

Висмут селенидінің екі өлшемді атомдық кристалының үлкейтілген көлемдегі наноқабыршығын жасау

М. Есжанұлы¹, Б. Бектурғанқызы¹,
Д.Х. Қамысбаев^{2*}, Б.А. Серікбаев²,
Ә.Қ. Қоқанбаев²

¹Іле педагогикалық университеті,
Құлжа, Қытай

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық
университеті, Алматы, Қазақстан
*E-mail: d.kamysbayev@mail.ru

Мақалада «газ-қатты» механизмін қолдану арқылы слюда матрицасында қалыңдығы 3-4 нм висмут селенидінің үлкейтілген қабыршықтары жасалынды. 2004 жылы екі өлшемді атомдық графен кристалданының байқалуынан бастап екі өлшемді атомды кристалдық наноқабыршықтарды жасау әдістерін зерттеуге ғалымдардың қызығушылығы артауда. Олардың ішінде молибден сульфиді, вольфрам селениді, висмут селениді сияқты ауыспалы металдардың сульфидтері мен селенидтері ерекше қызығушылық тудыруда. Висмут селенидінің ерекше термоэлектрлік, фотоэлектрлік қасиеттері болғандықтан оны термоэлектрлік құрылғылар, фотосезімтал элементтер, оптикалық ақпарат сақтағыштар және т.б салаларда қолдану мүмкіншіліктері кең. Мақалада висмут селенидін алудың әдісі ретінде соңғы кезде көп қолданылатын «газ-сұйықтық-қатты» (Г-С-Қ) механизмінің бір түрі пайдаланған. Матрица ретінде аморфты кремний диоксиді қолданғанда алынған висмут селениді біртекті емес, ал үдерісті меңгеру қиынға соғады. Сондықтан жұмыста матрица ретінде фторланған алтынды слюда пайдаланылды. Қабыршық өлшемі, формасы және қалыңдығына температураның, газдың беру жылдамдығының әсері зерттелді.

Түйін сөздер: висмут селениді; слюда; екі өлшемді атомдық кристал.

Получение нанопленок двухмерного атомного кристалла селенида висмута увеличенной площади

М. Есжанұлы¹, Б. Бектурғанқызы¹,
Д.Х. Камысбаев^{2*}, Б.А. Серікбаев²,
А.К. Коканбаев²

¹Илийский педагогический университет,
Кулжа, Китай

²Казахский национальный университет
имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
*E-mail: d.kamysbayev@mail.ru

В статье исследован синтез селенида висмута толщиной 3-4 нм на поверхности слюды, взятой в качестве матрицы, с использованием механизма «газ-твердое». С момента обнаружения в 2004 году двухмерных атомных кристаллов графена у ученых растет интерес к исследованию методов синтеза двухмерных атомных кристаллических нанопленок. Среди них особый интерес вызывают сульфиды и селениды переходных металлов, такие как сульфид молибдена, селенид вольфрама, селенид висмута. Селенид висмута обладает особыми термоэлектрическими, фотоэлектрическими свойствами, поэтому широки возможности его применения в таких областях как термоэлектрические устройства, фоточувствительные элементы, оптические хранители информации и др. В связи с этим немало исследований, посвященных поиску оптимальных методов синтеза селенида висмута. Каждый из предлагаемых методов имеет свои преимущества и недостатки. В статье в качестве метода синтеза селенида висмута использована разновидность широко используемого в последнее время механизма «газ-жидкое-твердое» (V-L-S). При использовании в качестве матрицы аморфного диоксида кремния синтезируемый селенид висмута получается неоднородным, а сам синтез является неуправляемым. Поэтому в работе в качестве матрицы использована фторированная золотая слюда. Исследовано влияние температуры, скорости подачи газа на размеры, форму и толщину пленки.

Ключевые слова: селенид висмута; слюда; двухмерный атомный кристалл.

Preparation of two-dimensional atomic crystal nanofilm of bismuth selenide of a large area

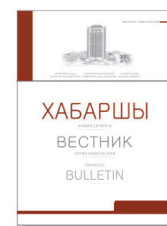
М. Esjan¹, В. Bekturgan¹,
D.H. Kamysbayev^{2*}, B.A. Serikbaev²,
A.K. Kokanbaev²

¹Ili Pedagogical University, Kulzha, China




²Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan
*E-mail: d.kamysbayev@mail.ru

A synthesis of bismuth selenide with a thickness of 3-4 nm on the surface of mica taken as a matrix was investigated using the gas-solid mechanism. Since discovery of two-dimensional atomic crystals of graphene in 2004, scientists have grown interested in exploring methods for synthesis of two-dimensional atomic crystal nanofilms. Among them, of particular interest are sulfides and transition metal selenides, such as molybdenum sulfide, tungsten selenide, bismuth selenide. Bismuth selenide possesses special thermoelectric, photoelectric properties, therefore there are wide possibilities for its use in such areas as thermoelectric devices, photosensitive elements, optical information keepers, etc. In this connection, there are many studies on the search for optimal methods for the synthesis of bismuth selenide. Each of the proposed methods has its own advantages and disadvantages. In the article, a variety of the recently used gas-liquid-solid mechanism (V-L-S) is used as a method for the synthesis of bismuth selenide. When using amorphous silicon dioxide as a matrix, the synthesized bismuth selenide is not uniform, and the synthesis process is uncontrollable. Therefore, in the work fluorinated gold mica was used as a matrix. The effect of temperature, gas feed rate on the size, shape and thickness of the film was investigated.

