

## Фазовый переход $\beta \Leftrightarrow \beta'$ с температурным гистерезисом в пленках $\text{In}_2\text{Se}_3$

© С.А. Пономарев<sup>1,2</sup>, Н.Н. Курусь<sup>1</sup>, В.А. Голяшов<sup>1</sup>, А.Ю. Мионов<sup>1</sup>, Д.И. Рогило<sup>1</sup>,  
А.Г. Милехин<sup>1</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

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

Поступила в Редакцию 19 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 26 сентября 2024 г.

Принята к публикации 26 сентября 2024 г.

Измерены температурные зависимости спектров комбинационного рассеяния света для пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  в процессе охлаждения до температуры жидкого азота и последующего нагрева до комнатной температуры. Спектры комбинационного рассеяния света демонстрируют изменения, соответствующие обратимому фазовому переходу  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3 \Leftrightarrow \beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  с гистерезисом в диапазоне 140–180 К, обнаруженному ранее по изменению атомной структуры поверхности и сопротивления пленки в  $10^4$  раз. Методом фотоэлектронной спектроскопии с угловым разрешением зарегистрированы изменения зонной структуры пленки, соответствующие данному фазовому переходу.

**Ключевые слова:** фазовый переход,  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , гистерезис, ФЭСУР, сопротивление, КРС.

DOI: 10.61011/FTP.2024.07.59180.6335N

### 1. Введение

После открытия графена в начале XXI века и изучения его перспективных свойств [1] постепенно возник [2,3] и сохраняет актуальность интерес к изучению других двумерных (2D) материалов, в частности слоистых халькогенидов металлов [4,5]. Слоистые халькогениды металлов являются перспективными материалами для применения в микроэлектронике, фотонике и фотовольтаике в связи с тем, что обладают полупроводниковыми, металлическими, диэлектрическими свойствами и свойствами топологических изоляторов [6]. Близкая к 1 нм толщина молекулярных слоев халькогенидов металлов и наличие слабой ван-дер-ваальсовой связи между ними обеспечивают высокую механическую гибкость и устойчивость к деформациям, что создает потенциал применения в гибкой электронике [7,8]. Разнообразие физических свойств позволяет использовать слоистые халькогениды металлов для различных приложений, например,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  и  $\text{In}_2\text{Se}_3$  обладают высоким коэффициентом поглощения электромагнитного излучения в диапазоне от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного [9]. Как итог, ван-дер-ваальсовы гетероструктуры на основе халькогенидов металлов имеют огромный потенциал применения их электронных и оптоэлектронных свойств при проектировании таких функциональных устройств, как туннельные транзисторы, устройства записи и хранения информации, фотодетекторы, солнечные элементы и др. [10]. Одним из ярких представителей халькогенидов металлов является слоистый  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , перспективный для создания на его основе солнечных фотоэлементов, фотоприемников и устройств памяти [6,11,12].

Для ряда халькогенидов металлов и, в частности,  $\text{In}_2\text{Se}_3$  присуще наличие полиморфных модификаций (фаз), имеющих одинаковую стехиометрию, но обладающих различными структурными и электронными свойствами. Например, недавно экспериментально обнаружено и теоретически предсказано не менее восьми фаз  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , при этом не все из них слоистые [11–13]. Однако, принимая во внимание стабильность фаз в нормальных условиях и их известные электрофизические свойства, в качестве кандидатов на прикладное использование обращают внимание фазы  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ ; остальные фазы  $\text{In}_2\text{Se}_3$  нестабильны в нормальных условиях [12,14–16].

Для  $\text{In}_2\text{Se}_3$  известно несколько фазовых переходов, меняющих его свойства, например, при повышении температуры в интервале 323–473 К, соответствующем фазовому переходу  $\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3 \Rightarrow \beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ , наблюдается скачок сопротивления на 3 порядка [15]. Данный фазовый переход делает возможным создание на основе  $\text{In}_2\text{Se}_3$  устройств хранения информации [17]. Недавно методом сканирующей туннельной микроскопии в диапазоне температур 140–180 К впервые зарегистрирован фазовый переход  $\beta \Leftrightarrow \beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  [14], где на основе расчетов из первых принципов предсказывалось, что один слой  $\beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  имеет запрещенную зону на 0.45 эВ шире, чем один слой  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ , при этом отмечалось, что увеличение количества слоев приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны с 2.06 до 1.42 эВ для  $\beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  и с 1.62 до 1.15 эВ для  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ . Однако в более современной работе [18] с использованием фотоэмиссионной спектроскопии с угловым разрешением (ФЭСУР) измеренная ширина запрещенной зоны объемного  $\beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  составила  $\sim 0.97$  эВ, тогда как в работе [19] методом ФЭСУР продемонстрировано, наоборот,

