

# Взаимодействие атомов In с поверхностью $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ в процессе низкотемпературной адсорбции

© С.А. Пономарев<sup>1,2</sup>, Д.И. Роголо<sup>1,2</sup>, В.А. Голяшов<sup>1</sup>, Д.А. Насимов<sup>1</sup>, К.А. Кох<sup>3</sup>,  
Д.В. Щеглов<sup>1</sup>, А.В. Латышев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

E-mail: [ponomarev@isp.nsc.ru](mailto:ponomarev@isp.nsc.ru)

Поступила в Редакцию 5 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 6 декабря 2024 г.

Принята к публикации 6 декабря 2024 г.

Методами *in situ* отражательной электронной микроскопии, фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии изучен процесс адсорбции атомов индия на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при комнатной температуре с последующим отжигом при 200°C. Обнаружено формирование металлического висмута на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  и образование химической связи In–Se, соответствующие замещению и выходу атомов висмута на поверхность из приповерхностного слоя с формированием бислоя Bi(111). Методами атомно-силовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии в режиме обратнорассеянных электронов показано, что слой висмута имеет высоту 0.4 нм и лабиринтообразную морфологию, а на смежных участках поверхности визуализируется значительная концентрация индия.

**Ключевые слова:** индий,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ , бислой, замещение атомов, *in situ* ОЭМ, АСМ, РФЭС, ФЭСУР.

DOI: 10.61011/FTP.2024.11.59483.18S

## 1. Введение

Материалы с ван-дер-ваальсовой (ВДВ) щелью, в частности слоистые халькогениды металлов, являются перспективными для приложений фотовальтаики, фотоники и электроники [1–5]. Одной из особенностей представителей данного класса материалов является наличие множества структурных полиморфов — материал с одной и той же стехиометрией может иметь разнообразные кристаллические структуры, обладающие различными электронными и оптическими свойствами [5–7]. При этом, согласно первым обзорным работам, посвященным изучению слоистых халькогенидов металлов [1,8], наличие слабой ВДВ щели между слоями должно было обеспечить возможность получения слоистых гетероструктур с любыми необходимыми свойствами путем чередования двумерных (2D) слоев различных ВДВ материалов и(или) их полиморфных модификаций аналогично блокам конструктора „Lego“, при том независимо от кристаллической структуры самой ВДВ подложки.

Тем не менее попытки получить качественные слои ВДВ материалов такими методами эпитаксии, как, например, химическое осаждение из паровой фазы и молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ), выявили ряд проблем, заключающийся в высокой концентрации структурных дефектов, образующихся как на начальных стадиях, так и в процессе роста слоистых гетероструктур [5,9,10]. Помимо образования дефектов

в частных примерах также указывалась возможность диффузии, например, адсорбированных из молекулярного пучка атомов индия вглубь подложки слоистого  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  с последующим замещением атомов висмута, что влияло на подвижность носителей [11], а то и вовсе приводило к превращению слоя  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  в  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  [12] вследствие схожести их кристаллической структуры (параметры решеток  $a = 4.12 \text{ \AA}$ ,  $c = 28.48 \text{ \AA}$  и  $a = 3.99 \text{ \AA}$ ,  $c = 28.31 \text{ \AA}$  соответственно) [12–14]. Ранее также был продемонстрирован процесс высокотемпературной адсорбции субмонослойного покрытия индия ( $> 400^\circ\text{C}$ ) на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  с одновременным осаждением молекулярного пучка селена, приводивший к образованию и росту примесно-индуцированной 2D фазы индия с высотой 0.4 нм [15], которая локально подавляла сублимацию лежащего ниже слоя  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , что приводило к образованию звездообразных многослойных островков после сублимации нескольких слоев. Результаты упомянутых выше работ не дают полноценной информации о процессе взаимодействия индия с поверхностью  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при низких температурах (ниже температуры сублимации  $\text{Bi}_2\text{Se}_3 \approx 400^\circ\text{C}$ ) и его влиянии на последующий рост гетероструктур  $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Помимо этого, в опубликованной литературе до сих пор отсутствует информация об изменении зонной структуры поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при взаимодействии с индием, из-за чего существует востребованность в совокупном применении *in situ* и *ex situ* методов исследования.

В данной работе представлены результаты *in situ* и *ex situ* исследований взаимодействия атомов индия с поверхностью  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ , осажденных при комнатной температуре с последующим отжигом при  $200^\circ\text{C}$ . В результате экспериментов показано замещение атомов висмута адсорбированными атомами индия в приповерхностном слое, что приводило к образованию локальных участков индийсодержащей фазы  $\text{InSe}_x$ , покрытых бислоем висмута  $\text{Bi}(111)$  высотой 0.4 нм, образующихся за счет выхода замещенных атомов висмута на поверхность.

