

ӘОЖ 544.77
МРНТИ 31.15.33

ВИСМУТ СЕЛЕНИДІ ЕКІ ӨЛШЕМДІ АТОМДЫ КРИСТАЛЫНЫҢ НАНОҚҰРЫЛЫМЫН МЕҢГЕРМЕЛІ ӨСІРУ

М. ЕСЖАНҰЛЫ¹, Б. БЕКТҰРҒАНҚЫЗЫ¹, Д.Х. ҚАМЫСБАЕВ², Б.А. СЕРІКБАЕВ²,
Ә.Қ. ҚОҚАНБАЕВ², Л.К. КУДРЕЕВА²

¹Іле педагогикалық университеті, Құлжа, ҚХР

²әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті

Аңдатпа: Мақалада висмут селенидін даярлаудың біраз заманауи әдістерін пайдалану арқылы оның наносызықты, наножолақты құрылымдарын өсіру әдістеріне әдебиеттік шолу жасалды.

Жоғары сапалы висмут селенидінің (Bi_2Se_3) екі өлшемді кристалын өсірудің жаңа әдісі ұсынылды. «Газ-қатты» фаза өсіру механизміне сәйкес мыс торын слюда бетіне қаптау әдісі бойынша висмут селенидінің екі өлшемді атомды кристалының наноқұрылымдары (ұзындығы 8 μm , қалыңдығы 5 нм болатын) 490° температурада, уақыты 40 мин, газ ағу жылдамдығы 30 cm^3/s ÷ 80 cm^3/s -ке дейін өзгертіліп отыратын жағдайда меңгермелі өсірілді.

Алынған үлгілер атомдық күштік микроскоп (Bruker Atomic Force Microscope (AFM), АҚШ), сканерлеуші электронды микроскоп (SEM, Hitachi S-4800, Жапония), Раман спектрометрі (HORIBA LabRAM HR800, АҚШ), UV-VIS және сәуле түсіру электронды микроскоп (TEM) сияқты заманауи қондырғыларда алынған мәліметтер негізінде сипатталды.

Наноқұрылымдардың жасалу сапасына, өсу формасына және қалыңдығына температура мен газ ағу жылдамдығының әсерлері зерттелді. Алынған екі өлшемді атомдық кристалдар ішінде тор формалы үлгінің сәуле өтімділігі басқалардан жоғары екендігі анықталды.

Түйінді сөздер: висмут селениді, меңгермелі өсіру, слюда, атомдық кристалл, фаза

MANAGED SYNTHESIS OF A NANOSTRUCTURED TWO-DIMENSIONAL ATOMIC CRYSTAL OF BISMUTH SELENIDE

Abstract: The paper analyzes the literature of modern methods for producing nanosuspensions and the orderly growth of nanofilms. A new method for the controlled synthesis of a high-quality nanostructured two-dimensional atomic crystal of bismuth selenide is discussed.

Using the “gas-solid” growth mechanism, the influence of such factors as temperature, gas supply rate on the controlled growth of a nanostructured two-dimensional atomic crystal of bismuth selenide 8 μm in length and 5 nm thick on mica having a lattice similar to copper taken as a matrix was investigated.

It is shown that the optimal conditions for conducting controlled synthesis of high-quality bismuth selenide are 490°, time 40 minutes, gas flow rate within 30 cm^3/s - 80 cm^3/s .

The structural characteristics of the obtained samples of bismuth selenide were studied by modern methods of atomic force microscopy (Bruker Atomic Force Microscope, AFM, USA), scanning electron microscopy (SEM, Hitachi S-4800, Japan), optical microscopy (Olimpus, DX-51, Japan), Raman spectroscopy (HORIBA LabRAM HR 800, USA), UV-VIS, transmission electron microscopy (TEM).

The forms and properties of the synthesized samples of nanostructured atomic crystals of bismuth selenide are established.

Keywords: bismuth selenide, controlled synthesis, mica, atomic crystal, phase

УПРАВЛЯЕМЫЙ СИНТЕЗ НАНОСТРУКТУРНОГО ДВУХМЕРНОГО АТОМНОГО КРИСТАЛЛА СЕЛЕНИДА ВИСМУТА

Аннотация: В работе проведен анализ литературы современных методов получения наносuspensions и упорядоченного роста нанопленок. Обсужден новый способ управляемого синтеза высококачественного наноструктурного двухмерного атомного кристалла селенида висмута.

С использованием механизма роста «газ-твердое» исследовано влияние таких факторов как температура, скорость подачи газа на управляемое выращивание наноструктурного двухмерного атомного кристалла селенида висмута длиной 8 мкм и толщиной 5 нм на слюде, имеющей решетку, подобную медной, взятой в качестве матрицы.

Показано, что оптимальными условиями проведения управляемого синтеза высококачественного селенида висмута являются температура – 490°C, время – 40 минут, скорость подачи газа – в пределах 30 см³/с ÷ 80 см³/с.

