің күш-жігері PCRAM сияқты құрылғыларда ақпаратты сақтау және жазу параметрлерін (шекті кернеу  $U_{th}$  және коммутация уақыты  $t_{sw}$ ) жақсартуға бағытталған. Әдетте PCRAM ұяшықтар Ge-Sb-Te, Ag-In-Sb-Te және т.б. халькогенидты шынытәріздес жартылай (ХШЖ) өткізгішті қосындылардың наноөлшемді қабықшаларының негізінде жасалады. Жад ұяшықтарына қойылатын негізгі талаптар олардың бөлме температурасындағы тұрақтылығы, мәліметтерді жазу/қайта жазудың жоғары саны (циклдер саны), жылдамдық (ауысу уақыты), қуатты аз тұтыну (ауысудың төменгі шекті кернеуі). Flash NAND, DRAM және PCM сияқты тұрақты жад құрылғыларының болашағы зор. Олар қуаттылықты жоғарылатты, жоғары масштабталады, фазадан фазаға ауысу механизмі арқылы өнімділікті жоғарылатты, жоғары сенімділік пен қуаттың шығынын азайтты. Жадтың осы түрлерінің салыстырмалы параметрлері 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. PCM жадысын аналогтармен салыстыру

| Жад түрі                                   | DRAM      | Flash NAND | PCM              |
|--|-----------|------------|------------------|
| Жазу/қайта жазу циклдарының саны           | $10^{16}$ | $10^5$     | $10^{12}$        |
| 1 бит ақпаратты оқу/жазу уақыты            | 4мс/10мс  | 50нс/0.4мс | 70нс/(100-500)нс |
| CMOS технологиясына арналған маскалар саны | 4         | 11         | 5                |
| Энергетикалық тәуелсіздік                  | -         | -          | +                |
| Ақпаратты сақтау уақыты, жылдар            | -         | 20         | шексіз           |
| Ұяшық өлшемі, F2                           | 6-8       | 5          | 8                |
| Көп деңгейлі ұяшық құру                    | -         | -          | +                |
| Радиацияға төзімділік                      | -         | -          | +                |
| Ақпарат битінің бағасы                     | орташа    | төмен      | орташа           |

1-кесте PCM жадысының параметрлері аналогтармен салыстырғанда бірқатар артықшылықтарға ие екенін көрсетеді, бірақ сонымен қатар жадының бұл түрлерін кең ауқымда қолдану әлі де жадта пайдалану үшін оңтайлы материалды әзірлеу және таңдау барысында. Сонымен қатар, PCM негізіндегі жаңа буын жады ұяшықтары жақын арада флэш-жад сияқты жад сақтау құрылғыларының кейбірін алмастыра алады деп күтілуде.

PCM негізіндегі жад ұяшықтарының айқын артықшылықтарына қарамастан,  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  құрамында аралық фазалық күйлердің болуына байланысты құрылғының тұрақсыздығы, белсенді аймақты қыздыру үшін жылу бөлінуінің жеткіліксіздігі және ұяшық геометриясының жетілмегендігі сияқты бірқатар кемшіліктер бар. Осы уақытқа дейін PCM негізінде жад ұяшықтарын ауыстыру параметрлерін жақсарту сұрақтары өзекті болып қала береді.

Қабықшаларды көбінесе термиялық буландыру немесе ионды-плазмалық тозандату әдістерімен алады. Бу фазалық конденсация арқылы халькогенидты шынытәріздес жартылай (ХШЖ) өткізгішті қабықшаларын өндіруде үлгінің бүкіл беті бойынша қалыңдығы мен химиялық құрамының біркелкілігін сақтай отырып, қабықшалардың құрылымы мен құрамын сақтауға күш салынады. Қажетті қасиеттері бар қабықшаларды алу үшін буланған заттардың химиялық тазалығына, камераның тазалығына, вакуум дәрежесіне және тұндыру жағдайларына ерекше талаптар қойылады. Көпкомпонентті композицияны тұндыру үшін композицияның тек ұшпа компоненттерінің булануын болдырмау үшін конденсацияның белгілі бір режимін таңдау керек. Сондай-ақ тұндыру процесінде қызып кетудің алдын алу маңызды, ал пленканың кейінгі кристалдануы кезінде салқындатылған төсенішке тұндыру қажет.

Жұқа қабықшаны тұндырудың екі әдісі бар. Бірінші әдіске резистивті қыздыру, жарылғыш (Flash) буландыру, электр доғасы сияқты қабықшалар термиялық булану арқылы алынатын әдістер жатады. Екінші әдіске буланған материал жоғары энергиялы бөлшектердің әсеріне ұшыраған кезде, буланған заттың бетінен атом шығып, төсеніште конденсацияланатындай жеткілікті энергияны бетіне тасымалдайтын процесті қамтиды. Бұл әдістерге ион-плазмалық магнетронды тозандату жатады. Термиялық әдісіне қарағанда ион-плазмалық магнетронды тозандату әдісі композицияның стехиометриясын сақтауға және қабықшаның қоспалары біркелкі таралуына мүмкіндік береді және қабықша қалыңдығының біркелкілігін сақтайды.

Бұл жұмыста таза және висмутпен модификацияланған наноөлшемді  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  қабықшаларының атомдық құрылымын зерттеу нәтижелері келтірілген. Бұл қабықшалардағы лазер сәулесінің әсерінен болатын құрылымдық ауысулар зерттелді. Бұл ауысулардың ерекшеліктерін висмут атомдары мен матрица атомдары арасындағы химиялық байланыстардың түзілуімен түсіндіруге болады. Сонымен қатар, алдын ала зерттеулер  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  қабықшаларындағы қоспа концентрациясын өзгерту арқылы тура және кері ауысудың кернеуі мен тогы, ауысу уақыты сияқты ауысу және жады эффектісінің параметрлерін тиімді басқаруға болатыны анықтады. Бұл осы материалдар негізінде жад ұяшықтарындағы ауысу және жады эффектінің параметрлерін жақсартудың жаңа мүмкіндіктерін ашады деген сенімдеміз.