увеличение ширины запрещенной зоны при увеличении количества слоев  $\beta$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ . В работе [20] была измерена температурная зависимость электрического сопротивления пленки  $\beta$ - $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$ , демонстрирующая гистерезис сопротивления в диапазоне 140–180 К. При охлаждении образца от комнатной температуры, вблизи 140 К наблюдалось резкое уменьшение сопротивления в  $\sim 10^4$  раз, а обратный переход происходил при последующем нагреве образца  $> 180$  К. Таким образом, данный фазовый переход зафиксирован разными методами и разными авторскими коллективами, но опубликованные данные имеют ряд противоречий. Проведенные исследования свойств фаз  $\beta$ - и  $\beta'$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  и перехода между ними привел к опубликованию нескольких моделей атомной структуры фазы  $\beta'$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$  [12,14,18,19,21]. Однако обоснованный выбор корректной модели требует проведения комплексного анализа данных, полученных наибольшим числом различных экспериментальных методов, а также их моделирования соответствующими методами *ab initio* расчетов.

В данной работе представлены спектры комбинационного рассеяния света, экспериментально измеренные в процессе охлаждения пленки  $\beta$ - $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$  до температуры жидкого азота и нагреве до комнатной температуры с шагом 10 К, демонстрирующие фазовый переход  $\beta \leftrightarrow \beta'$ - $\text{In}_2\text{Se}_3$ . Впервые измерены фотоэмиссионные спектры с угловым разрешением при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

## 2. Методика проведения эксперимента и измерений

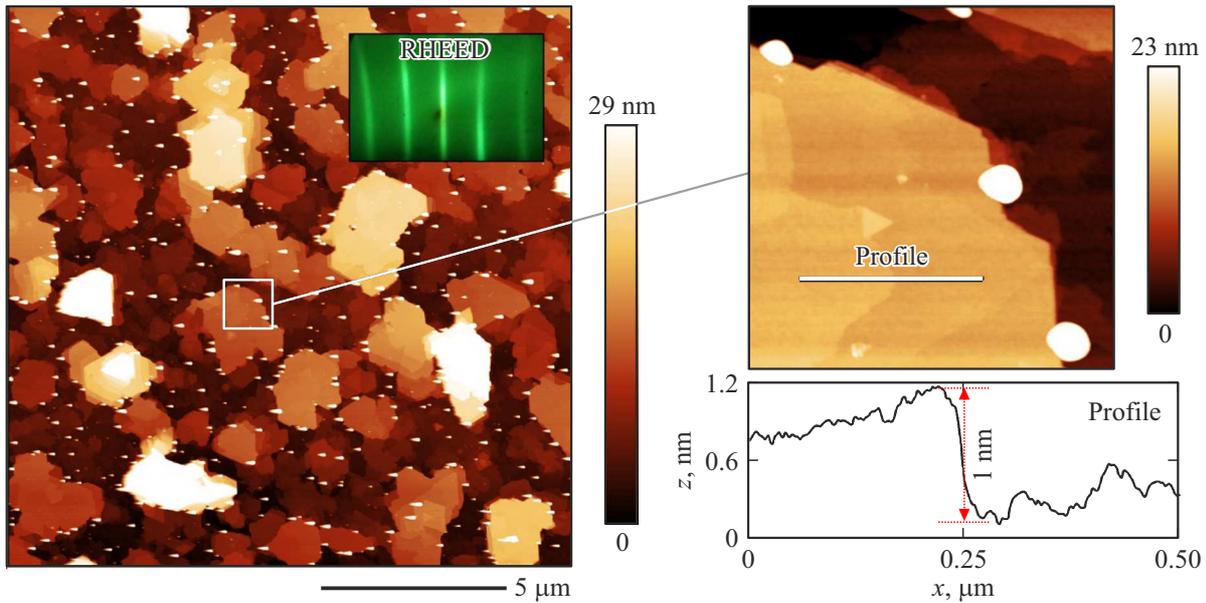
Рост пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  проводился на подложке  $\text{Si}(111)$  *n*-типа ( $0.3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ) с размерами  $7 \times 1 \times 0.38 \text{ мм}$  в колонне *in situ* отражательного электронного микроскопа (ОЭМ) с использованием испарителя, обеспечивающего возможность как отдельного, так и одновременного термического испарения селена и индия, формирующего молекулярные пучки селена и индия [22]. Нагрев образца проводился за счет пропускания электрического тока. Поверхность  $\text{Si}(111)$  очищалась путем отжига при температуре  $1300^\circ\text{C}$  длительностью 10 мин. Поток селена калибровался по скорости исчезновения рефлексов  $\text{Si}(111)$ - $7 \times 7$  при температуре  $450^\circ\text{C}$  в процессе образования индуцированной селеном поверхностной фазы „ $1 \times 1$ “ [23,24] с покрытием селена  $1/2 \text{ МС}$  ( $1 \text{ МС} = 7.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ). Поток индия калибровался по скорости образования реконструкции  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  на поверхности  $\text{Si}(111)$ - $7 \times 7$  при  $450^\circ\text{C}$ , образующейся при покрытии индия  $1/3 \text{ МС}$  [25]. В эксперименте использовалось соотношение потоков  $\text{In}/\text{Se}$  в диапазоне  $1/6$ – $1/3$ , при котором пленка  $\text{In}_2\text{Se}_3$  растет с наименьшей концентрацией дефектов [26]. После калибровки потоков  $\text{In}$  и  $\text{Se}$  проводился процесс удаления сверхструктуры  $\text{Si}(111)$ - $7 \times 7$  путем адсорбции  $1/3 \text{ МС}$  индия на поверхность  $\text{Si}(111)$  при  $450^\circ\text{C}$  для образования сверхструктуры  $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$  с последующим нагревом образца до