Структурные характеристики полученных образцов селенида висмута исследованы современными методами как атомно-силовая микроскопия (Bruker Atomic Force Microscope, AFM, США), сканирующая электронная микроскопия (SEM, Hitachi S-4800, Япония), оптическая микроскопия (Olimpus, DX-51, Япония), Раман-спектроскопия (HORIBA LabRAM HR 800, США), UV-VIS, просвечивающая электронная микроскопия (ТЕМ).

Установлены формы и свойства синтезированных образцов наноструктурных атомных кристаллов селенида висмута.

Ключевые слова: селенид висмута, контролируемый синтез, слюда, атомный кристалл, фаза

Кіріспе

Висмут селениді (Bi_2Se_3) екі өлшемді атомды кристалды наноматериалдар қатарына жатады, сондықтан оның беттік эффект, кіші өлшемді эффект, квант өлшемді эффект, макроквантты тоннельді эффект сияқты ерекше қасиеттері болуымен қатар, жылу, жарық, дыбыс, сәуле, магниттілік қасиетке ие болғандықтан, қазіргі таңда ғалымдар оған ерекше қызығушылық танытып отыр. Болашақта Bi_2Se_3 электроника, информация, энергетика, жаңа материалдар, катализ, биология және медицина саласында кең көлемде қолданылу келешегі зор наноматериал ретінде қарастырылуда. Ғалымдар висмут селенидің дайындау әдісі туралы көптеген зерттеулер жүргізді. Мысалы, молекулалық шоғыр эпитаксиялық (МВЕ) технология әдісі [1], микромеханикалық ажырату әдісі [2-3] сияқтылар. Бұл әдістерді қолдану арқылы, атом дәрежесіндегі жоғары сапалы, әрі біркелкі болатын висмут селенидінің қабыршығын жасаған. Аталған әдістер қарапайым, әрі қолдануға ыңғайлы жасалған висмут селениді жоғары сапалы болса да, жасалу шарт-жағдайы өте жоғары вакуумдық ортаны қажет етеді, әрі қолданылатын қондырғының бағасы өте қым-

бат. Механикалық ажырату барысы өте ретсіз болғандықтан, ажыратып алынған жұқа жапырақшаның қабат санын, формасын, өлшемін, бағытын және өнімділігін меңгеруге ыңғайсыз. Qihua Xiong сұйық фазада синтездеу әдісі арқылы қалыңдығы 4 нм болатын висмут селениді наножапырақшасын жасаған [4]. Zhongfan Liu [5-6] “газ-сұйық-қатты” (V-L-S) механизмінің газ фазадан қатты фазаға айналдыру әдісі арқылы формасы біркелкі болатын висмут селенидінің наносызықша, наножолақты құрылымдарын өсіріп жасаған.

Висмут селениді екі өлшемді атомды кристалының сыртқы бетінде қосалқы байланыс болмайды, тек қана өте әлсіз Ван-дер-Ваальс күшінің әсері сақталады. Басқа наноматериалдарды жасау әдісімен салыстырғанда, селенді висмутта қабатталған кристалдық күйдегі Ван-дер-Ваальстік күштері сыртқа кеңею рөлі кең көлемде сақталғандықтан, өсу параметрлерін жоғары дәрежеде меңгеруге мүмкіндік береді. Ал слюда төтенше үйлесімді болған Ван-дер-Ваальс күштері сыртқа кеңею рөлі бар матрица түрінде саналады. Слюда изоляторлық қасиетке ие болғандықтан, температураға төзімді,

жалтырауық, жылу өткізгіштігі төмен әрі жарық өткізгіштігі жоғары артықшылықтарға ие. Осыған байланысты ол наноматериалдар дайындауда матрица ретінде үнемі алынады [7-10]. Фторлы алтын слюданың жарық өткізгіштігі ақ слюданың жарық өткізгіштігінен жоғары, әрі тәжірибе барысында жапырақшаларды бір-бірінен аршыған кезде беттері өте таза, сондықтан біз фторлы алтын слюданы матрица материалы ретінде пайдаландық [11].

Тәжірибелік бөлім

Экспериментте алынған висмут селениді ұнтағын (99.999%) “Alfa Aesar” компаниясы қамдады. Матрицаға қолданылатын фторлы алтын слюда (молекулалық формуласы $\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]\text{F}_2$, көлемі 10 мм×10 мм, қалыңдығы 0.05-0.1 нм), жаңадан дайындалған. Висмут селениді наноматериалы Thermo Scientific Lindberg/Blue M (TF55035KC-1, АҚШ) қондырғысында дайындалды. Висмут селениді 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, сәуле түсіру электронды микроскоп (TEM), Scanning Tunneling Microscope (STM), Раман спектрометрі (HORIBA LabRAM HR800, АҚШ) аппараттары пайдаланылды.

Висмут селениді наноқұрылымын дайындау диаметрі 30 см кварц құбырлы пеште жүргізілді. Кварц құбырлы пештің екі басы төмен температуралы аймақ, ортаңғы бөлігі жоғары температуралы аймақ болып саналады.