## 2. Материалдар және әдістер

### *Ионды-плазмалық тозандату*

Таза және висмутпен модификацияланған  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  қабықшаларын дайындау аса таза (99.999%) жартылай өткізгіш элементтерінен синтезделген поликристалды

нысананы (AcAlloys, АҚШ) тұрақты ток магнетронды тозандату әдісімен жүргізілді. Металлмен түрлендірілген  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  қабықшалары ХШЖӨ және металдан тұратын біріктірілген нысананы ион-плазмалық шашырату арқылы алынды. Металл нысаналар шашырау аймағындағы ХШЖӨ нысанасына бетіне біркелкі орналастырылды. Қабықшалардағы металл қоспасының концентрациясының өзгеруіне металдың беттік аудандарының және ХШЖӨ нысаналарының қатынасын өзгерту арқылы қол жеткізілді. Қабықшаларды дайындаудың технологиялық процесінің параметрлері нысананың құрамы бастапқы құрамына сәйкес келетін құрылымы аморфты қабықшалар алынатын етіп өңделді. Қабықшалар модернизацияланған ВУП-4 қондырғысында  $\sim 1$  Па қысымда аргон атмосферасында алынды. Үдемелі кернеу 400 В, қабықшаның шөгудің жылдамдығы  $\approx 0.3$  нм/с болды. Қабықшалар бөлме температурасында төсеніштерге түндірілді. Төсеніш ретінде кварц, монокристалды кремний және каптон полиимидті таспалар пайдаланылды.

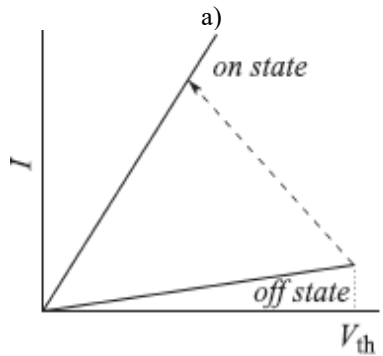
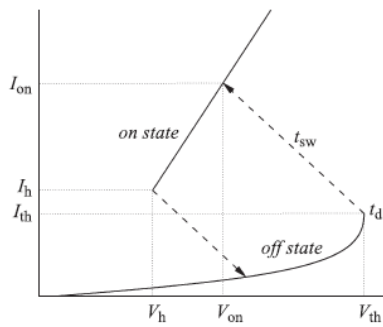
### *Сканирлеуші электрондық микроскопиясы*

Қабықшалардың элементтік құрамы Quanta 3D 200i сканерлеуші электронды микроскоптың көмегімен энергетикалық дисперсиялық талдау арқылы бақыланды. Висмутпен легирленген  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  қабықшаларында қоспаның максималды концентрациясы 12.54%-ға жетті. Қабықшалар ластаушы заттар жоқ, үздіксіз, біртекті болды. Олардың қалыңдығы 50  $\sim$  175 нм болды. Ол кристалды кремний – GST <Bi> қабықшасының құрылымының ыдырауының энергиясы 30 кВ дейінгі электронды сәулемен сканерлеу арқылы анықталды.

### *Ауысу эффектісі*

PCM типті жадының жаңа буын ұяшықтарының жұмыс істеу принципі ауысу эффектісіне негізделген - пленканың нанокөлеміндегі фазалық ауысу, ол ток импульсі түскенде пайда болады. Ауысу эффектісі - электр импульсінің әсерінен материалдың жоғары кедергілі күйден (off-state) төмен қарсылық күйіне (on-state) қайтымды фазалық ауысуы,  $\sim 100$  нс қысқа уақыт аралығында, белгілі бір шекті кернеуге  $U_{th}$  (шектеу кернеу) жеткенде [22].

Мұндай ауысу электрөткізгіштіктің шамалардың бірнеше дәрежеге күрт өсуімен және кедергінің  $\sim 10^5$ -тен  $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ -ге дейін төмендеуімен сипатталады. Ауысу эффектісі кезінде вольт-амперлік сипаттамасында (BAC) теріс дифференциалды кедергісі бар бөлім байқалады. Бұндай вольт-амперлік сипаттама материалда ток жібі (шнурдың) пайда болуымен жүретін электрлік бұзылу (пробой) деп аталатын процесске тән. Ток жіптері күшті электр өрістерінде ( $\sim 10^5 \text{ В/см}$ ) байқалады, мұнда I-V сипаттамасы Ом заңынан ауытқиды және оның формасы S пішінін алады. Жіптегі ток тығыздығы қоршаған көлемнен бірнеше есе көп және мұндай жіптің көлденең қимасы үлгінің көлденең өлшемінен бірнеше есе аз болғанына қарамастан, ол негізінен жіптің ішінде ағады. I-суретте ауысу және жады эффектісіне тән BAC көрсетілген [23]. Жоғары кедергілі күй «off state» күймен сипатталады, ал төмен кедергісі бар өткізгіш күй «on state» тармақ болып табылады. Сонымен, белгілі бір кернеу қолданылған кезде, тікелей өту кернеуі немесе шектеу кернеуге  $V_{th}$  (шектеу кернеу) жеткенде үлгі төмен кедергілік күйіне өтеді, ток  $I_d$  кешігу уақытынан кейін (кідіріс уақыты) күрт көтеріледі.