Keywords: bismuth selenide; mica; two-dimensional atomic crystal.



Висмут селенидінің екі өлшемді атомдық кристалының үлкейтілген көлемдегі наноқабыршығын жасау

М. Есжанұлы¹, Б. Бектұрғанқызы¹, Д.Х. Қамысбаев^{2*} ,
Б.А. Серікбаев² , Ә.Қ. Қоқанбаев² 

¹Іле педагогикалық университеті, Құлжа, Қытай

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*E-mail: d.kamysbayev@mail.ru

1. Кіріспе

Көршілес атомдары күшті болған ортақ валенттік байланыс арқылы бірігіп тор формалы құрылымда түзілген кристал атомдық кристал деп аталады. Наноматериалдар, немесе ең кем болғанда бір өлшемді, ұзындығы 1-100 нанометр аумағында болған материалдар, беттік эффект, кіші өлшемді эффект, квант өлшемді эффект, макроквантты тоннельді эффект сияқты қасиеттерден басқа жарық, дыбыс, сәуле, магниттілік сияқты қасиеттер де көрсететіндіктен олардың электроника, ақпараттық технологиялар, энергетика, жаңа материалдар жасау, катализ, биология және медицина саласында кең көлемде қолданылу болашағы зор. Наноматериалдардың кеңістіктегі өлшемі оның әртүрлі қасиеттеріне тікелей әсер етеді, наноматериалдар кеңістіктегі өлшемінің ұқсамауына қарай екі өлшемді, бір өлшемді, нөл өлшемді наноматериалдар деп үш түрге бөлінеді.

2004 жылы екі өлшемді атомдық кристал графеннің байқалуы [1] мамандардың наноқабыршық сияқты екі өлшемді атомдық кристал материалдарын жасауға болатын зерттеу қызығушылығы арта түсті. Басқа өлшемдегі наноматериалдармен салыстырғанда, екі өлшемді наноматериалдардың матрицалық қуаты мығым, электрондар екі өлшемді жазық бетте еркін қозғалатындықтан [1-3], классикалық электрон шоғырын түсіру әдісі арқылы одан ерекше түрдегі электроникалық бөлшектер жасауға болады.

Екі өлшемді атомдық кристалдардың кристалдық құрылымы әртүрлі болады. Осылардың ішінде, ауыспалы металдардың сульфидті және селенидті қосылыстары, мысалы молибден сульфиді, вольфрам селениді, висмут

селениді өзіндік ерекше қасиеттерімен мамандардың назарын аударуда. Висмут селениді (Bi_2Se_3) мен висмут теллурид (Bi_2Te_3) болса V-VI тобындағы ең маңызды жартылай өткізгіш материалдар, олар алты жақты қабатталған құрылымы болған ұқсастыққа ие, әрі көршілес кристалдық тор константалар айырмашылығы кіші, (висмут селениді $a = 0,414$ нм, висмут теллурид $a = 0,438$ нм. Әрбір қабаттағы материалдың қалыңдығы шамамен 1 нм, қабаттар ішінде ортақ валенттік байланыс арқылы Se-Bi-Se-Bi-Se немесе Te-Bi-Te-Bi-Te бес қабатты атомнан құралған, ал әр қабаты біршама әлсіз болған вандервальс күші арқылы жалғанған. Олардың кристал торларының ұқсастығы висмут селениді (Bi_2Se_3) мен висмут теллуридін (Bi_2Te_3) қасиеттерімен қолданылуының ұқсастығын тудырады, әрі екеуін өзара тығыз бірлестіру арқылы құрылымы өзгеше болатын материал жасауға тиімді жағдай тудырады [4-5].

Висмут селениді ерекше термоэлектрлік, фотоэлектрлік қасиетке ие, сондықтан термоэлектрлік қондырғылар, фотосезімтал элементтер, фотоэлектронды құрылғылар мен оптикалық ақпарат сақтағыш материалдарды жасау салаларында кең көлемде қолданылу мүмкіндігі өте зор [6]. Қабатталған түрдегі висмут селениді болса бір түрлі саңылауланған жартылай өткізгіш материал болғандықтан жоғары дәрежедегі қасиетке ие, инфрақызыл детектор және термоэлектрлік материалдар жасауға қолданылады. Соңғы жылдары висмут селенидінің өзгеше топологиялық изолятор екендігі дәлелденді, ол құрылымында саңылау болған әрі дара күйдегі Дирак конусынан құралған металдық қасиетті бетке ие [5, 7-8]. Нақтырақ айтқанда висмут селениді дара күйдегі Дирак конусты беттік күйін екі өлшемді графеннің

төрт дана Дирак конусының төрттен бірі деуге болады. Беттік күйі ерекше өткізгіштік тасымалдағыш қасиетке ие, тасымалдаудағы қозғалғыштығы $6000 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1}\text{c}^{-1}$ -қа жетеді, Ферми жылдамдығы $5 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [5,9]. Соңғы уақыттарда Aharonov-Bohm тербелісі арқылы висмут селенидінің нанотаяқшасынан байқалған жаңалық – бұл топологиялық изоляторда болмаған беттік күйге байланысты кванттық интерференцияның тұңғыш рет байқалуы [10].

