

Фазовый переход $\beta \Leftrightarrow \beta'$ с температурным гистерезисом в пленках In_2Se_3

© С.А. Пономарев^{1,2}, Н.Н. Курусь¹, В.А. Голяшов¹, А.Ю. Миронов¹, Д.И. Рогило¹,
А.Г. Милехин¹, Д.В. Щеглов¹, А.В. Латышев^{1,2}

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

² Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

E-mail: 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 In_2Se_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, In_2Se_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, MoS_2 , Bi_2Te_3 и In_2Se_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 In_2Se_3 , перспективный для создания на его основе солнечных фотоэлементов, фотоприемников и устройств памяти [6,11,12].

Для ряда халькогенидов металлов и, в частности, In_2Se_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 In_2Se_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 α -, β - и γ - In_2Se_3 ; остальные фазы In_2Se_3 нестабильны в нормальных условиях [12,14–16].

Для In_2Se_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 In_2Se_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 ~ 0.97 эВ, тогда как в работе [19] методом ФЭСУР продемонстрировано, наоборот,

увеличение ширины запрещенной зоны при увеличении количества слоев β - In_2Se_3 . В работе [20] была измерена температурная зависимость электрического сопротивления пленки β - $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$, 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 β - и β' - In_2Se_3 и перехода между ними привел к опубликованию нескольких моделей атомной структуры фазы β' - In_2Se_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 β - $\text{In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$ до температуры жидкого азота и нагреве до комнатной температуры с шагом 10 К, демонстрирующие фазовый переход $\beta \leftrightarrow \beta'$ - In_2Se_3 . Впервые измерены фотоэмиссионные спектры с угловым разрешением при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

2. Методика проведения эксперимента и измерений

Рост пленки In_2Se_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°C длительностью 10 мин. Поток селена калибровался по скорости исчезновения рефлексов $\text{Si}(111)$ - 7×7 при температуре 450°C в процессе образования индуцированной селеном поверхностной фазы „ 1×1 “ [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 $\text{Si}(111)$ - 7×7 при 450°C , образующейся при покрытии индия $1/3 \text{ МС}$ [25]. В эксперименте использовалось соотношение потоков In/Se в диапазоне $1/6$ – $1/3$, при котором пленка In_2Se_3 растет с наименьшей концентрацией дефектов [26]. После калибровки потоков In и Se проводился процесс удаления сверхструктуры $\text{Si}(111)$ - 7×7 путем адсорбции $1/3 \text{ МС}$ индия на поверхность $\text{Si}(111)$ при 450°C для образования сверхструктуры $\sqrt{3} \times \sqrt{3}$ с последующим нагревом образца до

температуры 600°C , при которой индий сублимирует, оставляя атомно-чистую нереконструированную поверхность $\text{Si}(111)$ - 1×1 [27]. Однако на такой поверхности $\text{Si}(111)$ присутствуют оборванные ковалентные связи, препятствующие образованию слоистого In_2Se_3 с вандер-ваальсовой связью с подложкой, вследствие чего необходимо проводить пассивацию поверхности $\text{Si}(111)$ перед ростом In_2Se_3 . В работе [28] изучен процесс пассивации поверхности атомами халькогена (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 МС селена при температуре 100°C . В работе [27] показано, что, начиная рост слоистого 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 нм аморфного In_2Se_3 , после чего быстрым нагревом до ростовой температуры (450°C) проводилась кристаллизация аморфного слоя и дальнейший эпитаксиальный рост In_2Se_3 толщиной не менее 10 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 In_2Se_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 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 In_2Se_3