## 2. Методика проведения экспериментов и измерений

Для изучения процесса адсорбции индия на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  в колонне *in situ* ОЭМ использовались образцы с размерами  $7 \times 3 \times 0.3$  мм, полученные путем скальвания от монокристалла  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , выращенного методом Бриджмена [16,17]. Скальвание проводилось в атмосферных условиях с последующим снятием фасок с краев. В качестве осаждаемых материалов использовались индий чистотой 99.999% (Ted Pella, США) и селен чистотой 99.999% (Металлон, Россия). Калибровка испарителя индия проводилась по скорости образования поверхностной реконструкции  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  при  $450^\circ\text{C}$  на предварительно отожженной поверхности  $\text{Si}(111)$ , согласно [18–20].

Химический состав и электронная структура поверхности образцов исследовались методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР). Измерения проводились на фотоэлектронном спектрометре SPECS, оборудованном полусферическим анализатором энергий электронов ASTRAIOS-190 с электростатическим дефлектором, с использованием монохроматизированного излучения  $\text{AlK}_\alpha$  ( $h\nu = 1486.7$  эВ) для РФЭС и немонохроматизированного излучения  $\text{NoI}_\alpha$  ( $h\nu = 21.22$  эВ) для ФЭСУР. Индий осаждался на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  электронно-лучевым испарением из молибденового тигля, скорость осаждения контролировалась с помощью кварцевых микровесов и посредством РФЭС. Наблюдение за изменением атомной структуры поверхности проводилось посредством дифракции медленных электронов (ДМЭ).

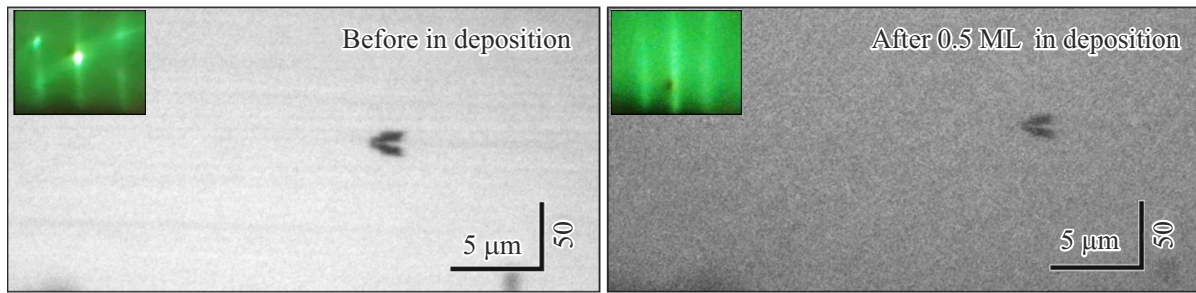
После экспериментов образцы изучались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ, Bruker, Multimode 8) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ, Hitachi SU8220).