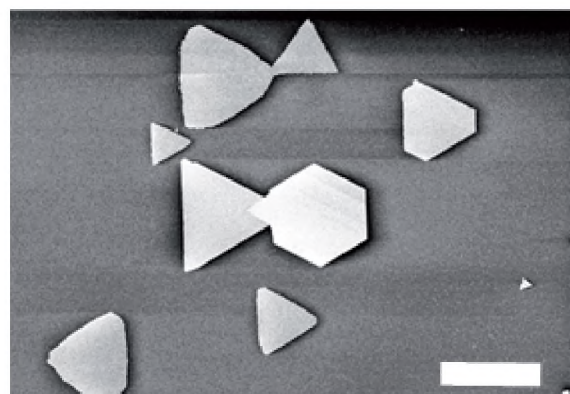
Әрбір тәжірибеде 0.2 г висмут селениді ұнтағы өлшеп алынып, құбыр пештегі кварц құбырдың дәл орталығындағы кварц бөлшектің үстіне қойылады. Содан соң жаңадан аршып алған фторлы алтын слюда матрица жапырақшасы кварц құбырдың ішіндегі кварц бөлшекпен параллель, температурасы 400-480°C болатын аймаққа қойылады. Мұздатқыш қондырғыға көлемі 1/2-дей изопропил спиртіні құйып, артынан көп мөлшерде көпіршік шықпағанша, әрі араласпа

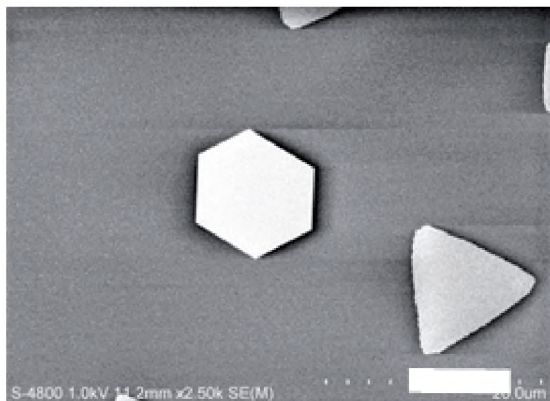
зат қоюланғанға дейін құрғақ мұз (CO_2) салынады. Висмут селениді жоғары температурада оңай тотығатындықтан, ішіндегі ауаны сорып тастау үшін вакуумды сорғы іске қосылып, кварц құбыры ішіндегі қысым 100 мм.с.б (13300.3 Pa) дейін төмендетілген соң вакуумды сорғы бекітіліп, газ жолы ашылады да аргон газы толтырылады, бұл үдеріс 3-4 рет қайталанып оттегінің қалдықтары сыртқа толық шығарылады. Аргон газының қозғалу жылдамдығы 30-90 $\text{см}^3/\text{с}$, қысымы 50 мм.с.б тұрақтанғаннан соң пеш қосылады, температура 490°C-қа көтеріліп 40 минуттан кейін қыздыру тоқтатылып, пеш бөлме температурасына дейін өздігінен суытылады.

Дайындалған висмут селениді наноқұрылымының өлшемі микрометр дәрежесіне жеткендіктен, оның сыртқы тұлғалық ерекшеліктерін оптикалық және сканерлеуші электронды микроскоптар арқылы анализдеуге болады.

Нәтижелер және оларды талқылау

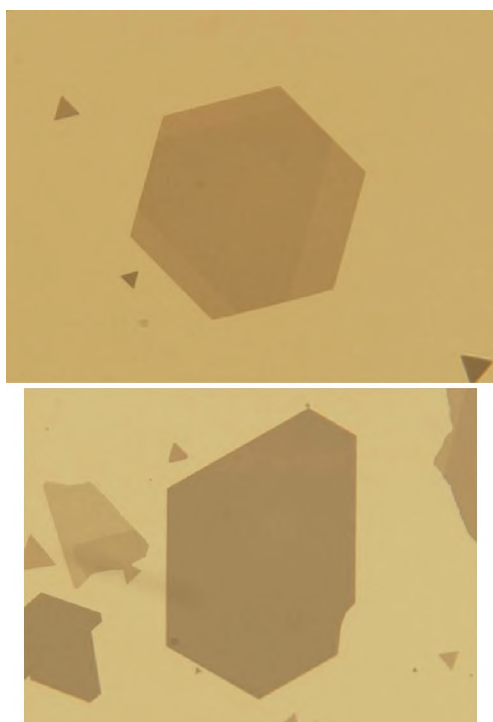
Жұмыста, температура 490°C, уақыты 40 мин шарт-жағдайды меңгере отырып, газ ағу жылдамдығы өзгертілді. Газ ағу жылдамдығы 30 $\text{см}^3/\text{с}$ кезде слюда матрицасы бетінде аз мөлшерде жапырақшалар пайда бола бастайды, газ ағу жылдамдығы 50 $\text{см}^3/\text{с}$ -та бағыттары біршама көрнекті, ұзындығы 10 мкм-ге дейін жететін висмут селениді жапырақшасына алдық, 1-суретте оның сканерлеуші электронды микроскоптағы суреті көрсетілген.