Қазірге кезге дейін ғалымдар висмут селенидін дайындау әдісі туралы көптеген зерттеу жүргізді. Молекулалық шоғыр эпитаксия (MBE) технологиясын қолдану арқылы, Цинхуа университетінің Шуе Ци Кун зерттеу тобы қалыңдығы шамамен 50-80 нм, атом дәрежесіндегі жоғары сапалы висмут селениді [11] мен висмут теллуридінің [12] қабыршықтарын жасаған. Жасалған висмут селениді мен висмут теллуридінің дара кристалды қабыршығы жоғары сапалы болғанымен, жасалу шарт-жағдайы өте жоғары вакуумдық ортаны қажет етеді, әрі қолданылатын қондырғының бағасы өте жоғары.

Графенді жасау әдістерінің бірі болған [1], микро-механикалық ажырату әдісі арқылы да висмут селенидін жасауға болады. D. Teweldebrhan қатарлылар микромеханикалық ажырату әдісі арқылы қабат саны ретсіз әрі жұқалық дәрежесі 1 нм болатын ең жұқа жапырақшасы жасалған [13]. Бұл әдістің артықшылығы қарапайым, әрі қолдануға ыңғайлы, кемшілігі механикалық ажырату барысы өте ретсіз болғандықтан, ажыратып алынған жұқа жапырақшаның қабат санын, формасын, өлшемін, бағытын және өнімділігін реттеу ыңғайсыз.

Висмут селениді мен висмут теллуриді тектес қосылыстардың нөл өлшемді материалдарын сұйық фазада синтездеу зерттеулерімен салыстырғанда, висмут селениді мен висмут теллуриді екі өлшемді наноқұрылымды материалдарын сұйық фазада синтездеп, зерттеу нәтижелері өте аз. D. Wang [14], G. Zhang [15] гидротермалдық әдіс арқылы жеке-жеке ұзындығы 200-400 нм, қалыңдығы 40 нм болатын висмут селениді мен висмут теллуридінің алты қырлы жұқа жапырақшасын жасаған, бірақ реакция жүру үшін жоғары температура, жоғары қысымды жабық орта қажет.

Газ-сұйық-қатты (V-L-S) механизмінің газ фазадан қатты фазаға айналдыру әдісі қазіргі кезде төмен өлшемді наноматериалдарды өсірудің үнемі қолданылатын әдісі болып табылады. Бұл әдісте бастапқы зат қыздыру арқылы газға айналады, содан соң матрицадағы нанотүйіршікті метал сияқты катализаторлардың әсерінен ортақ балқу нүктесіне ие сұйық күйдегі затқа айналып, соңынан бірте-бірте үлкейіп қатты күйдегі кристалға айналады. Nailin Peng, Yi Cui [10, 16-18] осы әдіс (V-L-S) арқылы формасы біркелкі болатын висмут селениді мен висмут теллуридінің наносызықша, наножолақты құрылымдарын өсіріп жасаған, әрі олардың электрлік қасиеттерін зерттеп, Bi_2Se_3 төмен өлшемді материалдың топологиялық беттік күйінің АВ эффекті мен басқа да кванттық ерекше қасиеттерін тұңғыш рет зерделеген.

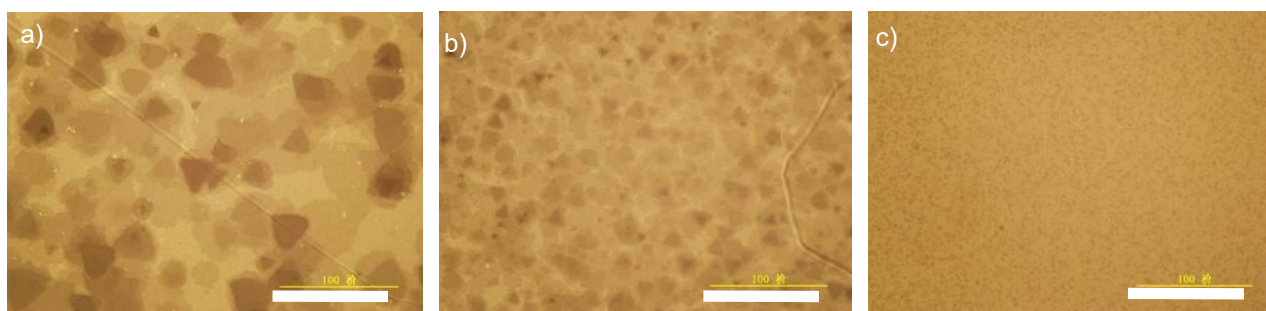
Оқшаулағыш матрицада висмут селениді мен висмут теллуриді төмен дәрежелі наноматериалдарын жоғары сапада тікелей өсіру, топологиялық изолятордың топологиялық сыртқы бет күйінің электрлік транспорттық қасиетін тікелей зерттеуге мүмкіндік береді. Пекин университетінің профессорлары Nailin Peng және Zhongfan Liu зерттеу тобы мен Стенфорд университетінің Yi Cui зерттеу тобы бірлесіп [4], газ-қатты (V-S) өсіру механизмін қолдану арқылы SiO_2 оқшаулағыш матрицасында қалыңдығы 3 нм-ге дейін болатын жұқа, кеңдігі бірнеше микрометрге жететін висмут селениді мен висмут теллуридінің наножапырақшасын дайындаған.