## 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

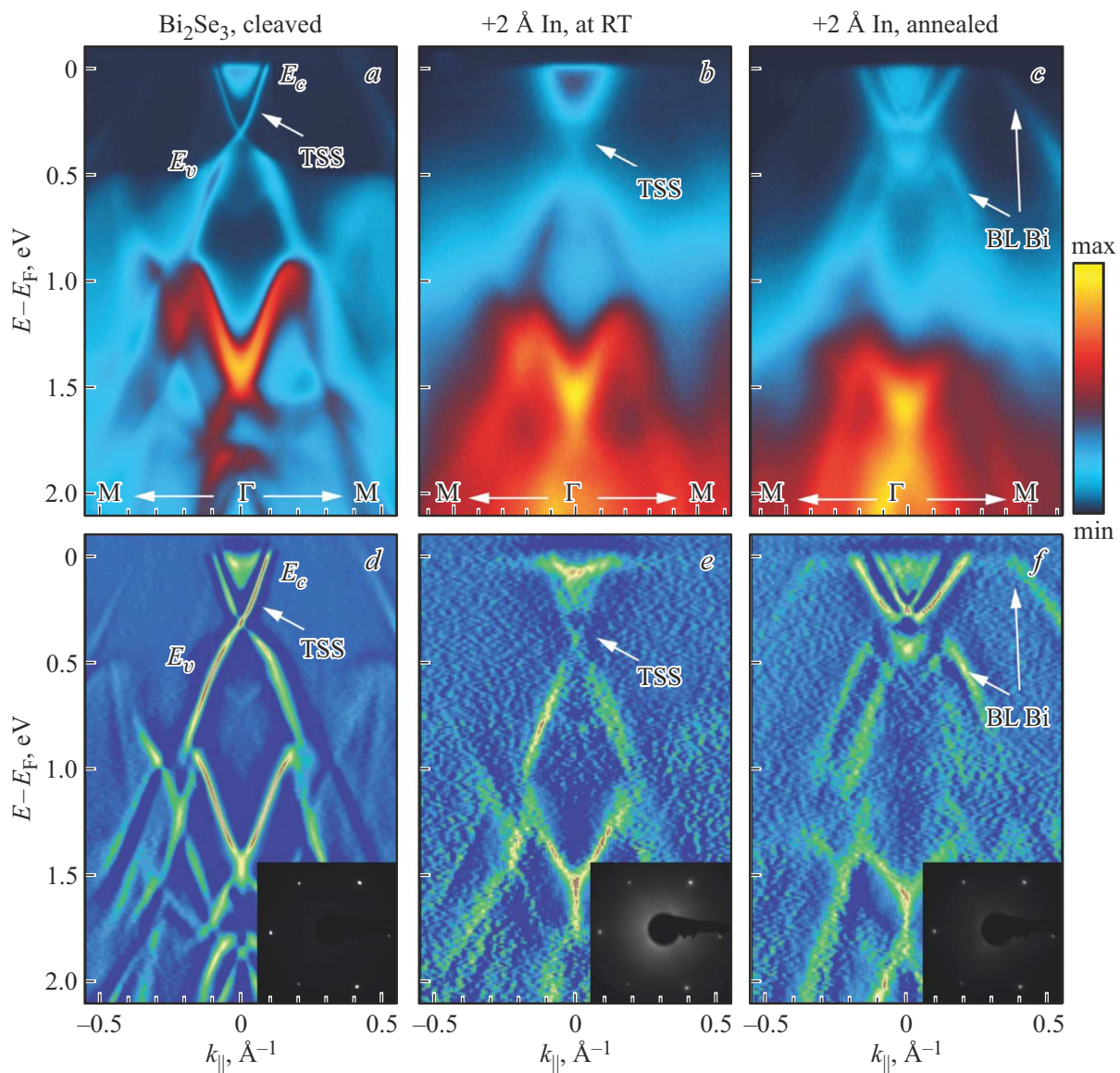
Для очистки поверхности образца  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  от загрязнений и частиц кристалла, образующихся на поверхности в результате скальвания в атмосферных

условиях, проводился отжиг при температуре  $450^\circ\text{C}$  в вакуумных условиях ( $\sim 10^{-7}$  Па) с одновременным осаждением селена (со скоростями  $\approx 0.1$  нм/с) в течение 10 мин — в этих условиях наблюдается конгруэнтная сублимация с сохранением общей морфологии поверхности [21]. Затем для изучения процесса адсорбции индия на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  проводились эксперименты с осаждением  $\approx 0.5$  МС индия ( $1 \text{ МС} \approx 0.2$  нм) со скоростью  $\approx 0.01$  нм/с при комнатной температуре подложки с последующим отжигом при  $200^\circ\text{C}$  в отсутствие потока селена на поверхность. Для *in situ* диагностики процессов на поверхности образца использовались методы дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО) и отражательной электронной микроскопии (ОЭМ). Осаждение  $\approx 0.5$  МС индия на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при комнатной температуре и последующий отжиг при  $200^\circ\text{C}$  приводили к снижению интенсивности картины ДБЭО и контраста террас на электронно-микроскопических изображениях (рис. 1), что свидетельствует о структурно-морфологической трансформации поверхности.