1-сурет. Висмут селениді наножатырақшасының сканерлеуші электронды микроскоптағы суреттері (10 μm)

Газ ағу жылдамдығы $80 \text{ cm}^3/\text{с}$ болған кезде бағыттары біршама көрнекті, ұзындығы 60 мкм - ден аз емес висмут селениді жапырақшасы алынды, 2-суретте оның оптикалық микроскоптағы суреті көрсетілген.



2-сурет. Висмут селениді наножатырақшасының оптикалық микроскоптағы суреттері (50 μm)

Берілген газдың ағу жылдамдығының өзгерісіне сәйкес висмут селениді екі өлшемді атомды кристалының өсу үлкен-кішілігіде бірдей болмайды, бұл жағдайды “газ-қатты”-фаза (V-S) өсіру механизмі арқылы түсіндіру-

ге болады, яғни слюда матрицасын белгілі болған температура аумағына қойған кезде, газдың ағу жылдамдығы кішірейген сайын, газ мөлшері үлгінің өсу қажетін қанағаттандыра алмайды, ал газдың ағу мөлшерін үлкейтсек, өте қысқа уақыттың ішінде өскен висмут селенидінің кристалдары ережесіз орналасып, өлшемге толатын кристалл түзілмейді.

Тәжірибе нәтижесіне сүйенсек, түзілген висмут селениді нанокұрылымды кристалдардың белгілі бағыт бойынша, үшбұрышты жапырақшалардың, 60 градустың еселік санының бағыты бойынша өзара ретті өскені байқалады. Бұл құбылыс тәжірибе барысындағы Ван-дер-Ваальстік сыртқы кеңейіп өсудің негізін әйгілейді.

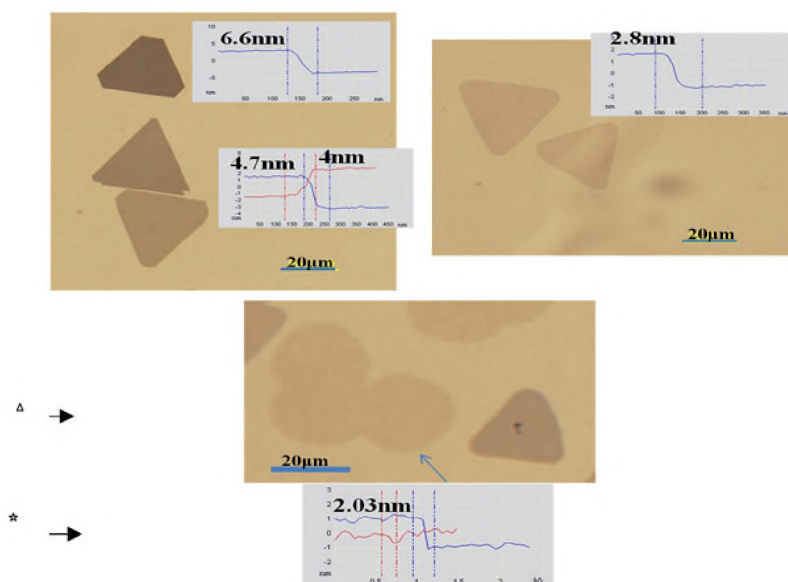
Өлшемі $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ -лік бір жапырақ слюда матрицасында өскен үшбұрышты висмут селениді наножатырақшасына қарата есептеу жүргізілді. Есептеу нәтижесіне сүйенсек, үшбұрышты висмут селениді нанокұрылымының бағытты өскендігі ерекше толымды екендігі байқалады.

Висмут селениді нанокұрылымының оптикалық микроскоп арқылы түсірілген суретіне талдау жасасақ, оның өсу біркелкілігі мен қалыңдығы өзара сәйкес келеді. Енді осы сәйкестікті пайдаланып, дайындалған үлгідегі қабат санының таралу ақпаратына негізделе отырып, әрбір жеке қабыршықтарды атомдық күштік микроскоп арқылы талдау жасаудың қажетсіз екенін байқаймыз. Ең алдымен атомдық күштік микроскоп арқылы, висмут селенидін 2-10 қабатқа дейінгі дара қабыршықтарының биіктігі мен оның слюда матрицасындағы орнын тұрақтандырып аламыз, содан соң оптикалық микроскоп арқылы суретке түсіріп, оның өсу біркелкілігі жөніндегі ақпаратқа ие боламыз. Алынған нәтиже тәжірибе барысында қолданған газдың ағу жылдамдығы мен температурасын реттеу арқылы, висмут селениді екі өлшемді атомды кристалының нанокұрылымы (2-3 қабатты негіз еткен) өскендігін растайды.