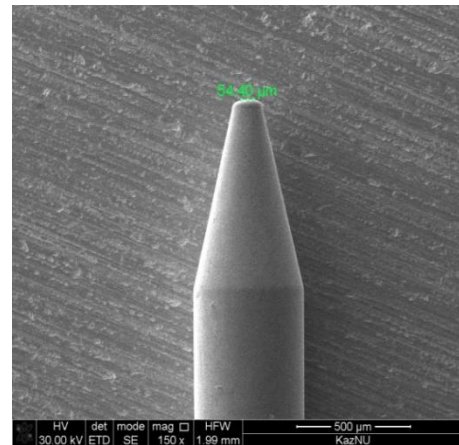
б)

1-сурет. Қайта қосылу (а) және жады (б) эффекттерінің вольт-амперлік сипаттамалары [23]

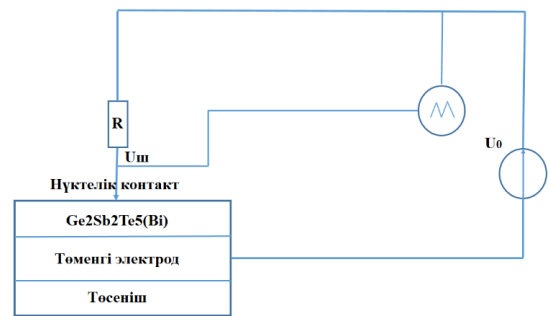
Ток  $t_{sw}$  (уақыттың ауысуы) уақытында  $I_{on}$  ток мәні бар өткізгіш төмен кедергі күйіне көтеріледі, ал егер кернеу  $V_h$  мәніне (ұстау кернеуі) азайса, үлгі бастапқы жоғары кедергі күйіне ауысады. Егер қайта қосылу әсерден кейін кернеу жойылғаннан кейін төмен кедергілік күйі сақталса, онда бұл процесс жады эффектiсi деп аталады (1, б-сурет). Ауысу және жады эффектiсi көрінетін қарапайымдылығына қарамастан, бұл процестердің физикасы әлі де қызу зерттелінуде және талқылануда.

Осы жұмыста ауысу эффектiсiн зерттеу үшін үлгілер «сэндвич» құрылымдары түрінде дайындалды. Төменгі электрод шыны негізге термиялық булану арқылы тұндырылған үздіксіз алюминий қабықшасы болды. Жоғарғы электрод ретінде алтыннан жасалған нүктелік қысым контактісі қолданылды, оның контакт аймағының диаметрі 54.4 мкм болды, сурет 2, а. Үлгілердің вольт-амперлік сипаттамаларын өлшеуге арналған қондырғының құрылымдық схемасы 2, б-суретте көрсетілген.

Актаком АНР-1011 генераторынан үлгілерге амплитудасы 10 В дейінгі ара тәрiздес кернеуi қолданылды. I-V сипаттамалары Gwinstek GDS-71062A осциллографымен жазылды. Үлгі арқылы өтетін ток үлгімен тізбектей жалғанған R резисторындағы кернеудің төмендеуінен есептелді.  $U_{\text{үлгі}} = U_0 - U_{R\text{ш}}$ ,  $U_0$  сыртқы генератор арқылы таңдалады. Уақыттың бастапқы сәтінде үлгінің кедергісі R кедергіден 103-ке асады және осыған байланысты тізбектегі ток («шыны-кристалдық» ауысуға дейін) үлгінің кедергісі арқылы анықталады. Генератор кернеуінің лездік мәндері мен  $U_{R\text{ш}}$  арасындағы айырмашылық үлгіге түсетін кернеу болып табылады. Үлгідегі ток  $U_{R\text{ш}}/R_{\text{ш}}$  мәніне тең [24].



а)

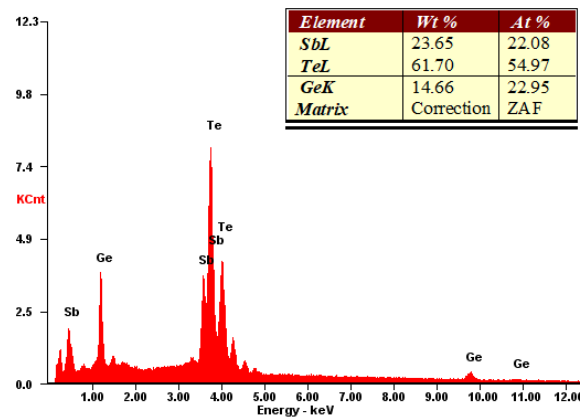


б)

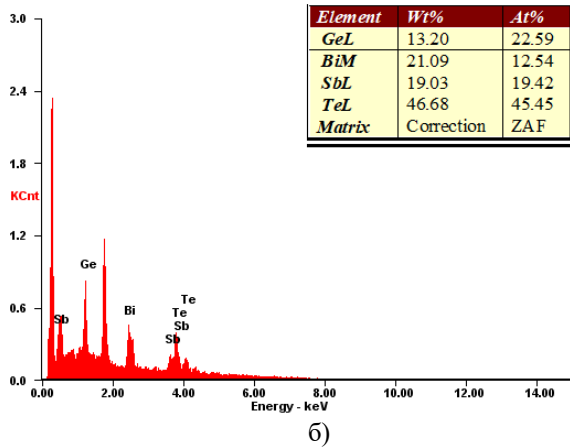
2-сурет. Алтын нүктелі контактінің микросуреті (а) және үлгілердің вольт-амперлік сипаттамаларын зерттеуге арналған қондырғының құрылымдық сұлбасы (б)

### 3. Нәтижелер және оны талқылау

Таза және висмутпен модификацияланған қабықшаларының энергетикалық дисперсиялық талдауының нәтижелері 3 а, б суреттерінде тиісінше көрсетілген. Таза қабықшалардың құрамы Ge: Sb: Te = 22.95: 22.08: 54.97 сәйкес келді. Модификацияланған қабықшалардағы висмут мөлшері 12.54 ат. % жетті, ал элементтер арасындағы қатынас Ge: Sb: Te = 22.59: 19.42: 45.45 болды. Стехиометриялық құрамнан шамалы ауытқу байқалды.