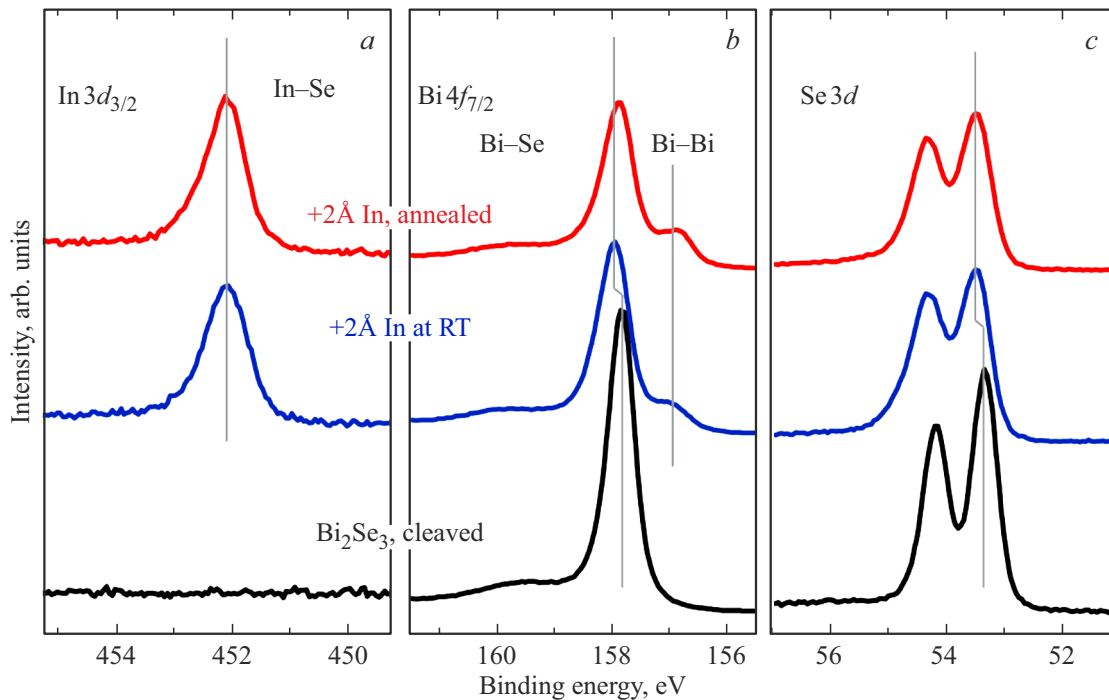
Аналогичные *in situ* эксперименты проводились в камере ФЭСУР при остаточном давлении  $5 \cdot 10^{-8}$  Па и скорости осаждения индия  $\approx 0.008$  нм/с. На рис. 2, *a* и *d* представлена картина дисперсии зон, полученная методом ФЭСУР для чистой поверхности скола  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  в направлении  $\text{M}-\Gamma-\text{M}$  вблизи  $\Gamma$ -точки поверхностной зоны Бриллюэна, и ее кривизна [22], позволяющая выделить основные детали в полученном спектре. Ниже уровня Ферми видны электронные состояния объемной зоны проводимости с параболическим законом дисперсии ( $E_c$ ) и поверхностные состояния топологического изолятора с квазилинейным дираковским спектром (TSS). Точка Дирака топологических поверхностных состояний расположена на 0.3 эВ ниже уровня Ферми — близко к потолку состояний объемной валентной зоны ( $E_v$ ). Осаждение 1 МС индия при комнатной температуре приводит к значительному уширению линий в спектрах ФЭСУР (рис. 2, *b* и *e*), однако все характерные для поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  спектральные особенности остаются различимыми. Также можно заметить сдвиг всех особенностей в спектрах в направлении больших энергий связи на  $\approx 0.1$  эВ, что может быть связано с изменением величины изгиба зон на поверхности либо дополнительным электронным легированием поверхности вследствие адсорбции атомов индия. Последующий прогрев образца при  $200^\circ\text{C}$  в течение 30 мин в сверхвысоком вакууме приводит к значительным изменениям в наблюдаемой электронной структуре поверхности (рис. 2, *c* и *f*). Вблизи  $\Gamma$ -точки появляются электронные состояния с сильным расщеплением Рашбы. Также появляется новый набор дырочных состояний: с параболическим законом дисперсии, пересекающим уровень Ферми в точках с  $k_{\parallel} = \pm 0.4 \text{ \AA}^{-1}$ , и М-образные вблизи  $\Gamma$ -точки при энергиях связи  $> 0.45$  эВ. Подобная картина в целом схожа со спектром состояний бислоя висмута  $\text{Bi}(111)$  на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  [23–25].



**Рис. 1.** ОЭМ-изображения поверхности до начала осаждения индия и после осаждения  $\approx 0.5$  ML индия, слева сверху ОЭМ-изображений поверхности — вставки картин ДБЭО, соответствующих поверхности до и после осаждения 0.5 нм индия.