температуры  $600^\circ\text{C}$ , при которой индий сублимирует, оставляя атомно-чистую нереконструированную поверхность  $\text{Si}(111)$ - $1 \times 1$  [27]. Однако на такой поверхности  $\text{Si}(111)$  присутствуют оборванные ковалентные связи, препятствующие образованию слоистого  $\text{In}_2\text{Se}_3$  с вандер-ваальсовой связью с подложкой, вследствие чего необходимо проводить пассивацию поверхности  $\text{Si}(111)$  перед ростом  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . В работе [28] изучен процесс пассивации поверхности атомами халькогена ( $\text{Te}$ ), замыкающими ковалентные связи с образованием димеров. При этом селен, как и теллур, является халькогеном, и в данной постановке эксперимента является наиболее приемлемым для пассивации оборванных связей: проводилась адсорбция  $1 \text{ МС}$  селена при температуре  $100^\circ\text{C}$ . В работе [27] показано, что, начиная рост слоистого  $\text{SnSe}_2$  путем кристаллизации аморфного слоя, можно достигнуть низкой концентрации дефектов в пленке. Аналогичный процесс реализован и в данной работе: после пассивации поверхности атомами селена проводилось осаждение  $1 \text{ нм}$  аморфного  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , после чего быстрым нагревом до ростовой температуры ( $450^\circ\text{C}$ ) проводилась кристаллизация аморфного слоя и дальнейший эпитаксиальный рост  $\text{In}_2\text{Se}_3$  толщиной не менее  $10 \text{ нм}$  (обусловленный пределом чувствительности спектрометра КРС). Контроль роста осуществлялся путем наблюдения картин дифракции быстрых электронов на отражение (ДБЭО). При появлении точечных рефлексов, характерных для трехмерно-островкового (3D) роста, поток индия прекращался и образец охлаждался до комнатной температуры в присутствии молекулярного потока селена, после чего происходило осаждение  $\sim 10 \text{ нм}$  селена для предотвращения взаимодействия пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  с атмосферой при последующем переносе в установку ФЭСУР для изучения зонной структуры. После этого полученная пленка изучалась методами комбинационного рассеяния света (КРС) и *ex situ* атомно-силовой микроскопии (АСМ).