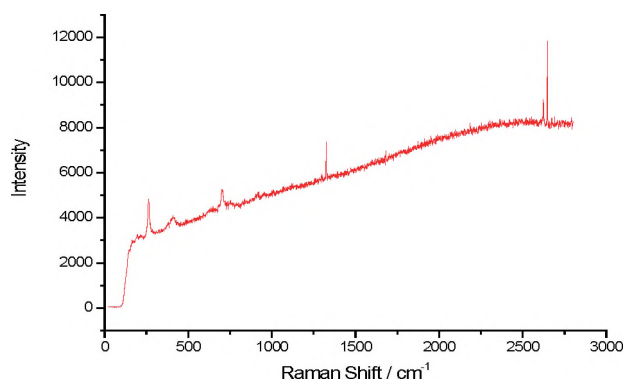
Раман спектрі жасалған нанокұрылымды үлгінің құрылысы мен қасиетін жылдам анықтайтын әдіс болып есептеледі. Біз слюда матрицасында өскен висмут селенидінің на-

ноқұрылымының қабат саны мен Раман спектрінде көрінген сигналдың қарқындылығы арасындағы байланысқа талдау жасадық. Висмут селениді екі өлшемді атомды кристалының жоғарыда оптикалық микроскопта байқалған суреті негізінде, өсу біркелкілігі өзгеше болған бірнеше дара қабыршықтар талдап алып, жеке-жеке суретке түсірдік (3-сурет). Әрі оптикалық микроскоптағы ақпаратқа негізделе отырып, атомдық күштік микроскоп арқылы дара қабыршықтардың қалыңдығы жеке-жеке өлшенді. Висмут селениді екі өлшемді атомды кристалының параметрлері арқылы дара қабыршықтардың қалыңдығы мен қабат саны арасындағы сәйкестік табылды. Содан соң Раман спектрі оптикалық

микроскоп арқылы дара қабыршықтардың орны тұрақтанып, толқын ұзындығы 633 нм болатын лазер сәулесі арқылы, толқын саны 200 cm^{-1} - 400 cm^{-1} аумағында сканерлеп Раман спектрі сигналының ақпараты табылды. Әдебиетте [12] висмут селениді дара кристалының Раман спектрі сипаттаған шыңдары 75 cm^{-1} , 131.5 cm^{-1} және 171.5 cm^{-1} болатындығы көрсетілген. Біз қолданған слюда матрицасының Раман спектрі айқындаған шыңы 4-суретте көрсетілген. Тәжірибеге сүйенсек пайда болған шың $100\text{--}200\text{ cm}^{-1}$ аумағында өте көрнекті болмайды, сондықтан бұл жағдай висмут селенидінің Раман спектр сипаттамасына ешқандай әсер тудырмайды.



3-сурет. Қабат саны әртүрлі болған висмут селениді наножапырақшасының (Δ) оптикалық микроскоптағы суреті мен ($\star$) атомдық күштік микроскопта өлшенген нәтижесі

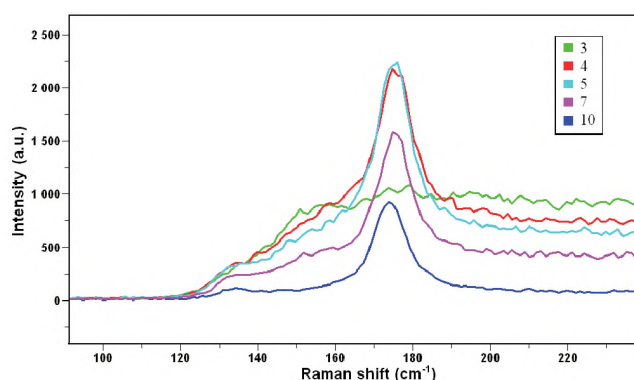


4-сурет. Слюда матрицасының Раман спектрі

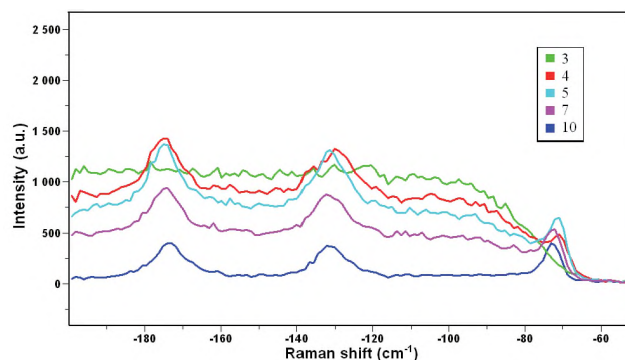
Висмут селениді әрбір 5 қабатының биіктігі шамамен 0.95 нм болатындығы әдебиетте көрсетілген [5], сондықтан AFM қондырғысымен қалыңдығын өлшеу арқылы, висмут селениді наножапырақшасындағы 5 қабаттың санын білуге болады. Тәжірибеге негізделсек 6.6 нм 7 қабатқа 4.7 нм 5 қабатқа 4 нм 4 қабатқа 2.8 нм 3 қабатқа сәйкес келеді. Раман спектрі оптикалық микроскопы арқылы 4-суретте көрсетілген дара жапырақшаны, толқын саны 200 см^{-1} — 400 см^{-1} аумағында, толқын ұзындығы 633 нм лазер сәулесімен сканерлеп, 5-сурет пен 6-суреттегі нәтижелер алынды. Соның ішіндегі $131.5\text{ см}^{-1} \pm 171.5\text{ см}^{-1}$ және -75 см^{-1} тең 4 дана сіңіру шындары мен висмут селенидін сипаттайтын сіңіру шындары өзара сәйкес келеді. Байқалған бұл құбылыс түзілген наноқұрылымның химиялық құрамы шынында висмут селениді екенін дәлелдейді, әрі өсу барысында висмут селенидінде мүлде химиялық ыдыраудың болмағанын, V-S өсу ме-