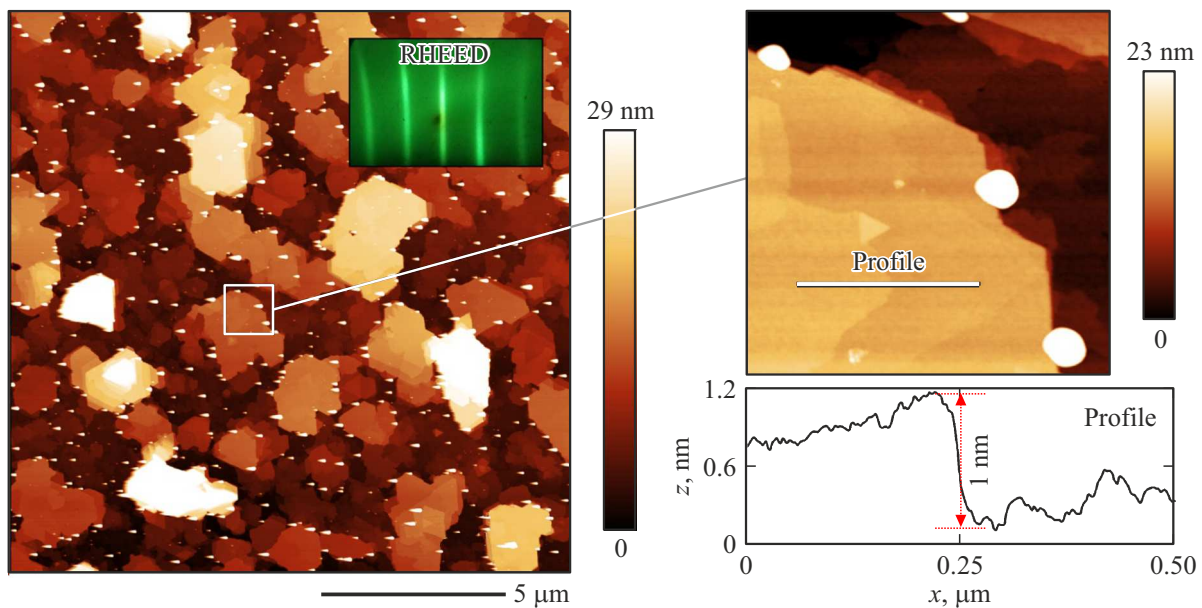


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности пленки In_2Se_3 . На вставке — картина ДБЭО в процессе роста). Справа: увеличенный фрагмент изображения трехмерного островка с профилем, полученным поперек атомной ступени In_2Se_3 с высотой 1 нм. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

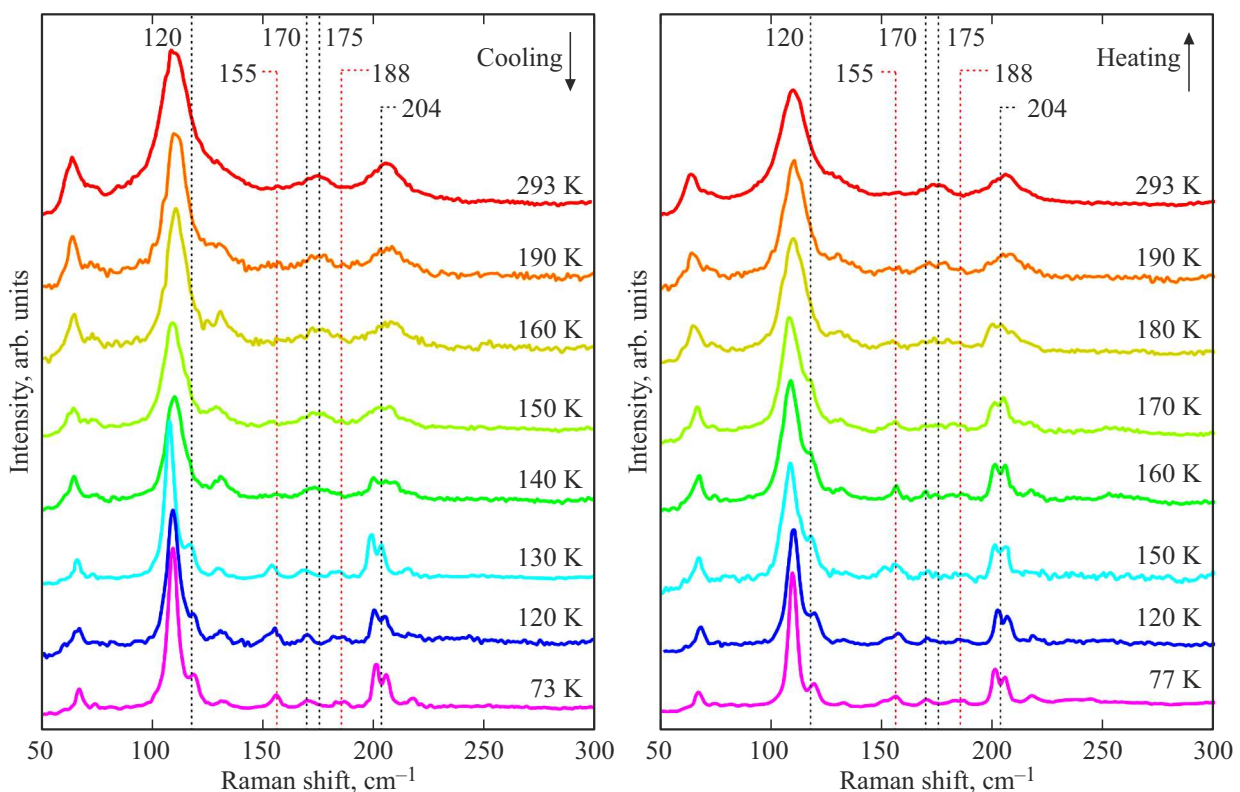


Рис. 2. Спектры комбинационного рассеяния пленки In_2Se_3 в области фазового перехода $\beta' \Leftrightarrow \beta\text{-In}_2\text{Se}_3$ при охлаждении и нагреве.