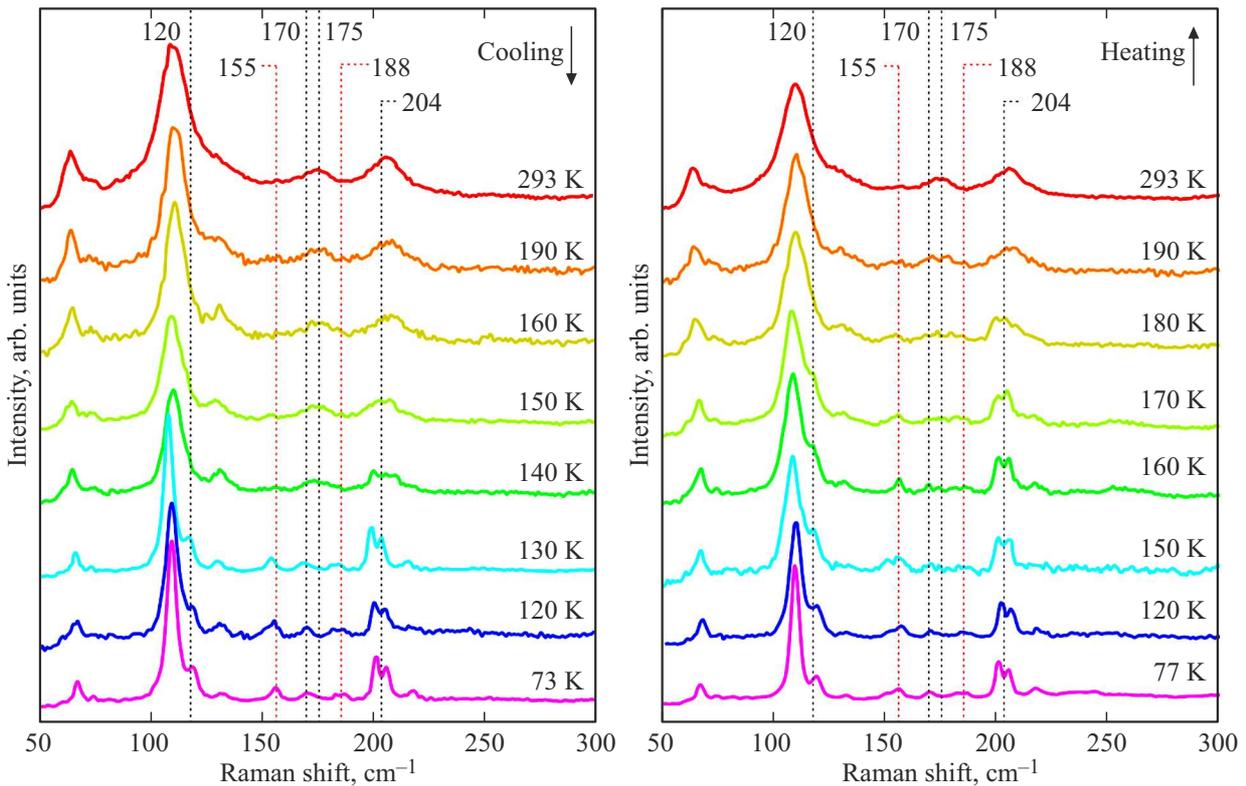
Измерения электронной структуры поверхности полученной пленки проводились методом ФЭСУР с использованием сверхвысоковакуумной установки фотоэлектронной спектроскопии SPECS ProvenX-ARPES, оборудованной полусферическим анализатором энергий электронов ASTRAIOS-190 с электростатическим дефлектором и немонахроматизированной гелиевой газоразрядной лампой UVS-300 (излучение  $\text{HeI}\alpha$ ,  $h\nu = 21.22 \text{ эВ}$ ). Структура и химический состав поверхности образца контролировались методами дифракции медленных электронов (ДМЭ) и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) соответственно. Измерения спектров комбинационного рассеяния света проводились с использованием спектрометра Horiba Xplora plus при возбуждении лазером с длиной волны  $532 \text{ нм}$ . Для изучения морфологии поверхности использовался атомно-силовой микроскоп Bruker Multimode 8.