Жоғардағы көрсетілген әдебиеттерден, висмут селениді материалының қолданылуы мен болашағы зор екенін, ғылымның дамуы мен қоғам дамуына теориялық және ісжүзіндік маңызды екенін байқауға болады. Соңғы кездегі зерттеу нәтижелеріне сүйенсек, висмут селенидінің кристалдық құрылымы мен матрицаға қолданылған кремний қос тотығының кристалсыз күйі сәйкес келмейді, дайындалған наножолақтарының түрі, бағыты, өлшемі біркелкі емес, меңгермелі сәйкестіруге үйлеспейді, сондықтан біз матрица ретінде слюданы қолдану арқылы жаңа түрдегі висмут селенидінің екі өлшемді атомдық кристалын дайындаудың жаңа әдісін қолдандық [19].

2. Тәжірибелік бөлім

Тәжірибеде қолданылатын висмут селениді ұнтағын (99,999%) “Alfa Aesar” компаниясы қамдады. Матрица ретінде қолданылатын фторлы алтын слюдасы (молекулалық формуласы $\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]\text{F}_2$) көлемі 10 мм × 10 мм, қалыңдығы 0,05-0,1 мм, жаңадан дайындалған. Висмут селениді наноматериалы (Thermo Scientific Lindberg/Blue M TF55035KC-1, АҚШ) қондырғысында дайындалды. Висмут селенидінің наноматериалының құрылымдық сипаттамаларын анықтауда оптикалық микроскоп (Olympus, DX-51, Жапония), сканерлеуші электронды микроскоп (SEM, Hitachi S-4800, Жапония), атомдық күштік микроскоп (Bruker Atomic Force Microscope (AFM), АҚШ) және UV-VIS, (Transmission electron microscope (TEM)), Scanning Tunneling Microscope (STM), Raman спектрометрі (HORIBA LabRAM HR800, АҚШ) аппараттарында анализ жасалды.

Висмут селенидінің наноматериалын дайындау диаметрі 30 см кварц құбыр пеште (Lindberg/BlueM) жүргізілді. Әр екі тәжірибеде 0,2 г висмут селениді ұнтағын өлшеп алып, бу қайнары есебінде құбыр пештегі кварц құбырының дәл орталығына қойылады. Аргон тасығыш газ ретінде буланған газды пештің температурасы ең төмен орнына апарды. Содан соң жаңадан аршып алған фторлы алтын слюда жапырақшасы кварц құбырының ішіндегі белгілі бір орынға қойылады (нақты орны температурға қарай сәйкестендіріледі). Мұздатқыш қондырғыға көлемінің 1/2-дей изопропил спиртіні құйып, артынан көп мөлшерде көпіршік шықпағанша, әрі араласпа зат



a) 12 см; b) 13 см; c) 14 см, масштаб: 100 мкм

1-сурет – Түзілу температурасы 490°C, газ ағу жылдамдығы 500 мл/мин болатын, өзгермелі температура аумағында өскен висмут селенидінің оптикалық микроскоп арқылы байқалған суреті

қоюланғанға дейін құрғақ мұз (CO_2) салынады. Вакуумды сорғы іске қосылып, кварц құбыры ішіндегі қысым 100 мм.с.б. дейін төмендетілген соң вакуумды сорғы бекітіліп газ жолы ашылады да, аргон газы толтырылады. Бұл үдеріс 3-4 рет қайталанып оттегінің қалдықтары сыртқа толық шығарылады. Аргон газының ағу жылдамдығы 30-90 мл/мин аумағына, қысымы 50 мм.с.б тұрақтанғаннан соң пеш қосылады, температура 490°C-ге көтеріліп 1 минуттан кейін қыздыру тоқтатылып, пеш бөлме температурасына дейін суытылады.

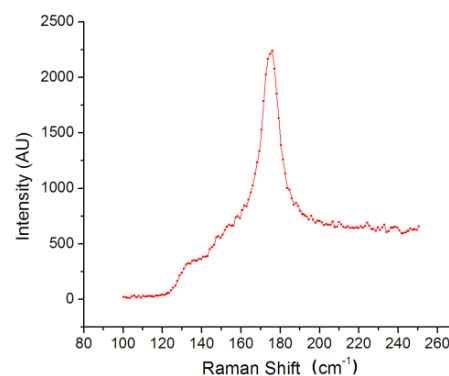
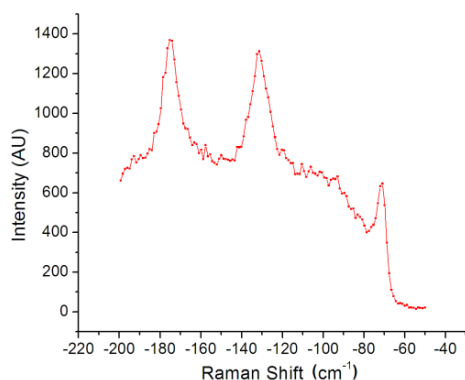
3. Нәтижелерді талқылау

Жұмыста температура 490°C, газ ағу жылдамдығы 500 мл/мин болатын шарт-жағдайды ұстана отырып уақыттың өзгеруіне сәйкес матрица (төсеніш) затының бетінде өсу жағдайы тексерілді. Нәтижесінде, матрицалық заттың бетінде өсу уақыты 40 мин, температура жоғары көтеріліп қайтадан өздігінен төмендеп 490°C-ге келгенде, қашықтығы құбыр пештің дәл орталығынан 12-15 см болған өзгермелі