**Рис. 2.** Спектры ФЭСУР поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ : *a* — после скола в вакууме, *b* — осаждения  $\approx 2 \text{ \AA}$  индия при комнатной температуре, *c* — последующего прогрева образца при  $200^\circ\text{C}$ . *d-f* — соответствующие картины кривизны спектров ФЭСУР, изображенных на *a-c*. Измерения сделаны в направлении М–Г–М зоны Бриллюэна поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при температуре 80 К,  $h\nu = 21.22 \text{ эВ}$ . На вставках показаны соответствующие картины ДМЭ, измеренные при энергии пучка электронов 39 эВ. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

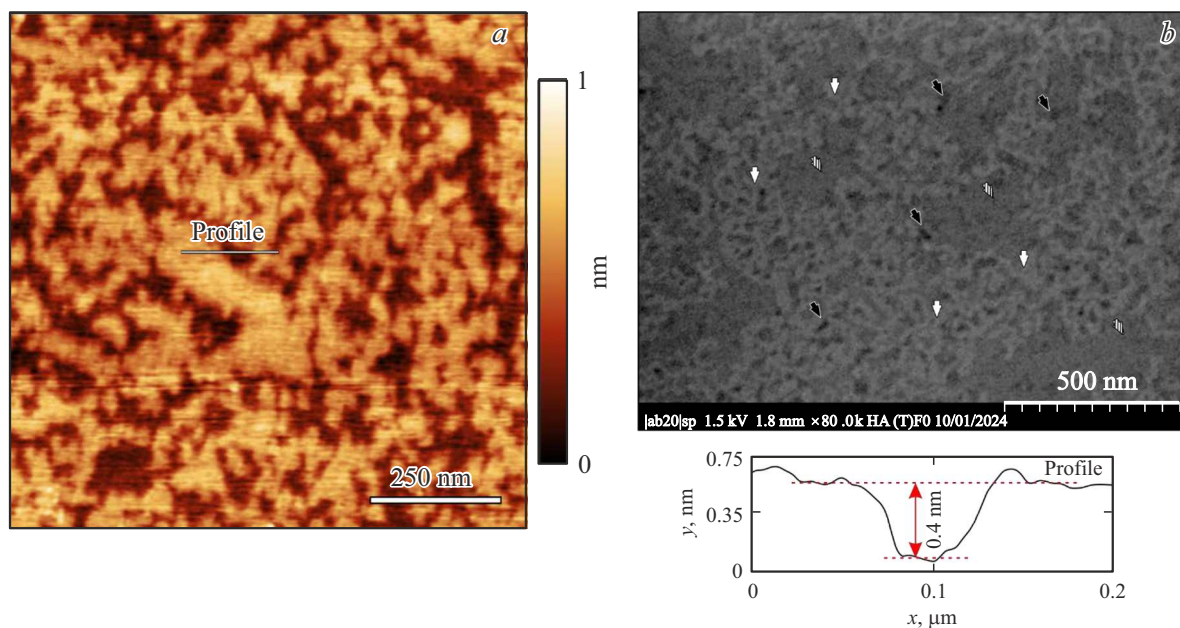


**Рис. 3.** Спектры РФЭС линий  $\text{In}3d$  (a),  $\text{Bi}4f_{7/2}$  (b) и  $\text{Se}3d$ , измеренные для чистой поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  после скола в вакууме (черные линии), после осаждения  $\approx 2 \text{ \AA}$  индия при комнатной температуре (синие линии) и последующего прогрева образца при  $200^\circ\text{C}$ .

Для изучения влияния адсорбции атомов In на химический состав поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  использовался метод РФЭС. На рис. 3 показаны изменения в спектрах РФЭС линий  $\text{In}3d$ ,  $\text{Bi}4f_{7/2}$  и  $\text{Se}3d$  поверхности скола  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  после осаждения слоя In толщиной  $\approx 2 \text{ \AA}$  при комнатной температуре и последующего прогрева образца при  $200^\circ\text{C}$ . Значения энергий связи РФЭС линий  $\text{Bi}4f_{7/2}$  и  $\text{Se}3d_{5/2}$  для чистой поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  составляют 157.83 и 53.34 эВ соответственно. Как ранее наблюдалось в спектрах ФЭСУР, осаждение атомов In приводит к смещению всех наблюдаемых фотоэмиссионных линий в направлении больших энергий связи на величину 0.14 эВ. Энергия связи линии  $\text{In}3d_{3/2}$  составляет 452.08 эВ, что на  $\approx 0.7 \text{ эВ}$  выше значения, ожидаемого для металлического индия в состоянии окисления  $\text{In}^0$  ( $E_b = 451.39 \text{ эВ}$ ) [26], и означает, что после осаждения все атомы индия химически связаны с атомами селена на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Кроме того, наблюдается уширение линии  $\text{Se}3d$  и появление дополнительной компоненты линии  $\text{Bi}4f_{7/2}$  с энергией связи 157 эВ, соответствующей появлению атомов висмута в состоянии  $\text{Bi}^0$ . Можно предположить, что осаждение атомов индия на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  при комнатной температуре приводит к замещению атомов висмута на атомы индия в приповерхностном квинтислое  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  и образованию аморфных кластеров Bi на его поверхности. Оценка эффективной толщины этого поверхностного слоя элементного висмута из соотношения интенсивности компонент Bi–Bi и Bi–Se линии  $\text{Bi}4f_{7/2}$  дает значение  $\approx 2 \text{ \AA}$ . Дополнительный прогрев образца приводит