## 3. Экспериментальные результаты

В колонне *in situ* отражательного электронного микроскопа на поверхности  $\text{Si}(111)$  выращена пленка  $\text{In}_2\text{Se}_3$



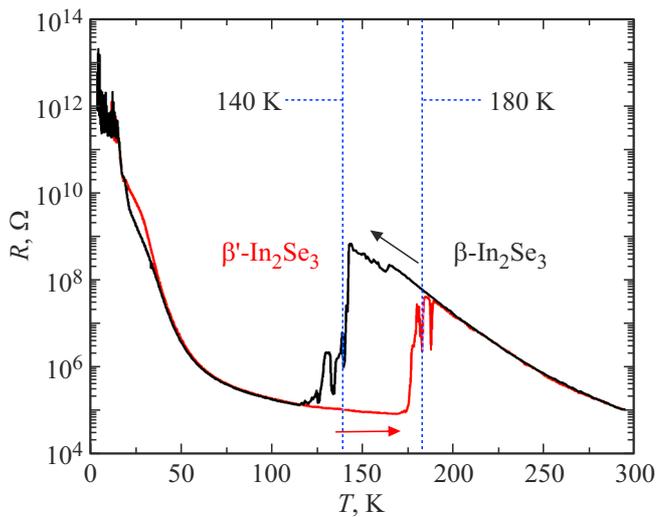
**Рис. 1.** АСМ-изображение поверхности пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$ . На вставке — картина ДБЭО в процессе роста). Справа: увеличенный фрагмент изображения трехмерного островка с профилем, полученным поперек атомной ступени  $\text{In}_2\text{Se}_3$  с высотой 1 нм. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).



**Рис. 2.** Спектры комбинационного рассеяния пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  в области фазового перехода  $\beta' \Leftrightarrow \beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  при охлаждении и нагреве.

номинальной толщиной  $\sim 20$  нм. Затем методом АСМ получено изображение морфологии поверхности пленки (рис. 1), на котором можно видеть островки слоистого  $\text{In}_2\text{Se}_3$  с латеральными размерами 1–3 мкм и высотой 10–15 нм, что согласуется с картинами дифракции быст-

рых электронов на отражение (ДБЭО) в виде гладких продолговатых тяжей, полученных во время эксперимента (см. вставку на рис. 1). На увеличенном изображении поверхности слоистого островка (рис. 1, справа) можно видеть атомно-гладкие террасы, разделенные атомными



**Рис. 3.** Гистерезис электрического сопротивления пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$  в области фазового перехода  $\beta \rightleftharpoons \beta'$  при охлаждении и нагреве.

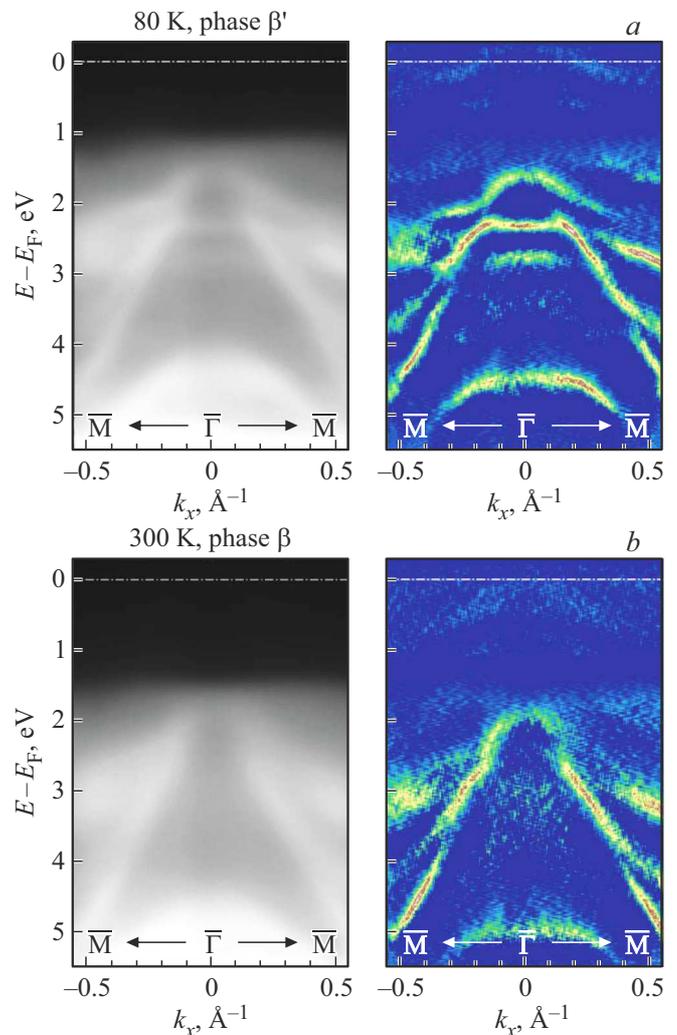
ступенями с высотой  $\sim 1$  нм, согласующейся с известными данными о высоте молекулярного слоя  $\text{In}_2\text{Se}_3$  [13]. Островки имеют низкую концентрацию дислокаций с винтовой компонентой ( $\sim 2 \text{ мкм}^{-2}$ ).