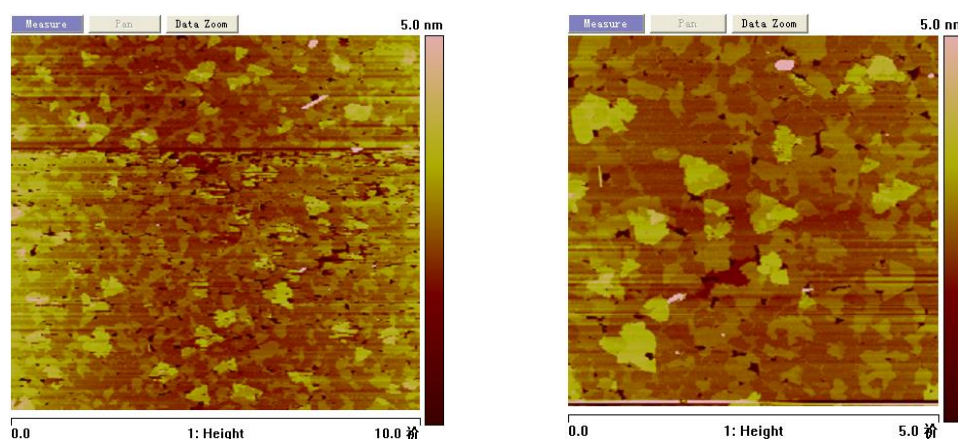
температура аумағында, көзбен көруге болатындай металдық жалтыр жолақтар пайда болғандығы байқалады (1-сурет). 1-суреттен құбыр пештің дәл орталығынан қашықтаған сайын пайда болған ноқаттар көбейеді, бірақ әрбір ноқаттан өсіп шыққан висмут селениді барған сайын кішірейіп отырады. 15 см аралыққа қойылған үлгідегі пайда болған ноқат, оптикалық микроскоп арқылы анық көрінбейді, бірақ үлгінің азда болса сұрғылт түске өзгергені, әрі жартылай мөлдірге айналғаны байқалады. Соның Раман спектрінің ерекшелігін тексергенімізде, 2-суретте көрсетілгендей висмут селенидінің ерекшелігі Раман сигналында өте анық көрінеді.

Атомдық күштік микроскопы (AFM) арқылы оның қасиетін анықтағанымызда, беттік көлемі 3 нм, әрі белгілі бір бағытқа бағытталған, өте төмен температуралы аумақта түзілмеген ұсақ ноқат екендігі байқалады (3-сурет).

Біз ультракүлгін-көзге көрінетін-инфрақызыл (UV-Vis-IR) – спектрометр қондырғысы арқылы жоғарыда дайындалған висмут селенидінің наноматериалының жарық өтімділігіне өлшеу жүргіздік. Өлшеу нәтижелері оның жарық өтімділік



2-сурет – Түзілу температурасы 490°C, газ ағу жылдамдығы 500 мл/мин болатын, төмен температура аумағында өскен висмут селенидінің Раман спектрлері



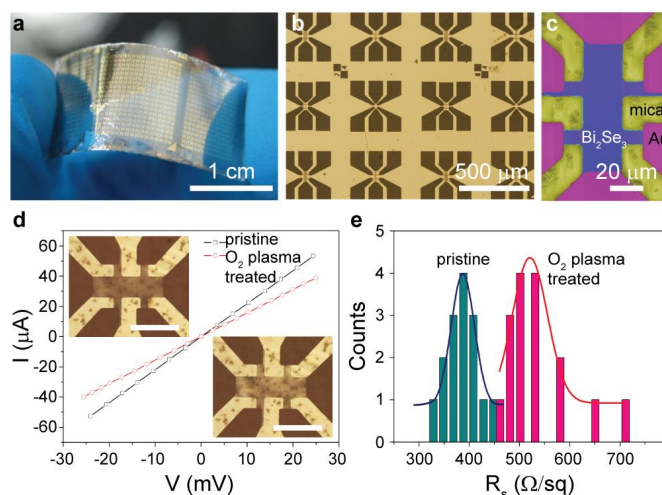
3-сурет – Түзілу температурасы 490°C, газ ағу жылдамдығы 500 мл/мин болатын, төмен температура аумағында өскен висмут селенидінің атомдық микроскоп арқылы алынған суреті

қасиеті өсу қалыңдығына байланысты екендігін көрсетті. Фторлы алтын слюданың тәжірибесі дәлелдегендей, ол UV-Vis-IR—дің (250-4500 нм) аумағында өте жоғары жарық өтімділік қасиетке ие, ешқандай сіңіру шыңы байқалмайды. Ал біз дайындаған фторлы алтын слюда матрицасында өскен, қалыңдығы 6 нм болатын висмут селенидінің наноматериалының, толқын ұзындығы 1000-3000 нм аумағындағы жарық өтімділігі 80%-тен жоғары болады, яғни графенмен қарайлас. Сондықтан, висмут селениді наноматериалының жоғарыдағы ерекше жарық өтімділік қасиеті, оның болашақта мөлдір экран, OLED, сезімтал экран, күн энергия батареясы қатарлы салаларда қолданылуына мүмкіндік береді, әсіресе күн энергиялы батареяда

қолданылатын мөлдір электродтың 50% негізінен толқын ұзындығы инфрақызыл аумағында іске қосылады.