ханизімінде тек қана газдың қатты күйге айналған физикалық үдеріс жүргенін көрсетеді. Сонымен бірге 265 см^{-1} орнында өте әлсіз байқалған сіңіру шыңы мен слюда матрицасында сипатталған сіңіру шыңы өзара сәйкес келеді.

5-сурет пен 6-суреттегі нәтижелерді салыстырсақ, қабат саны 10- нан төмен болған висмут селениді екі өлшемді кристалының Раман спектр сигналының қарқындылығы, қабат санының артуына сәйкес артпайды: 4,5-қабаттарда Раман спектр сигналы ең күшті болады, ал 5 қабаттан асканнан кейін қабат санының артуына сәйкес Раман спектр сигналы әлсірейді, әрі 3-қабаттың Раман спектр сигналы 4,5- қабаттарға қарағанда ең әлсіз болатындығы байқалады. Әдебиеттерге [5] сүйенсек, бұл құбылыс графеннің сыртқы бетіне өскен висмут селенидінің сипаттамасымен сәйкес келеді.



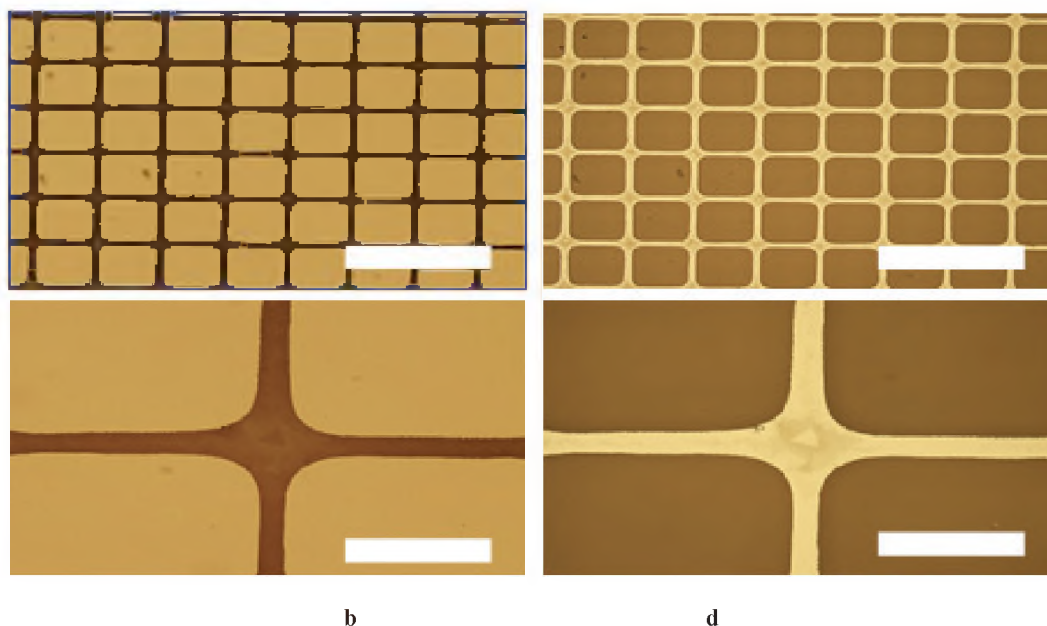
5-сурет. Қабат сандары әртүрлі болатын висмут селенидінің екі өлшемді атомды кристалының Раман спектрі сигналы (100 см^{-1} — 240 см^{-1})



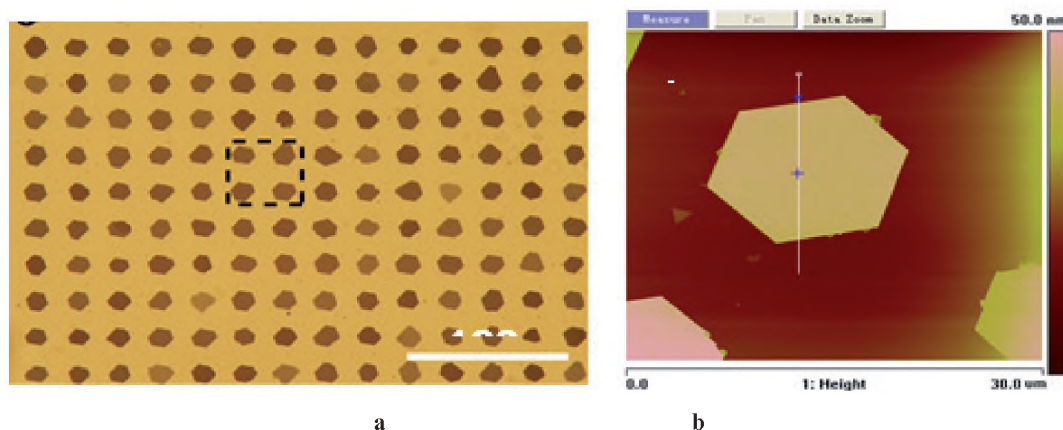
6-сурет. Қабат сандары әртүрлі болатын висмут селениді екі өлшемді атомды кристалының Раман спектрі сигналы (-200 см^{-1} — -50 см^{-1})