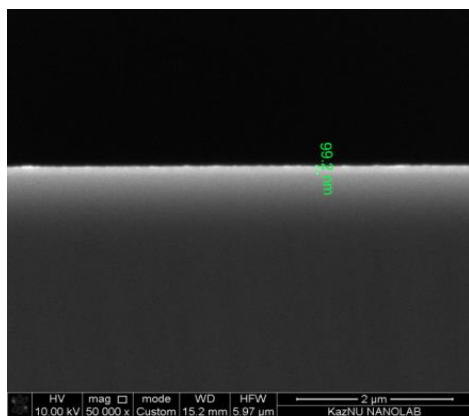


а)

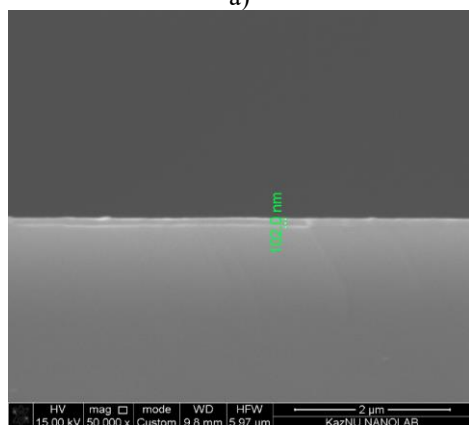


3-сурет. Таза (а) және висмутпен модификацияланған (б)  $Ge_2Sb_2Te_5$  қабықшаларының энергетикалық дисперсиялық спектрлері. Жоғары оң жақ бұрышта үлгілердің элементтік құрамы

Қабықшалардың қалыңдығы Quanta 3D 200i SEM-де c-Si/ $Ge_2Sb_2Te_5$  қабықшасы құрылымның қырын электрондық сәулемен сканерлеу арқылы анықталды. Қалыңдығы ~ 100 нм кейбір үлгілердің кескіндері 4 суретте көрсетілген.



а)

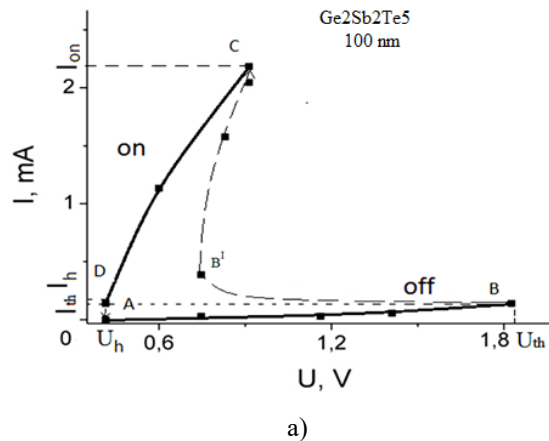


б)

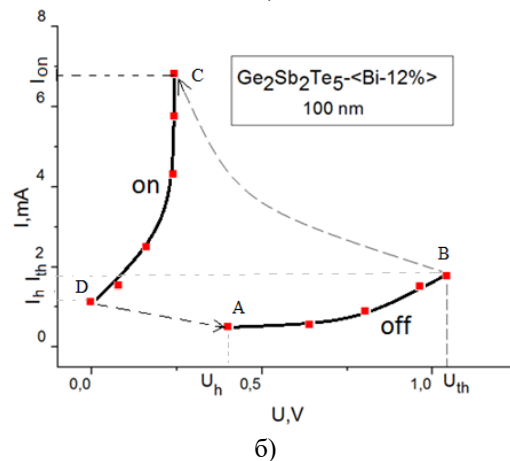
4-сурет. Жоңқалы құрылымдардың SEM кескіндері: (а) – c-Si –  $Ge_2Sb_2Te_5$ , (б) – c-Si –  $Ge_2Sb_2Te_5\{Bi\}$

5-суретте қалыңдығы ~ 100 нм  $Ge_2Sb_2Te_5$  қабықшаларының типтік тәжірибелік I-V сипаттамалары көрсетілген. I-V сипаттамасының ауысу эффектісіне тән S-пішіні бар екенін көруге болады. Ток-кернеу сипаттамасы шекті кернеу  $U_{th}$  жеткен кезде

материалдың жоғары кедергілік күйден өткізгіштік төмен кедергі күйіне ауысу уақытында пайда болатын токтың жылдам өсу аймағын көрсетеді. I-V сипаттамалары сондай-ақ  $I_{on}$  төмен қарсылық күйіндегі токтың, кері өту тогы  $I_h$ , жоғары кедергілік күйден  $I_{th}$  өткізгіш күйге өту тогы және минималды кері өту кернеуі  $U_h$  көрсетілген.



а)



б)

5-сурет. қалыңдығы ~ 100 нм (а)  $Ge_2Sb_2Te_5$  ж (б)  $Ge_2Sb_2Te_5\{Bi\}$  қабықшаларының вольт-амперлік сипаттамалары

$Ge_2Sb_2Te_5$  және  $Ge_2Sb_2Te_5\{Bi\}$  қабықшалардың ауысу эффектісінің параметрлері 2-кестеде келтірілген.