Висмут селениді наноматериалының жоғарыдағы ерекше жарық өтімділік қасиетімен қатар, құрылымы өте кемелді болатын иілгіштік қасиеті де болады (4а-сурет). Зерттеу нәтижелері қабатталған күйдегі висмут селениді наножолақтары мен наножапырақшаларының иілу бұрышы 180 градустан жоғары, иілу радиусы 10 мкм-ден кіші екендігін көрсетті.

Жұмыстың мақсаты бойынша “Hall bar” сызба нұсқасы жобаланып, төрт зонтты қондырғы арқылы висмут селенидінің үлкен бетті қабыршығының электр өткізгіштік қасиеті анықталды. Слюда матрицасының диэлектрик

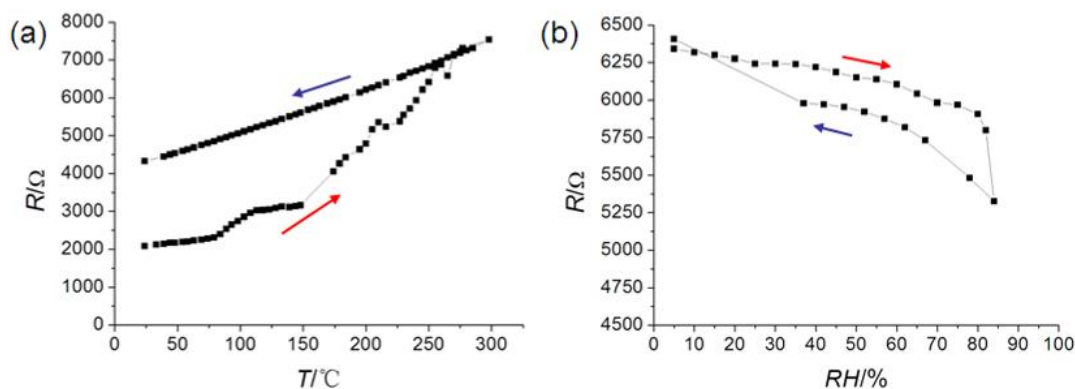


4-сурет – а) слюда матрицасында өскен висмут селенидінің суреті; б) “Hall bar” үлгісінің оптикалық микроскоп арқылы түсірілген суреті; в) слюда(сары түс) матрицасындағы висмут селениді “Hall bar” құрылысының (көк түс) SEM арқылы түсірілген суреті, Cr/Au электроды (күлгін түс); д) оттекті плазма арқылы 20 секунд өңдеудің алды артындағы висмут селенидінің наноматериалының электр өткізгіштігін өлшеу оптикалық суреті; е) оттекті плазма арқылы өңдеудің алды артындағы 15 дана висмут селенидінің наноматериалының беттік кедергісінің орналасу суреті

қасиеті мен материал жобалау барысы өзара байланысты болады, оны басқа орынға көшірудің қажеті жоқ, сонда ғана висмут селенидінің наноқұрылымын сақтап қалуға болады. Литографиялық әдісті қолдану арқылы өзгермелі кеңдіктегі арналары бар, ең кіші арнасының кеңдігі 2 мкм болған “Hall bar” қондырғысын жасадық, оның оптикалық суреті 4b-да көрсетілген. Алдымен изоляторлық қасиетке ие слюда матрицасына контакт металл ретінде 5 нм Cr, 50 нм Au-ды жалаттық. 4c-суретте белгілі бір “Hall bar” қондырғысының сұйытылған орында сканерлеу электронды микроскоп (SEM) көрсетілген, мұндағы арнаның ұзындығы мен ені жеке-жеке 75 және 20 мкм. 4d-суретте висмут селениді наноқұрылымының бастапқы қасиеттерінің қисық сызықтары сызықты симметриялы екендігі көрсетілген, төрт зонты қондырғы арқылы өлшенген кедергісі 475 Ω , беттік кедергісі 360 Ω/m^2 , контакт кедергісі 30 Ω . Қалыңдығы 10 нм болатын арналарының ендіктері ұқсамаған висмут селенидінің наноқұрылымды бөлшегін зерттеу негізінде, оның беттік кедергісі ең төмен болғанда 330 Ω/m^2 , орташа мәні 390 Ω/m^2 екендігі анықталды (4e-сурет).

Топологиялық изолятор висмут селенидінің бұрынғы-соңғы байқалмаған беттік күйі бөлме температурасында

тұрақты болып, уақытқа байланысты өзгермейді. Олай болса топологиялық изоляторлы электркізгіш материалдар қаншалықты шарт-жағдайларға төтеп бере алады. Бұл мәселені шешу үшін, оттекті плазма арқылы висмут селенидінің наноматериалын өңдеп, ерекшеліктеріне қарата талдау жүргіздік. Слюда матрицасындағы висмут селенидінің наножапырақшасы оттегі мен азоттың 1:4 қатынастағы араласқан плазма газды жағдайында (Prep2-FEMTO, Diener electronic, Germany) 90 W-тық электр қуаты арқылы бірнеше минут өңделді. Өңделгеннен кейін висмут селенидінің наножапырақшасы тіпті мөлдір бола түскен, бұл өзгеріс висмут селениді наножапырақшасының бетінде изоляторлық қасиетке ие тотық қабат түзілгендігін түсіндіреді. Әрі өңделгеннен кейінгі висмут селенидінің наножапырақшасының бастапқы қасиеттерінің қисық сызықтары бұрығысынша сызықты симметриялы екендігі байқалған, тек қана кедергісі 640 Ω -ға көтерілген (4d-сурет). Біз оттекті плазма арқылы өңделген висмут селениді наноматериалына талдау жасағанымызда, 4e-суретте көрсетілгендей, беттік орташа кедергісі шамамен 520 Ω/m^2 , әрі беттік күйінің өзгерісі кедергіні ұлғайта түсетіндігі байқалды.