к увеличению эффективной толщины поверхностного слоя Bi до  $\approx 2.9 \text{ \AA}$ , это значение близко к толщине бислоя висмута ( $3.9 \text{ \AA}$ ) и соответствует покрытию около 3/4 площади поверхности подложки  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ . Таким образом, на основе данных РФЭС можно утверждать, что осаждение атомов индия и дополнительный отжиг образца приводит к формированию гетероструктуры в виде бислоев Bi(111) на поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  с отдельными включениями фазы  $\text{InSe}_x$ . В картинах ДМЭ наблюдалось уменьшение интенсивности дифракционных рефлексов после осаждения атомов In на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  и последующего отжига, однако всегда сохранялась гексагональная картина дифракции ( $1 \times 1$ ) нереконструированной поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ . К сожалению, выделить особенности электронной и атомной структуры, содержащей индий, из фотоэмиссионных измерений не удалось. Тем не менее, поскольку при прогреве структур не происходит уменьшения интенсивности РФЭС линий In, можно утверждать, что диффузии атомов индия вглубь подложки либо формирования твердого раствора  $(\text{Bi}_{1-x}\text{In}_x)_2\text{Se}_3$  не происходит.

После проведенных методами *in situ* ОЭМ, РФЭС и ФЭСУР измерений АСМ-анализ морфологии поверхности показал отсутствие существенных отличий морфологии поверхности для образцов, полученных в колонне *in situ* ОЭМ и установке ФЭСУР, что свидетельствует об идентичности условий экспериментов. На рис. 4, a приведено изображение морфологии поверхности образцов после осаждения 1 МС индия, на котором можно видеть двумерный лабиринтообразный слой без выраженной



**Рис. 4.** *a* — АСМ-изображение поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  после осаждения индия с бислоями  $\text{Bi}(111)$  высотой 0.4 нм. *b* — СЭМ-изображение поверхности в режиме обратно-рассеянных электронов: белыми стрелками отмечены области, соответствующие бислоям  $\text{Bi}(111)$ , черными стрелками — области прореагировавшей с индием поверхности, но не покрытые бислоем  $\text{Bi}(111)$ , заштрихованными стрелками — области с исходной поверхностью  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ .

огранки границ с высотой  $\approx 0.4$  нм, занимающий  $\sim 60\%$  площади. С учетом результатов ФЭСУР и РФЭС это соответствует выходу  $\sim 1$  МС атомов висмута на поверхность из приповерхностного слоя и формированию бислоя  $\text{Bi}(111)$ , имеющего высоту 0.4 нм и занимающему около половины площади поверхности [25].

Для СЭМ-анализа поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  использовался образец с покрытием  $\sim 0.5$  МС индия, недостаточного для замещения атомов висмута в приповерхностном слое по всей поверхности, вследствие чего оставались локальные участки исходной поверхности, не трансформировавшейся вследствие взаимодействия с индием. На рис. 4, *b* приведено СЭМ-изображение поверхности, полученное с использованием детектора обратнорассеянных электронов, сигнал которого несет информацию о  $Z$ -контрасте (участки с большим содержанием элементов с высоким зарядовым числом  $Z$  имеют более яркий контраст). Можно видеть, что домены высотой 0.4 нм (согласно измерениям АСМ), отмеченные белыми стрелками, имеют светлый контраст, что соответствует повышенной концентрации атомов висмута, более тяжелых по сравнению с атомами селена и индия. Данные домены располагаются вокруг более темных областей, отмеченных черными стрелками, в которых приповерхностные атомы висмута замещены атомами индия, но не покрыты бислоем  $\text{Bi}(111)$ . Площадь, занимаемая светлым и темным контрастом, составляет около половины площади всего изображения поверхности. Остальную часть изображения занимают области контраста со средней интенсивностью, отмеченные заштрихованными стрелками и соответствующие

поверхности  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ , которая не трансформировалась в эксперименте из-за недостаточного количества осажденного индия. Такие области имеют промежуточный контраст по сравнению с участками, более темными из-за содержания индия, и лабиринтообразным слоем, более светлым из-за повышенной концентрации висмута. Таким образом, совокупность результатов, полученных методами АСМ, СЭМ, РФЭС и ФЭСУР, свидетельствует о замещении атомов висмута атомами индия в приповерхностном слое с их последующим агрегированием на поверхности в виде двумерного бислоя.