Спектры КРС измерялись в процессе охлаждения до 77 К и последующего нагрева до комнатной температуры (рис. 2). При охлаждении до температур  $\sim 140$  К на частоте  $175 \text{ см}^{-1}$  исчезал пик, соответствующий колебательной моде  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  [29], и впервые наблюдалось одновременное появление трех пиков на частотах 155, 170 и  $188 \text{ см}^{-1}$ . Также на графиках наблюдается появление плеча на  $120 \text{ см}^{-1}$  и четко различимой дублетной структуры на  $204 \text{ см}^{-1}$ . При последующем нагреве пленки до температуры выше  $\sim 180$  К наблюдалось восстановление исходных спектров: исчезновение отчетливого плеча и дублетной структуры на частотах 120 и  $204 \text{ см}^{-1}$  с одновременным исчезновением трех пиков на частотах 155, 170 и  $188 \text{ см}^{-1}$  и повторным появлением пика при  $175 \text{ см}^{-1}$ . Таким образом, наблюдаемый фазовый переход является обратимым и по диапазону температур гистерезиса соответствует переходу  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3 \rightleftharpoons \beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  (рис. 3), зарегистрированному в работах [14,20].

Наблюдаемые фазовые переходы должны также проявляться в дисперсии электронных состояний исследуемых пленок. На рис. 4, *a* представлена картина дисперсии состояний валентной зоны вблизи точки  $\Gamma$  зоны Бриллюэна поверхности образца  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , полученная методом ФЭСУР после отжига исходной структуры  $\text{Se/In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$  в вакууме при  $\sim 650$  К в течение 15 мин и быстрого ( $< 3$  мин) охлаждения до температуры 80 К, что приводило к формированию фазы  $\beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$ . В спектрах не наблюдалось фотоэмиссии из электронных состояний зоны проводимости в пределах всей зоны Бриллюэна. При этом потолок состояний валентной зоны лежит ниже уровня Ферми на 0.9 эВ, что

соответствует ширине непрямой запрещенной зоны объемного  $\beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  [18], и указывает на  $n$ -тип проводимости полученной пленки, и, таким образом, может объяснять резкое уменьшение сопротивления пленки в  $10^4$  раз при фазовом переходе  $\beta \Rightarrow \beta'$  (рис. 3). Для выделения особенностей дисперсии состояний валентной зоны на рис. 4, *a* справа приведена картина „кривизны“ фотоэлектронного спектра, полученная с помощью процедуры, представленной в работе [30].

При последующем нагреве образца до 300 К дисперсия состояний валентной зоны претерпевает значительные изменения (рис. 4, *b*). Положение потолка состояний валентной зоны смещается к большим энергиям связи и находится на  $\sim 1.5$  эВ ниже уровня Ферми, что соответствует увеличению ширины запрещенной зоны при переходе  $\beta'\text{-In}_2\text{Se}_3 \Rightarrow \beta\text{-In}_2\text{Se}_3$  [19,31]. Однако следует заметить, что данные изменения могут быть



**Рис. 4.** Картины дисперсии электронных состояний на поверхности пленки  $\text{In}_2\text{Se}_3$ , полученные методом ФЭСУР в сечении  $\text{M}-\Gamma-\text{M}$  при температуре образца 80 К (*a*) и 300 К (*b*). Слева — фотоэмиссионные спектры, справа — соответствующие картины „кривизны“ спектров.