2-кесте. Қабықшалардың ауысу эффектісінің параметрлері

| Құрамы                      | Қалыңдығы, нм | $U_{th}$ , В | $j$ , A/cm <sup>2</sup> | I, mA | $t_{sw}$ , нс |
|-----------------------------|---------------|--------------|-------------------------|-------|---------------|
| $Ge_2Sb_2Te_5$              | 175           | 4.00         | 86.9                    | 2     | 100           |
|                             | 100           | 1.8          |                         |       | 70            |
|                             | 50            | 1.00         |                         |       | 50            |
| $Ge_2Sb_2Te_5\{12at.\%Bi\}$ | 200           | 1.15         | 347.8                   | 8     | <50           |
|                             | 100           | 1.15         |                         |       |               |
|                             | 60            | -            |                         |       |               |

2-ші кестеде келтірілген және 4-ші суреттерде көрсетілген нәтижелерді талдаудан  $U_{th}$  және  $t_{sw}$  ауысу эффектінің параметрлеріне қабықшаның қалыңдығын елеулі әсер етеді. Қабықшаның қалыңдығын 175-тен 50 нм-ге дейін азайту шекті кернеудің және ауысу уақытының сәйкесінше 4 және 2 есе төмендеуіне әкеледі.

#### 4. Тұжырымдама

Ge-Sb-Te жүйесінде ауысу эффектісі «шыны ↔ кристал» қайтымды фазалық ауысумен байланысты. Ауысу эффектісінің механизмі электронды-термиялық модель негізінде барынша толық түсіндіріледі [23]. Бұл жұмыстар ХШЖ-дегі ауысу және жады эффектілері Джоуль қыздыруымен бірге ток-кернеу сипаттамасының S пішініне жауап беретін U-минус орталықтарының көпфононды туннельдік ионизациясына негізделгенін көрсетеді. Шыны-кристал құрылымдық фазалық ауысу ХШЖ-де меншікті құрылымдық ақаулардың көпфононды туннельдік термиялық ионизациясы есебінен жүреді. Бұл ионизация өткізгіштіктің күрт жоғарылауна жол береді, ал өткізгіштіктің күрт өсуі өз кезегінде Джоуль жылуы жоғарылауна әкеледі. Сонымен, ауысу және жады эффектісі осылайша тізбектелген күрделі процесстермен қабаттасып іске асады [25].

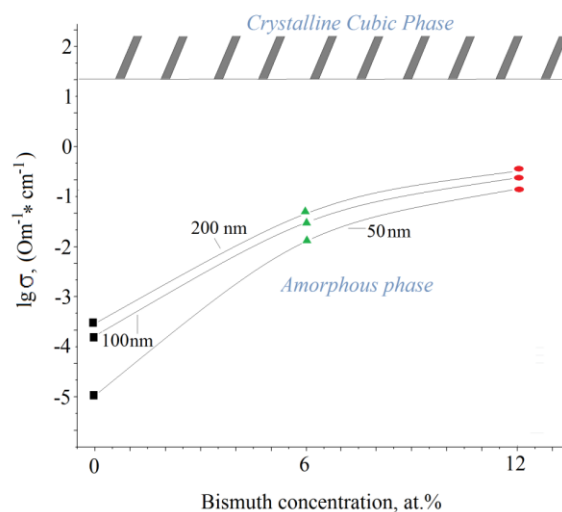
Висмут қоспасының пленкалардың электрондық қасиеттеріне әсер ету механизмін түсіндіру үшін [26]-да ұсынылған модельдік тұжырымдамаларға жүгінуге болады. Осы модельдік концепцияларға сәйкес, модификация кезінде висмут атомдарының бір бөлігі Bi-Te-, Bi-Ge, Bi-Sb матрицасының атомдарымен химиялық байланыс түзеді және электрлік белсенді емес болады. Химиялық байланыстар арасында Bi-Te байланыстары басым, өйткені бұл байланыстың энергиясы минималды мәнге ие және тұрақты Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> қосылысы белгілі. Висмут қоспасының концентрациясының жоғарылауымен оптикалық тыйым салынған аумақтың ені E<sub>g</sub> төмендейді. Ферми деңгейі қоспа концентрациясының жоғарылауымен оптикалық тыйым салынған аумақтың шамамен ортасында бекітілген болғандықтан, E<sub>g</sub> төмендеуі өткізгіштіктің активация энергиясының төмендеуіне және соның салдарынан өткізгіштіктің жоғарылауына әкеледі.

Айта кету керек, [27]-ші теориялық жұмыста молекулалық динамика әдісін қолдана отырып, Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> құрамының электрондық күйлерінің спектріне висмут қоспасының әсерін зерттеу жүргізілді. Қабықшалардағы висмут концентрациясының жоғарылауымен өткізгіштік зонаның энергетикалық жиегінің түзілуі висмут атомдарының бір электрондарының антибайланыс күйлерінен, оптикалық тыйым салынған аумақтың ені азаюына және өткізгіштік р-типтен n-типке ауысуы байқалған.

Қазіргі уақытта халькогенидті жартылай өткізгіштердегі «шыны-кристалдық» фазалық ауысуға байланысты ауысу эффектісінің механизмін түсіндірудің жалпы қабылданған тәсілі - өздігінен зарядталғанның қатысуымен ауысу кезінде токтың қысылуының электронды-термиялық механизмге негізделген тәсіл. [28]. Электрондық-термиялық модельге негізделген ауысу эффектісі бойынша соңғы теориялық жұмыстарда ХШЖӨ негізіндегі жад ұшықтарының жұмысының тиімділігін арттыру үшін ауысу кезінде ток сымдындағы температура тұрақты алтыбұрышты поликристалды фаза түзелетін материалдың кристалдану Thex температурасына жақын мәндерге ие болу керек. Халькогенидті жартылай өткізгіштің Thex кристалдану температурасын оның құрамын өзгерту арқылы өзгертуге болады. Екінші жағынан, ионды-плазмалық

бірлесе шашырату әдісін қолдану арқылы ХШЖӨ қоспасының модификациясы негізгі жартылай өткізгіш параметрлерінің кең ауқымды өзгерістерімен аморфты материалдарды алуға мүмкіндік береді. Сондай-ақ, сәйкес өзгертуші қоспаны және оның концентрациясын таңдау арқылы Thex кристалдану температурасын бақылауға болады.