Мыс торын слюда бетіне қаптау мақсатымыз, слюда матрицасының бетіне графикалық бейне түсіру болып табылады. Ол үшін, жаңадан аршып алған слюданың бетіне бірнеше тал мыс торын тегістеп қойып, ауа плазма қондырғысында 90 W-тық электр қуаты арқылы 5 минут өңделді. Өңделгеннен кейін мыс торын алып тастап, температура 490°C , газ ағу жылдамдығы $80\text{--}500\text{ см}^3/\text{мин}$, өсу уақыты 5-10 минут болатын шарт-жағдайда

висмут селениді өсіріледі. Бұл әдістің ең басты артықшылығы қолданылуы қарапайым, үлгіні өсірудің алдында тек қана 5-10 минут плазма қондырғысында өңделеді. Өңделгеннен кейінгі слюда жапырақшасының сыртқы бетінде ешқандай өзгеріс байқалмайды, бірақ ауа плазмалық кезінде слюда жапырақшасының сыртқы бет аумағында суға бейімделгіштік қасиетінде өзгеріс туылады.



7-сурет. Мыс торын слюда бетіне қаптау әдісі арқылы меңгермелі өсірілген висмут селениді наноқұрылымының оптикалық микроскоптағы суреті: (a) және (c) – сәуле өткізу моделі; (b) және (d) – сәуле шағылту моделі



8-сурет. (a) Мыс торын слюда бетіне қаптау әдісі арқылы меңгермелі өсірілген висмут селениді наноқұрылымының оптикалық микроскоптағы суреті; (b) дайындалған үлгі дара жапырақшаның атомдық күштік микроскоптағы суреті

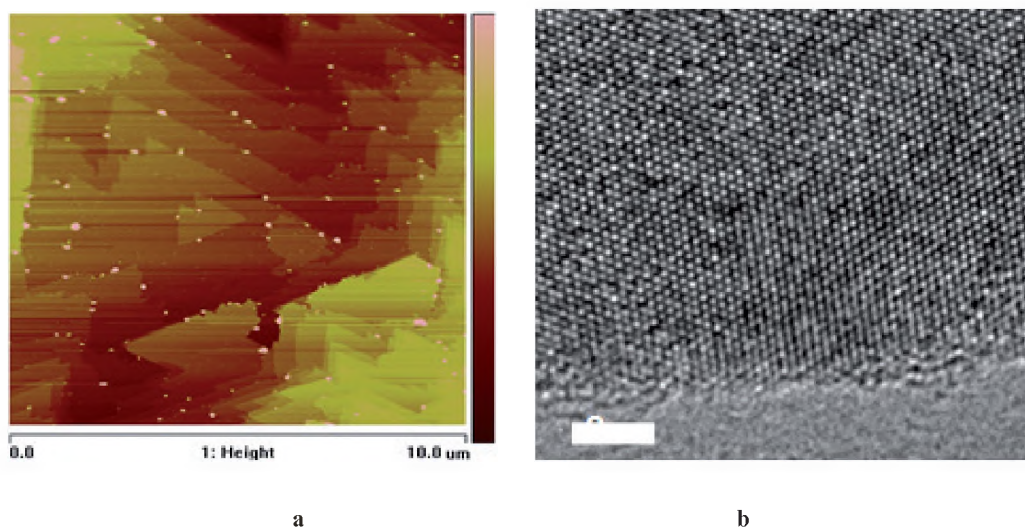
7-сурет пен 8-суретте нүктелі өсірілген висмут селениді екі өлшемді наноқұрылымының оптикалық микроскоптағы суреті көрсетілген. 7-суреттегі көрініс біз қолданған мыс торының құрылысына ұқсайды, әрі олар-

дың өлшемдері мен үлкен-кішілігі де бірдей. 7a және 7d-сурет болса үлкейтілген көрінісі, бұл суреттен висмут селенидінің үшбұрышты арал түріндегі құрылысы байқалады. Әрі нүктелі өсірілген висмут селениді екі өлшемді

наноқұрылымының Ван-дер-Ваальс күштері сыртқа кеңею арқылы өскенін, кристалл бөлшектердің слюда матрицасының сыртқы бетіне ретсіз өспегенін түсіндіреді. 8-суретте висмут селениді алдымен өзіне ыңғайлы орынға ядро қалыптастырып, содан соң 60 градустық бұрышты бойлап сыртқа кеңею арқылы өсіп, қабырғалары ретті болған алты бұрышты құрылысқа айналатындығы байқалады. 8b-суретте дайындалған үлгі дара жапырақшаның атомдық күштік микроскоптағы суреті көрсетілген. Бұл суреттен дайындалған үлгі дара жапырақшаның сыртқа

кеңею арқылы өскенін, дара жапырақшаның қалыңдықтары біркелкі, әрі 30 нм шамасында болатынын көреміз.