связаны также с изменением поверхностного потенциала и соответствующего изменения поверхностного изгиба зон, обусловленного нагревом образца. Можно видеть, что при повышении температуры дисперсия зон значительно изменяется в диапазоне энергий связи 2–3 эВ. В частности, при переходе  $\beta'$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>  $\Rightarrow$   $\beta$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> пропадают дополнительные ветви электроно- и дырочноподобных состояний. Наблюдаемые изменения могут отражать изменения симметрии элементарной ячейки In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. Несмотря на то что в настоящий момент опубликовано несколько моделей атомной структуры фазы  $\beta'$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> [12,14,18,19,21], расчеты зонной структуры и колебательного спектра данной низкотемпературной фазы не проводились, что не позволяет выделить среди этих моделей наиболее точную.

#### 4. Заключение

Впервые измерены спектры комбинационного рассеяния света для пленки In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> при охлаждении до 77 К и последующем нагреве до комнатной температуры. Обнаружен гистерезис, соответствующий обратимому фазовому переходу  $\beta$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>  $\Leftrightarrow$   $\beta'$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. При охлаждении до температуры  $\sim$  140 К наблюдалось исчезновение пика при 175 см<sup>-1</sup>, соответствующего  $\beta$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, с одновременным появлением пиков 155, 170 и 188 см<sup>-1</sup>, явно выраженного плеча на 120 см<sup>-1</sup> и четко различимой дублетной структуры на 204 см<sup>-1</sup>. При нагреве  $>$  180 К спектр КРС восстанавливается до исходного. По данным ФЭСУР, при переходе  $\beta'$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>  $\Rightarrow$   $\beta$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> положение потолка состояний валентной зоны смещается с 0,9 эВ в направлении больших энергий связи и находится на  $\sim$  1,5 эВ ниже уровня Ферми, что соответствует увеличению ширины запрещенной зоны  $\beta$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> при фазовом переходе  $\beta'$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>  $\Rightarrow$   $\beta$ -In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. При этом фаза  $\beta'$  обладает проводимостью  $n$ -типа, что может объяснять резкое уменьшение сопротивления пленки при переходе  $\beta \Rightarrow \beta'$ . Полученные экспериментальные данные дополняют доступную информацию о фазовом переходе  $\beta \Leftrightarrow \beta'$ : гистерезисе электрического сопротивления пленки In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> с падением в  $\sim 10^4$  раз и атомной структуре поверхности In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-72-10124) с использованием оборудования ЦКП „Наноструктуры“.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

[1] A.K. Geim, K.S. Novoselov. *Nature Materials*, **6** (3), 183 (2007).