Модификацияланған Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub><Bi> қабықшалардағы ауысу эффектісі параметрлерінің тәжірибе жүзінде байқалған жақсаруын түсіндіру үшін 6-суретте көрсетілген Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub><Bi> қабықшаларының өткізгіштігінің концентрацияға тәуелділіктерін қарастырайық. Сол суретте текшелік метатұрақты кристалдық фазаның пайда болуымен Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> қабықшаларының кристалдануына сәйкес келетін өткізгіштік шекарасы көрсетілген.



6-сурет. Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> және Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub><Bi> қабықшалар өткізгіштігінің қоспа концентрациясына тәуелділігі

Суреттен шығатыны, модификацияланған Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub><Bi> пленкаларында өткізгіштіктің айтарлықтай жоғарылауы орын алады себебі металдық висмуттың окшауланған монокристалды нанодомендері қабықшалардың кристалды емес матрицасында болады. Зерттелетін висмут қоспаларының концентрацияларының диапазонында Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub><Bi> қабықшаларында өткізгіштіктің перколяциялық ауысуы байқалмағандықтан, мұндай құрылымның өткізгіштігінің жоғарылауы химиялық заттардың түзілуіне байланысты матрицаның өткізгіштігінің артуы есебінен болады, висмут қоспасының бір бөлігімен матрица атомдарымен байланысады. Мұндай жүйенің аморфты күйден кристалдық күйге электрлік импульс әсерінен өтуі таза Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> қабықшаларының кедергісі жоғары матрицасының ауысуынан әлдеқайда қысқа мерзімде өтетіндігі анық.

Осылайша, Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub><Bi> қабықшаларының электрондық қасиеттерін зерттеу нәтижесінде жартылай өткізгіштердің негізгі сипаттамалары мен ауысу эффектінің параметрлерін түрлендіруші қоспаның концентрациясын және Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub><Bi> қабықшаларының қалыңдығын өзгерту арқылы басқаруға болатыны анықталды.

## Алғыс айту

Нұрлан Алмас Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің (Грант № AP13268877) «Жердің жасанды спутниктерінің радиацияға төзімді электронды компоненттерін өндіру технологиясын әзірлеу» докторантурадан кейінгі стипендиялық бағдарламасына алғыс айтады. Нұрхат Жакиев Ислам Даму Банкінің (ID2021-588606) стипендиялық бағдарламасына алғыс айтады.