#### 4. Заключение

С использованием *in situ* ОЭМ, ФЭСУР и РФЭС проведены эксперименты по адсорбции индия на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  при комнатной температуре с последующим отжигом при  $\approx 200^\circ\text{C}$ . Обнаружено, что осаждение индия уже при комнатной температуре приводит к замещению атомов  $\text{Bi}$  в приповерхностном слое  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  атомами  $\text{In}$ . При последующем отжиге при  $\approx 200^\circ\text{C}$  вытесненные на поверхность атомы висмута формируют бислоем  $\text{Bi}(111)$ , имеющий лабиринтообразную морфологию без выраженной огранки границ и высоту 0.4 нм.

#### Финансирование работы

Эксперименты по изучению адсорбции индия на поверхность  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  методами *in situ* ОЭМ, АСМ, РФЭС и ФЭСУР выполнены при финансовой поддержке

РНФ (грант № 22-72-10124). Диагностика методом СЭМ выполнена при поддержке РНФ (грант № 19-72-30023). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП „Наноструктуры“. Используемый для подготовки образцов монокристалл  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  получен методом Бриджмена в рамках государственного задания IGM SB RAS 122041400031-2.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] S. Vishwanath, X. Liu, S. Rouvimov, L. Basile, N. Lu, A. Azcatl, K. Magno, R.M. Wallace, M. Kim, J.-C. Idrobo, J.K. Furdyna, D. Jena, H.G. Xing. *J. Mater. Res.*, **31** (7), 900 (2016).
- [2] F. Wang, Y. Zhang, Y. Gao, P. Luo, J. Su, W. Han, K. Liu, H. Li, T. Zha. *Small*, **15** (30), 1901347 (2019).
- [3] F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, A. Ramasubramaniam. *Nature Photonics*, **8** (12), 899 (2014).
- [4] G. Fiori, F. Bonaccorso, G. Iannaccone, T. Palacios, D. Neumaier, A. Seabaugh, S.K. Banerjee, L. Colombo. *Nature Nanotechnol.*, **9** (10), 768 (2014).
- [5] A. Giri, G. Park, U. Jeong. *Chem. Rev.*, **123** (7), 3329 (2023).
- [6] L. Liu, J. Dong, J. Huang, A. Nie, K. Zhai, J. Xiang, B. Wang, F. Wen, C. Mu, Z. Zhao, Y. Gong, Y. Tian, Z. Liu. *Chem. Mater.*, **31** (24), 10143 (2019).
- [7] J. Wu, Z. Hu, Z. Jin, S. Lei, H. Guo, K. Chatterjee, J. Zhang, Y. Yang, B. Li, Y. Liu, J. Lai, R. Vajtai, B. Yakobson, M. Tang, J. Lou, P.M. Ajayan. *Adv. Mater. Interfaces*, **3** (16), 1600383 (2016).
- [8] A.K. Geim, I.V. Grigorieva. *Nature*, **499** (7459), 419 (2013).
- [9] S. Vishwanath, P. Dang, H.G. Xing. *Molec. Beam Epitaxy*, 443 (2018).  
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812136-8.00017-7>
- [10] Y. Nie, A.T. Barton, R. Addou, Y. Zheng, L.A. Walsh, S.M. Eichfeld, R. Yue, C.R. Cormier, C. Zhang, Q. Wang, C. Liang, J.A. Robinson, M. Kim, W. Vandenberghe, L. Colombo, P.-R. Cha, R.M. Wallace, C.L. Hinkle, K. Cho. *Nanoscale*, **10** (31), 15023 (2018).
- [11] H.D. Lee, C. Xu, S.M. Shubeita, M. Brahlek, N. Koirala, S. Oh, T. Gustafsson. *Thin Sol. Films*, **556**, 322 (2014).
- [12] W.E. McMahon, C.L. Melamed, H. Zhang, J.L. Blackburn, P. Dippo, A.C. Tamboli, E.S. Toberer, A.G. Norman. *J. Cryst. Growth*, **573**, 126306 (2021).
- [13] X. Chen, H.D. Zhou, A. Kiswandhi, I. Miotkowski, Y.P. Chen, P.A. Sharma, A.L. Lima Sharma, M.A. Hekmaty, D. Smirnov, Z. Jiang. *Appl. Phys. Lett.*, **99** (26), 261912 (2011).
- [14] N. Balakrishnan, C.R. Staddon, E.F. Smith, J. Stec, D. Gay, G.W. Mudd, O. Makarovskiy, Z.R. Kudrynskiy, Z.D. Kovalyuk, L. Eaves, A. Patané, P.H. Beton. *2D Mater.*, **3** (2), 025030 (2016).