- [2] K.S. Novoselov, D. Jiang, F. Schedin, T.J. Booth, V.V. Khotkevich, S.V. Morozov, A.K. Geim. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **102** (30), 10451 (2005).
- [3] A.K. Geim, I.V. Grigorieva. *Nature*, **499** (7459), 419 (2013).
- [4] K. Zhang, T. Zhang, J. You, X. Zheng, M. Zhao, L. Zhang, J. Kong, Z. Luo, S. Huang. *Small*, **20** (19), 2307587 (2024).
- [5] A. Giri, G. Park, U. Jeong. *Chem. Rev.*, **123** (7), 3329 (2023).
- [6] S. Vishwanath, X. Liu, S. Rouvimov, L. Basile, N. Lu, A. Azcatl, K. Magno, R. Wallace, M. Kim, J. Idrobo, J. Furdyna, D. Jena, H. Xing. *J. Mater. Res.*, **31** (7), 900 (2016).
- [7] Z. Yang, J. Hao. *Adv. Mater. Technol.*, **4** (8), 1900108 (2019).
- [8] W. Zheng, T. Xie, Y. Zhou, Y. Chen, W. Jiang, S. Zhao, J. Wu, Y. Jing, Y. Wu, G. Chen, Y. Guo, J. Yin, S. Huang, H. Xu, Z. Liu, H. Peng. *Nature Commun.*, **6**, 6972 (2015).
- [9] F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, A. Ramasubramaniam. *Nature Photonics*, **8** (12), 899 (2014).
- [10] W. Liao, Y. Huang, H. Wang, H. Zhang. *Appl. Mater. Today*, **16**, 435 (2019).
- [11] W. Li, F.P. Sabino, F. Crasto de Lima, T. Wang, R.H. Miwa, A. Janotti. *Phys. Rev. B*, **98** (16), 165134 (2018).
- [12] J. Li, H. Li, X. Niu, Z. Wang. *ACS Nano*, **15** (12), 18683 (2021).
- [13] X. Tao, Y. Gu. *Nano Lett.*, **13** (8), 3501 (2013).
- [14] F. Zhang, Z. Wang, J. Dong, A. Nie, J. Xiang, W. Zhu, Z. Liu, C. Tao. *ACS Nano*, **13** (7), 8004 (2019).
- [15] C. Julien, M. Eddrief, M. Balkanski, E. Hatzikraniotis, K. Kambas. *Phys. Status Solidi*, **88** (2), 687 (1985).
- [16] H. Li, J. Luo, J. Zhang, X. Shi. *J. Phys. Chem. C*, **127** (46), 22510 (2023).
- [17] J. Igo, M. Gabel, Z. Yu, L. Yang, Y. Gu. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2** (10), 6774 (2019).
- [18] J.L. Collins, C. Wang, A. Tadich, Y. Yin, C. Zheng, J. Hellerstedt, A. Grubisic-Cabo, X. Tang, S. Mo, J. Riley, E. Huwald, N. Medhekar, M. Fuhrer, M. Edmonds. *ACS Appl. Electron. Mater.*, **2** (1), 213 (2020).
- [19] Q. Meng, F. Yu, G. Liu, J. Zong, Q. Tian, K. Wang, X. Qiu, C. Wang, X. Xi, Y. Zhang. *Nanomaterials*, **13** (9), 1533 (2023).
- [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] J. Liang, H. Jin, J. Zhang, X. Chen. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1622** (1), 4 (2020).
- [22] A.V. Latyshev, L.I. Fedina, D.I. Rogilo, S.V. Sitnikov, S.S. Kosolobov. *Atomically Controlled Silicon Surface* (Parallel, Novosibirsk, 2016). ISBN978-5-98901-188-9,-0
- [23] D.I. Rogilo, L.I. Fedina, S.A. Ponomarev, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev. *J. Cryst. Growth*, **529**, 125273 (2020).
- [24] S.A. Ponomarev, D.I. Rogilo, A.S. Petrov, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev. *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **56** (5), 449 (2020).
- [25] A.V. Zotov, A.A. Saranin, O. Kubo, T. Harada, M. Katayama, K. Oura. *Appl. Surf. Sci.*, **159–160**, 237 (2000).
- [26] B. Thomas. *Appl. Phys. A: Solids Surf.*, **54** (3), 293 (1992).
- [27] 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).
- [28] D. Dragoni. *Phys. Rev. B*, **106** (19), 1 (2022).
- [29] L. Liu, J. Dong, J. Huang, 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).

- [30] P. Zhang, P. Richard, T. Qian, Y.-M. Xu, X. Dai, H. Ding. Rev. Sci. Instrum., **82** (4), 043712 (2011).
- [31] Z. Lu, G.P. Neupane, G. Jia, H. Zhao, D. Qi, Y. Du, Y. Lu, Z. Yin. Adv. Funct. Mater., **30** (40), 1 (2020).

Редактор А.Н. Смирнов

### $\beta \Leftrightarrow \beta'$ phase transition with temperature hysteresis in $\text{In}_2\text{Se}_3$ films

S.A. Ponomarev<sup>1,2</sup>, N.N. Kurus<sup>1</sup>, V.A. Golyashov<sup>1</sup>,  
A.Y. Mironov<sup>1</sup>, D.I. Rogilo<sup>1</sup>, A.G. Milekhin<sup>1</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

**Abstract** The temperature dependences of Raman scattering for  $\text{In}_2\text{Se}_3$  films were measured during cooling to the liquid nitrogen temperature and subsequent heating to the room temperature. The Raman spectra show a reversible  $\beta\text{-In}_2\text{Se}_3 \Leftrightarrow \beta'\text{-In}_2\text{Se}_3$  phase transition with hysteresis in the range of 140–180 K previously discovered by a change in the atomic structure of the surface and the sharp decrease in electrical resistance by a factor of  $\sim 10^4$  during cooling. The ARPES measurements display changes in film's band structure corresponding to this phase transition.