## Әдебиеттер / References

- [1] Kolobov, A. V., Fons, P., Tominaga, J., Frenkel, A. I., Ankudinov, A. L., Yannopoulos, S. N., ... & Uruga, T. (2005). Why phase-change media are fast and stable: a new approach to an old problem. *Japanese journal of applied physics*, 44(5S), 3345
- [2] Rodgers, J., Maimon, J., Storey, T., Lee, D., Graziano, M., Rockett, L., & Hunt, K. (2008, November). A 4-mb non-volatile chalcogenide random access memory designed for space applications: Project status update. In *2008 9th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS)* (pp. 1-6). IEEE
- [3] Kanda, N., Thakur, A., Singh, F., & Singh, A. P. (2021). Radiation hardness of Ge {2} Sb {2} Te {5} thin films to 80 MeV Si ion irradiation. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 176(9-10), 896-905
- [4] Maimon, J. D., Hunt, K. K., Burcin, L., & Rodgers, J. (2003). Chalcogenide memory arrays: Characterization and radiation effects. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(6), 1878-1884
- [5] Liang-Cai, W. U., Bo, L., Zhi-Tang, S., Gao-Ming, F., Song-Lin, F., & Bomy, C. (2006). Total dose radiation tolerance of phase change memory cell with GeSbTe alloy. *Chinese Physics Letters*, 23(9), 2557
- [6] Bernacki, S., Hunt, K., Tyson, S., Hudgens, S., Pashmakov, B., & Czubytyj, W. (2000). Total dose radiation response and high temperature imprint characteristics of chalcogenide based RAM resistor elements. *IEEE Transactions on nuclear science*, 47(6), 2528-2533
- [7] Anderson, P. W. (1975). Model for the electronic structure of amorphous semiconductors. *Physical Review Letters*, 34(15), 953
- [8] Zhao, R., He, M., Wang, L., Chen, Z., Cheng, X., Tong, H., & Miao, X. (2022). Improved multilevel storage capacity in Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>-based phase-change memory using a high-aspect-ratio lateral structure. *Science China Materials*, 1-8
- [9] Mocanu, F. C., Konstantinou, K., Lee, T. H., Bernstein, N., Deringer, V. L., Csányi, G., & Elliott, S. R. (2018). Modeling the phase-change memory material, Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>, with a machine-learned interatomic potential. *The Journal of Physical Chemistry B*, 122(38), 8998-9006
- [10] Ovshinsky, S. R. (1968). Reversible electrical switching phenomena in disordered structures. *Physical review letters*, 21(20), 1450
- [11] Shao, R., Zheng, K., Chen, Y., Zhang, B., Deng, Q., Jiao, L., ... & Han, X. (2016). Direct observation of structural transitions in the phase change material Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(39), 9303-9309
- [12] Nirschl, T., Phipp, J. B., Happ, T. D., Burr, G. W., Rajendran, B., Lee, M. H., ... & Lam, C. (2007). Write strategies for 2 and 4-bit multi-level phase-change memory. *IEDM Tech*
- [13] Burr, G. W., Tchoulfian, P., Topuria, T., Nyffeler, C., Virwani, K., Padilla, A., ... & Lee, B. S. (2012). Observation and modeling of polycrystalline grain formation in Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>. *Journal of Applied Physics*, 111(10), 104308
- [14] Prikhodko, O., Almasov, N., Dyussebayev, S., Maksimova, S., Ushanov, V., Tsendin, K., & Nesterov, S. (2013). Bismuth impurity influence on electronic properties of amorphous As<sub>40</sub>Se<sub>30</sub>S<sub>30</sub> films. *Chalcogenide Letters*, 10(12)
- [15] Mott, N. F., & Davis, E. A. (2012). *Electronic processes in non-crystalline materials*. Oxford university press
- [16] Matsunaga, T., Kojima, R., Yamada, N., Kifune, K., Kubota, Y., Tabata, Y., & Takata, M. (2006). Single structure widely distributed in a GeTe–Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> pseudobinary system: a rock salt structure is retained by intrinsically containing an enormous number of vacancies within its crystal. *Inorganic chemistry*, 45(5), 2235-2241
- [17] Wuttig, M., Lüsebrink, D., Wamwangi, D., Welnic, W., Gilleßen, M., & Dronskowski, R. (2007). The role of vacancies and local distortions in the design of new phase-change materials. *Nature materials*, 6(2), 122-128
- [18] Kolobov, A. V., Fons, P., Tominaga, J., & Ovshinsky, S. R. (2013). Vacancy-mediated three-center four-electron bonds in GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> phase-change memory alloys. *Physical Review B*, 87(16), 165206
- [19] Tong, F., Hao, J. H., Chen, Z. P., Gao, G. Y., & Miao, X. S. (2011). Phase-change control of ferromagnetism in GeTe-based phase change magnetic thin-films by pulsed laser deposition. *Applied Physics Letters*, 99(8), 081908
- [20] Wang, K., Wamwangi, D., Ziegler, S., Steimer, C., & Wuttig, M. (2004). Influence of Bi doping upon the phase change characteristics of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>. *Journal of applied physics*, 96(10), 5557-5562
- [21] Kozyukhin, S., Veres, M., Nguyen, H. P., Ingram, A., & Kudoyarova, V. (2013). Structural changes in doped Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> thin films studied by Raman spectroscopy. *Physics Procedia*, 44, 82-90
- [22] Приходько О.Ю., Дюсембаев С.А., Турманова К.Н., Алмасов Н.Ж., Цэндин К.Д. Эффекты переключения и памяти в частично кристаллизованных аморфных пленках Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> // Межд. Науч. Конф., посв. 75-ю академика Абдильдина М. М. «Актуальные проблемы современной физики». – Алматы: 2013. – С. 132
- [23] Богословский, Н. А., & Цэндин, К. Д. (2012). Физика эффектов переключения и памяти в халькогенидных стеклообразных полупроводниках. *Физика и техника полупроводников*, 46(5), 577
- [24] Фефелов, С. А., Казакова, Л. П., Козюхин, С. А., Цэндин, К. Д., Арсова, Д., & Памукчиева, В. (2014). Особенности вольтамперных характеристик в тонких пленках состава Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> при использовании измерительной цепи с источником тока. *Журнал технической физики*, 84(4), 80-84
- [25] Разработка фундаментальных физических подходов для получения наноразмерных ячеек памяти с новыми свойствами для записи информации на основе модифицированных халькогенидных стеклообразных полупроводников: отчет по НИР (заключительный)

- /НИИЭТФ КазНУ им.аль-Фараби: рук. Приходько О.Ю.; исполн. Цэндин К.Д., Дюсембаев С.А. и др. – Алматы. 2014. – 73 с. -№ГР 0112РК02877. –Инва. №0214РК02787
- [26]Сарсембинов, Ш. Ш., Приходько, О. Ю., & Максимова, С. Я. (2005). Физические основы модификации электронных свойств некристаллических полупроводников. Алматы: КазНУ им. аль-Фараби
- [27]Skelton, J. M., & Elliott, S. R. (2013). In silico optimization of phase-change materials for digital memories: a survey of first-row transition-metal dopants for Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 25(20), 205801
- [28]Цэндин К.Д. Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках. – СПб.: Наука, 1996. – 485 с

## Висмут қоспасы бар радиацияға төзімді наноөлшемді GE<sub>2</sub>SB<sub>2</sub>TE<sub>5</sub> қабықшалардағы ауысу және жады эффектісінің ерекшеліктері

Н. Алмас<sup>1\*</sup>, Н. Жакиев<sup>1</sup>, С. Дюсембаев<sup>2</sup>, А. Алдонгаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Astana IT University, Astana, Қазақстан

<sup>2</sup>Kazatomprom, Волковгеология АҚ, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Л.Н.Гумилев атындағы Еуразиялық ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [n.almas@astanait.edu.kz](mailto:n.almas@astanait.edu.kz)