- [15] S.A. Ponomarev, D.I. Rogilo, D.A. Nasimov, K.A. Kokh, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev. *J. Cryst. Growth*, **628**, 127545 (2024).
- [16] K.A. Kokh, Y.M. Andreev, V.A. Svetlichnyi, G. V. Lanskii, A.E. Kokh. *Cryst. Res. Technol.*, **46** (4), 327 (2011).
- [17] K.A. Kokh, S. V. Makarenko, V.A. Golyashov, O.A. Shegai, O.E. Tereshchenko. *CrystEngComm*, **16** (4), 581 (2014).
- [18] S.A. Ponomarev, K.E. Zakhozhev, D.I. Rogilo, A.K. Gutakovskiy, N.N. Kurus, K.A. Kokh, D.V. Sheglov, A.G. Milekhin, A.V. Latyshev. *J. Cryst. Growth*, **631**, 127615 (2024).
- [19] A. Zotov, A. Saranin, O. Kubo, T. Harada, M. Katayama, K. Oura. *Appl. Surf. Sci.*, **159–160**, 237 (2000).
- [20] S. Ponomarev, D. Rogilo, A. Mironov, D. Sheglov, A. Latyshev. 2021 IEEE 22nd Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials. EDM, **2021** (18), 50 (2021).
- [21] S.A. Ponomarev, D.I. Rogilo, N.N.N. Kurus, L.S. Basalaeva, K.A. Kokh, A.G.G. Milekhin, D. V. Sheglov, A. V. Latyshev. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1984**, 012016 (2021)
- [22] P. Zhang, P. Richard, T. Qian, Y.-M. Xu, X. Dai, H. Ding. *Rev. Sci. Instrum.*, **82** (4), 043712 (2011).
- [23] L. Miao, Z.F. Wang, W. Ming, M.-Y. Yao, M. Wang, F. Yang, Y.R. Song, F. Zhu, A.V. Fedorov, Z. Sun, C.L. Gao, C. Liu, Q.-K. Xue, C.-X. Liu, F. Liu, D. Qian, J.-F. Jia. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **110** (8), 2758 (2013).
- [24] T. Lei, K.-H. Jin, N. Zhang, J.-L. Zhao, C. Liu, W.-J. Li, J.-O. Wang, R. Wu, H.-J. Qian, F. Liu, K. Ibrahim. *J. Phys. Condens. Matter*, **28**(25), 255501 (2016).
- [25] S.H. Su, P.Y. Chuang, S.W. Chen, H.Y. Chen, Y. Tung, W.C. Chen, C.H. Wang, Y.W. Yang, J.C.A. Huang, T.R. Chang, H. Lin, H.T. Jeng, C.M. Cheng, K.D. Tsuei, H.L. Su, Y.C. Wu. *Chem. Mater.*, **29** (21), 8992 (2017).
- [26] Alexander V. Naumkin, Anna Kraut-Vass, Stephen W. Gaarenstroom, Cedric J. Powell. NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database, NIST Standard Reference Database Number 20, National Institute of Standards and Technology [(Gaithersburg MD, 20899 (2000)].

Редактор Г.А. Оганесян

### Indium interaction with the $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$ surface under the low-temperature deposition

S.A. Ponomarev<sup>1,2</sup>, D.I. Rogilo<sup>1,2</sup>, V.A. Golyashov<sup>1</sup>, D.A. Nasimov<sup>1</sup>, K.A. Kokh<sup>3</sup>, D.V. Sheglov<sup>1</sup>, A.V. Latyshev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** The adsorption of indium atoms on the  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  surface at room temperature followed by annealing at 200°C was studied using *in situ* reflection electron microscopy, angle-resolved photoelectron spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy. The formation of a heterostructure in the form of a Bi(111) bilayer on the  $\text{Bi}_2\text{Se}_3(0001)$  surface and the formation of an In–Se chemical bond, which corresponded to the emergence of bismuth atoms on the surface from the near-surface layer with the next formation of a Bi(111) islands were shown. Regions with an increased indium content surrounded by labyrinthine bismuth islands without pronounced step faceting were observed by scanning electron microscopy in the backscattered electron mode. Bismuth islands Bi(111) with a height of  $\approx 0.4$  nm were also observed by atomic force microscopy.