5-сурет – а) слюда матрицасындағы висмут селениді наножапырашының электр кедергісіне азот газы болған жағдайда температураның әсері, алдымен температура көтеріледі; б) слюда матрицасындағы висмут селениді наножапырашының электр кедергісіне дымқылдықтың әсері, дымқылдық 2% дан басталады.

Жұмыста ары қарай висмут селенидінің әуелгі электркізгіш материалының кедергісі мен температура және дымқылдық арасындағы өзгеріс зерттелді. 5a-суретте көрсетілгендей, азот газы болған жағдайда температура көтерілген кезде әуелгі электркізгіш материалдың кедергісі де ілесіп көтеріледі, 150°C-тан соң өзгеріс тіпті артады. Температураны төмендеткен кезде жоғарыдағы өзгеріс жалғасып, кедергісі артады. Дымқылдықтың зерттелген үлгі кедергісіне болған әсерін анықтау үшін, үлгіні дымқылдығы 2% болатын қондырғыға орнатып, дымқылдығын көтерсек, кедергісі төмендейді, дымқылдығын RH=82%-да біраз уақыт тұрақты сақтаған

соң азот газын енгізу арқылы дымқылдығын төмендетсек, кедергісі бірте-бірте артып әуелгі күйіне келеді, бұл бейне қайтымды процесс сияқты алғашқы күйіне келеді (5b-сурет).

4. Қорытынды

Мақалада слюда матрицасында висмут селенидінің үлкейтілген мөлдір жұмсақ түрдегі топологиялық изолятор қабыршығын тікелей өсірудің ең қарапайым әдісі қарастырылды. Жасалған наноқұрылымды топологиялық изолятордың жұмсақ формадағы қабыршығы, толқын

ұзындығы кең аралықта жарық өтімділігі, тербеліске қарсылық қуаты, электр өткізгіштігі мен механикалық қасиеті жоғары болатыны анықталды. Жұмыста дайындалған топологиялық изолятор висмут селенидінің оптикалық, электрлік, механикалық қасиеті ерекше көрнекті болғандықтан, алынған нәтижелер келешекте жаңа түрдегі мөлдір жұмсақ формадағы электроникалық бөлшектер жасап, оларды оптикалық электроника мен

нанометрлік электроника саласында қолдануға мүмкіндік береді.

Алғыс білдіру

Бұл жұмыс «China scholarship fund»тың демеуімен орындалды.

Әдебиеттер

- 1 Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang Y., Zhanh Y., et al. Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science*. – 2004. – Vol.306, Is.5696. – P.666-669.
- 2 Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. The electronic properties of graphene // *Reviews of Modern Physic.* – 2009. – Vol.81. – P.109-162.
- 3 Li D., Kaner R.B. Graphene-based materials // *Science*. – 2008. – Vol.320, Is.5880. – P.1170-1171.
- 4 Kong D.S., Dang W.H., Cha J.J., Li H., Meister S., Peng H.L., Liu Z.F., Cui Y. Few-layer nanoplates of Bi₂Se₃ and Bi₂Te₃ with highly tunable chemical potential // *Nano Letters*. – 2010. – Vol.10. – P.2245-2250.
- 5 Zhang H.J., Liu C.X., Qi X.L., Dai X., Fang Z., Zhang S.C. Topological insulators in Bi₂Se₃, Bi₂Te₃ and Sb₂Te₃ with a single Dirac cone on the surface // *Nature Physics*. – 2009. – Vol.5, Is.6. – P.438-442.
- 6 Mishra S.K., Satpathy S., Jepsen O. Electronic structure and thermoelectric properties of bismuth telluride and bismuth selenide // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 1997. – Vol.9, Is.2. – P.461.
- 7 Xia Y., Qian D., Hsieh D., Wray L., Pal A., et al. Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface // *Nature Physics*. – 2009. – Vol.5. – P.398-402.
- 8 Zhang Y., Chang C.Z., Song C.L., Wang L.L., et al. Crossover of the three-dimensional topological insulator Bi₂Se₃ to the two-dimensional limit // *Nature Physics*. – 2010. – Vol.6. – P.584-588.
- 9 Kou X.F., He L., Xiu F.X., Lang M.R., Liao Z.M., et al. Epitaxial growth of high mobility Bi₂Se₃ thin films on CdS // *Applied Physics Letters*. – 2011. – Vol.98. – P.242102.
- 10 Peng H.L., Lai K., Kong D.S., et al. Aharonov-Bohm interference in topological insulator nanoribbons // *Nature Materials*. – 2010. – Vol.9, Is.3. – P.225-229.
- 11 Zhang Y., He K., Chang C.Z., Song C.L., Wang L.L., et al. Crossover of three-dimensional topological insulator of Bi₂Se₃ to the two-dimensional limit // *From arXiv.org, e-Print Archive, Condensed Matter*. – 2009. – Vol.1-17, arXiv:0911.3706v1.
- 12 Li Y.Y., Wang G., Zhu X.G., Liu M.H., Ye C., et al. Growth dynamics and thickness-dependent electronic structure of topological insulator Bi₂Te₃ thin films on Si // *From arXiv.org, e-Print Archive, Condensed Matter*. – 2009. – arXiv:0912.5054v1.
- 13 Teweldebrhan D., Goyal V., Balandin A.A. Exfoliation and characterization of bismuth telluride atomic quintuples and quasi-two-dimensional crystals // *Nano Letters*. – 2010. – Vol.10, Is.4. – P.1209-1218.
- 14 Wang D., Yu D., Mo M., Liu X., Qian Y. Preparation and characterization of wire-like Sb₂Se₃ and flake-like Bi₂Se₃ nanocrystals // *Journal of Crystal Growth*. – 2003. – Vol.253, Is.1-4. – P.445-451.
- 15 Zhang G., Wang W., Lu X., Li X. Solvothermal synthesis of V-VI binary and ternary hexagonal platelets: the oriented attachment mechanism // *Crystal Growth & Design*. – 2008. – Vol.9, Is.1. – P.145-150.
- 16 Kong D.S., Randel J.C., Peng H.L., et al. Topological insulator nanowires and nanoribbons // *Nano Letters*. – 2010. – Vol.10, Is.1. – P.329-333.
- 17 Meister S., Peng H.L., McIlwrath K., et al. Synthesis and characterization of phase-change nanowires // *Nano Letters*. – 2006. – Vol.6, Is.7. – P.1514-1517.
- 18 Cha J.J., Williams J.R., Kong D.S., et al. Magnetic doping and Kondo effect in Bi₂Se₃ nanoribbons // *Nano Letters*. – 2010. – Vol.10, Is.3. – P.1076-1081.
- 19 Guo Y., Aisijiang M., Zhang K., et al. Selective-area Van der Waals epitaxy of topological insulator grid nanostructures for broadband transparent flexible electrodes // *Advanced Materials*. – 2013. – Vol.25, Is.41. – P.5959-5964.