**Андатпа.** Кристалды емес материалдардың физикасы мен технологиясы конденсацияланған заттар физикасының, материалтану мен нанотехнологияның қарқынды дамып келе жатқан бағыттарының бірі болып табылады. Кристалдық емес құрылымы бар материалдардың алуан түрлілігінде ауысу эффектісі, фотоқұрылымдық түрлендірулер сияқты бірегей қасиеттері мен құбылыстары бар халькогенидті шыны тәрізді жартылай өткізгіштер (ХШЖӨ) класы ерекше орын алады. Ауысу эффектісі ХШЖӨ жұқа қабықшаларында байқалады және кернеу импульстерінің немесе лазерлік сәулеленудің әсерінен құрылымның шыны күйден кристалдық күйге жылдам қайтымды фазалық ауысуымен байланысты. Осы әсердің негізінде жоғары өнімділігі мен сенімділігі бар РСМ (Phase Change Memory) сияқты тұрақты жадты сақтау құрылғылары үшін ақпарат тасымалдаушылардың жеке класы қалыптасты. РСМ құрылғыларында қолдануға арналған материалдар GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> квазибинарлы кесу сызығында жатқан күрделі композициялардың ХШЖӨ болып табылады, ал Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> композициясының жұқа қабықшалары РСМ құрылғыларында пайдалану үшін ең перспективалы болып табылады. ХШЖӨ негізінде мұндай функционалдық материалдардың электрондық қасиеттерін бақылау мүмкіндігі олардың қолдану аясын айтарлықтай кеңейтеді және маңызды ғылыми және практикалық мәселе болып табылады, өйткені кристалдық жартылай өткізгіштердің электрондық қасиеттерін мақсатты түрде өзгертудің дәстүрлі әдістері, мысалы, синтез кезінде қоспалау немесе термиялық диффузия әдісі ХШЖӨ үшін тиімсіз болып шықты. Жоғарыда көрсетілген әдістермен төмен концентрацияларда ХШЖӨ-ге енгізілген қоспалар, әдетте, электрлік белсенділік көрсетпейді, өйткені олар өздерінің зарядталған құрылымдық ақауларымен өтеледі, ал қоспа концентрациясының жоғарылауы айтарлықтай кристалдануға әкеледі. Жұмыста тұрақты ток режимінде ионды-плазмалық тозаңдату әдісімен алынған висмут қоспасының үлесі 12 ат. %-дан артатын Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> наноөлшемді қабықшалардың атомдық құрамы сканирлеуші электрондық микроскопта энерго-дисперсиялық талдау арқылы зерттелді. Сонымен қатар, ультракороткы вольт-амперлік сипаттамалары өлшенді. Ауысу және жады эффектісін сипаттайтын ауысу кернеуі мен уақыты қабықшаның қалыңдығына және қоспаға елеулі түрде тәуелді екені анықталды. Висмут қоспасы қабықшалардың ауысу уақытын t<sub>sw</sub> төмендетеді. Қабықшаның қалыңдығын азайту шекті кернеудің және ауысу уақытының төмендеуіне әкеледі. Бұл жұмыстың нәтижелері фазалық өзгерістер материалдарына негізделген оптикалық жадты дамыту үшін пайдалы деп еспетейміз.

**Негізгі сөздер:** радиациялық төзімділік, ионды-плазмалық тозаңдату, наноөлшемді қабықша, атомдық құрылымы, фазалық ауысу, ауысу эффектісі, жады.

## Особенности эффекта переключения и памяти в легированных висмутом радиационно-стойких наноразмерных пленках GE<sub>2</sub>SB<sub>2</sub>TE<sub>5</sub>

Н. Алмас<sup>1\*</sup>, Н. Жакиев<sup>1</sup>, С. Дюсембаев<sup>2</sup>, А. Алдонгаров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Astana IT University, Astana, Казахстан

<sup>2</sup>Kazatomprom, АО Волковгеология, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [n.almas@astanait.edu.kz](mailto:n.almas@astanait.edu.kz)

**Аннотация.** Физика и технология некристаллических материалов — одно из бурно развивающихся направлений физики конденсированного состояния, материаловедения и нанотехнологий. Среди многообразия материалов с некристаллической структурой особое место занимает класс халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) с



уникальными свойствами и явлениями, такими как эффект переключения, фотоструктурные превращения. Эффект переключения наблюдается в тонких пленках ХСП и связан с быстрым обратимым фазовым переходом структуры из стеклообразного состояния в кристаллическое под действием импульсов напряжения или лазерного излучения. На основе этого эффекта сформировался отдельный класс носителей информации для энергонезависимых запоминающих устройств типа РСМ (Phase Change Memory) с высокими показателями производительности и надежности. Материалами для использования в устройствах РСМ являются ХСП сложных составов, лежащих на квазибинарной границе  $\text{GeTe-Sb}_2\text{Te}_3$ , а тонкие пленки состава  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  являются наиболее перспективными для использования в устройствах РСМ. Возможность управления электронными свойствами таких функциональных материалов на основе ХСП значительно расширяет сферу их применения и является важной научной и практической задачей, поскольку традиционные методы целенаправленного изменения электронных свойств кристаллических полупроводников, такие как легирование в процессе синтеза или метод термодиффузии оказались неэффективными для ХСП. Примеси, введенные в ХСП в малых концентрациях указанными выше способами, обычно не проявляют электрической активности, так как компенсируются их заряженными структурными дефектами, а увеличение концентрации примеси приводит к значительной кристаллизации. В данной работе методом энергодисперсионного анализа на сканирующем электронном микроскопе был исследован атомный состав наноразмерных пленок  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  с содержанием висмута более 12 ат.%, полученных методом ионно-плазменного напыления в режиме постоянного тока. Кроме того, были измерены вольт-амперные характеристики образцов. Установлено, что напряжение перехода и время, характеризующие эффект переключения и памяти, существенно зависят от толщины пленки и состава. Добавление висмута уменьшает время переключения пленок. Уменьшение толщины пленки приводит к уменьшению порогового напряжения и времени переключения. Мы считаем, что результаты этой работы полезны для разработки оптической памяти на основе материалов с фазовым переходом.

**Ключевые слова:** радиационная стойкость, ионно-плазменное напыление, наноразмерная пленка, атомная структура, фазовый переход, эффект переключения, память.