Дайындалған үлгінің сапасына қатысты сенімді ақпараттар алу үшін, жұмыста 7-суретте көрсетілген үлгілерге атомдық күштік микроскоп пен сәуле түсіру электронды микроскоптар арқылы олардың құрылымдық сипаттамаларына анализ жасалды (9-сурет). 9a-суреттегі атом күштік микроскоп арқылы түсірілген суреттен 60 градустық бұрыш пен қабаттың құрылысын анық көруге болады.



9-сурет. (a) Мыс торын слюда бетіне қаптау әдісі арқылы меңгермелі өсірілген висмут селениді наноқұрылымының атомдық күштік микроскоптағы суреті; (b) Меңгермелі өсірілген висмут селениді наноқұрылымының сәуле түсіру электронды микроскоптағы суреті

Қорытынды

Мақалада, “газ-қатты” өсу механизмін колданып, мыс торын слюда бетіне қаптау әдісі арқылы слюда матрицасында ұзындығы 80 μm , қалыңдығы 5 нм болатын селенді висмут селенидінің наножапырақшасы Ван-дер-Ваальстік сыртқа кеңею арқылы меңгермелі өсірілді. Үлгінің өсу формасына және қалың-

дығына температура, газдың ағу жылдамдығы сияқты факторлардың әсері анықталды. Слюда матрицасында висмут селенидінің әртүрлі формадағы екі өлшемді атомды кристалдары меңгермелі өсіріліп, соның ішінде тор формалы үлгінің сәуле өткізгіштігі басқаларына қарағанда жоғары екендігі анықталды.

Ескерту: Бұл жұмыс «China scholarship fund»-тың демеуімен орындалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. Zhang Y., He K., Chang C. Z. Crossover of three-dimensional topological insulator of Bi_2Se_3 to the two-dimensional limit // From arXiv.org, e-Print Archive, Condensed Matter. – 2009, 1-17, arXiv:0911.3706v1.
2. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V. Electric field effect in atomically thin carbon films // Science. – 2004. – V.306. – №5696. – P.666-669.

3. Teweldebrhan D., Goyal V., Balandin A. A. Exfoliation and characterization of bismuth telluride atomic quintuples and quasi-two-dimensional crystals // Nano Letters. –2010. –V.10. –№4. –P.1209-1218.
4. Xiong Q. H. Raman spectroscopy of few-quintuple layer topological insulator Bi_2Se_3 Nanoplatelets // Nano. Lett. –2011. –V.11. –№6. –P.2407–2414.
5. Kong D. S., Dang W. H., Cha J. J. Few-layer nanoplates of Bi_2Se_3 and Bi_2Te_3 with highly tunable chemical potential // Nano Letters. –2010. –V.10. –P.2245-2250.
6. Cha J. J., Williams J. R., Kong D. S. Magnetic doping and Kondo effect in Bi_2Se_3 Nanoribbons // Nano Letters. –2010. –V.10. –№3. –P.1076-1081.
7. Dumont J., Wiame F., Ghijsen J., Sporken R. Growth of atomically flat Ag on mica // Surface Science. –2004. –V.572(2-3). –P.459-466.
8. Higo M., Fujita K., Mitsushio M. Epitaxial growth and surface morphology of aluminium films deposited on mica studied by transmission electron microscopy and atomic force microscopy // Thin Solid Films. –2007. –V.516. –№1. –P.17-24.
9. Kojima N. Structural characterization of Mg-doped C_{60} thin films // Journal of Physics: Conference Series. –2009. –V.159. –№1. –P.012018.
10. Stephens C. J., Mouhamad Y., Meldrum F. C. Epitaxy of calcite on mica // Crystal Growth & Design. –2009. –V.10. –№2. –P.734-738.
11. Yunfan Guo, Mahaya Aisijiang, Kai Zhang. Selective-Area Van der Waals Epitaxy of Topological Insulator Grid Nanostructures for Broadband Transparent Flexible Electrodes // Adv. Mater. –2013. –V.25. –P.5959–5964.
12. Richter W., Becker C. R. A Raman and far-infrared investigation of phonons in the rhombohedral $\text{V}_2\text{-VI}_3$ compounds Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 , Sb_2Te_3 and $\text{Bi}_2(\text{Te}_{1-x}\text{Se}_x)_3$ ($0 < x < 1$), $(\text{Bi}_{1-y}\text{Sb}_y)_2\text{Te}_3$ ($0 < y < 1$) // Physica Status Solidi (B). –1977. –V.84. –№2. –P.619-628.