References

- 1 Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang Y, Zhanh Y, et al (2004) *Science* 306:666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- 2 Castro Neto AH, Guinea F, Peres NMR, Novoselov KS, Geim AK (2009) *Rev Mod Phys* 81:109-162. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.81.109>

- 3 Li D, Kaner RB (2008) *Science* 320:1170-1171. <https://doi.org/10.1126/science.1158180>
- 4 Kong DS, Dang WH, Cha JJ, Li H, Meister S, Peng HL, Liu ZF, Cui Y (2010) *Nano Lett* 10:2245-2250. <https://doi.org/10.1021/nl101260j>
- 5 Zhang HJ, Liu CX, Qi XL, Dai X, Fang Z, Zhang SC (2009) *Nat Phys* 5:438-442. <https://doi.org/10.1038/nphys1270>
- 6 Mishra SK, Satpathy S, Jepsen O (1997) *J Phys-Condens Mat* 9:461. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/2/014>
- 7 Xia Y, Qian D, Hsieh D, Wray L, Pal A, et al (2009) *Nat Phys* 5:398-402. <https://doi.org/10.1038/nphys1274>
- 8 Zhang Y, He K., Chang CZ, Song CL, Wang LL, et al (2010) *Nat Phys* 6:584-588. <https://doi.org/10.1038/nphys1689>
- 9 Kou XF, He L, Xiu FX, LLang MR, Liao ZM, et al (2011) *Appl Phys Lett* 98:242102. <https://doi.org/10.1063/1.3599540>
- 10 Peng HL, Lai K, Kong DS, et al (2010) *Nat Mater* 9:225-229. <https://doi.org/10.1038/nmat2609>
- 11 Zhang Y, He K, Chang CZ, Song CL, Wang LL, et al (2009) From arXiv.org, e-Print Archive, Condensed Matter arXiv:0911.3706v1.
- 12 Li YY, Wang G, Zhu XG, Liu MH, Ye C, et al (2009) From arXiv.org, e-Print Archive, Condensed Matter arXiv:0912.5054v1.
- 13 Teweldebrhan D, Goyal V, Balandin AA (2010) *Nano Lett* 10:1209-1218. <https://doi.org/10.1021/nl903590b>
- 14 Wang D, Yu D, Mo M, Liu X, Qian Y (2003) *J Cryst Growth* 253:445-451. [https://doi.org/10.1016/s0022-0248\(03\)01019-4](https://doi.org/10.1016/s0022-0248(03)01019-4)
- 15 Zhang G, Wang W, Lu X, Li X (2008) *Cryst Growth Des* 9:145-150. <https://doi.org/10.1021/cg7012528>
- 16 Kong DS, Randel JC, Peng HL, et al (2010) *Nano Lett* 10:329-333. <https://doi.org/10.1021/nl903663a>
- 17 Meister S, Peng HL, McIlwrath K, et al (2006) *Nano Lett* 6:1514-1517. <https://doi.org/10.1021/nl061102b>
- 18 Cha JJ, Williams JR, Kong DS, et al (2010) *Nano Lett* 10:1076-1081. <https://doi.org/10.1021/nl100146n>
- 19 Guo Y, Aisijiang M, Zhang K, et al (2013) *Adv Mater* 25:5959-5964. <https://doi.org/10.1002/adma.201302661>