номинальной толщиной ~ 20 нм. Затем методом АСМ получено изображение морфологии поверхности пленки (рис. 1), на котором можно видеть островки слоистого In_2Se_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

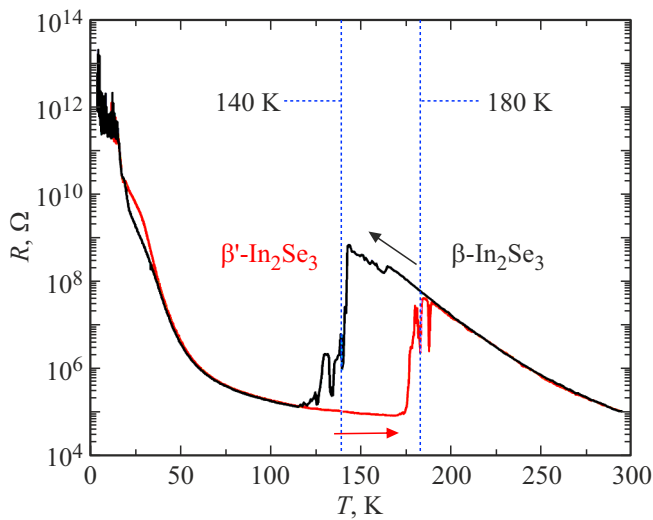


Рис. 3. Гистерезис электрического сопротивления пленки In_2Se_3 в области фазового перехода $\beta \rightleftharpoons \beta'$ при охлаждении и нагреве.

ступенями с высотой ~ 1 нм, согласующейся с известными данными о высоте молекулярного слоя In_2Se_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 ~ 140 К на частоте 175 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 см^{-1} . Также на графиках наблюдается появление плеча на 120 см^{-1} и четко различимой дублетной структуры на 204 см^{-1} . При последующем нагреве пленки до температуры выше ~ 180 К наблюдалось восстановление исходных спектров: исчезновение отчетливого плеча и дублетной структуры на частотах 120 и 204 см^{-1} с одновременным исчезновением трех пиков на частотах 155, 170 и 188 см^{-1} и повторным появлением пика при 175 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 Γ зоны Бриллюэна поверхности образца In_2Se_3 , полученная методом ФЭСУР после отжига исходной структуры $\text{Se/In}_2\text{Se}_3/\text{Si}(111)$ в вакууме при ~ 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 не прямой 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 ~ 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

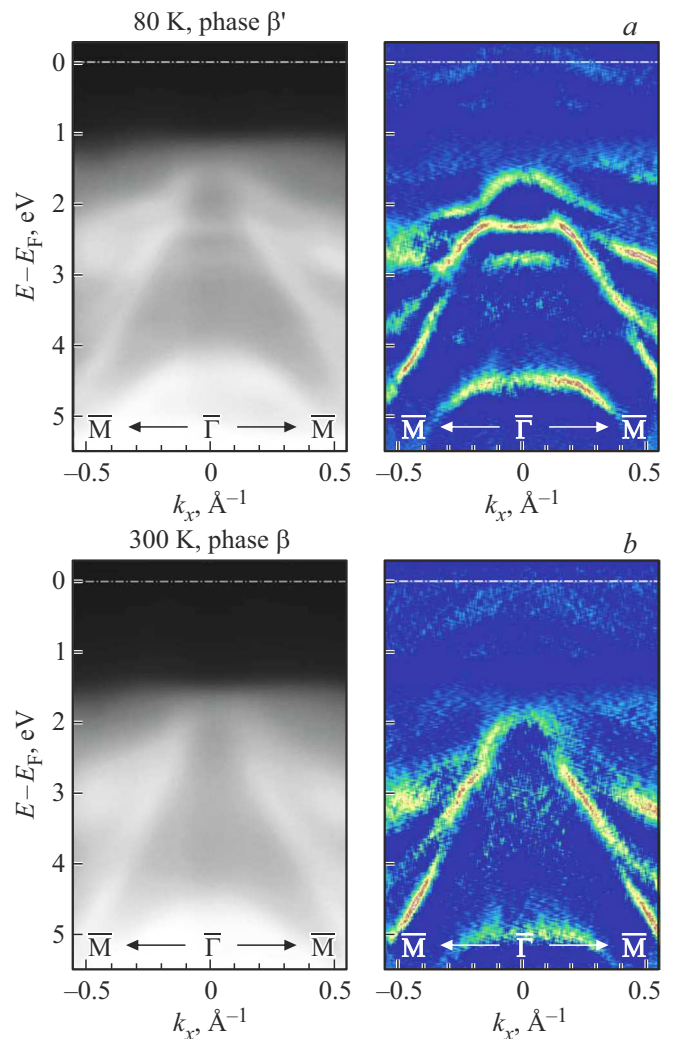


Рис. 4. Картины дисперсии электронных состояний на поверхности пленки In_2Se_3 , полученные методом ФЭСУР в сечении $\text{M}-\Gamma-\text{M}$ при температуре образца 80 К (*a*) и 300 К (*b*). Слева — фотоэмиссионные спектры, справа — соответствующие картины „кривизны“ спектров.

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 β' -In₂Se₃ \Rightarrow β -In₂Se₃ пропадают дополнительные ветви электроно- и дырочноподобных состояний. Наблюдаемые изменения могут отражать изменения симметрии элементарной ячейки In₂Se₃. Несмотря на то что в настоящий момент опубликовано несколько моделей атомной структуры фазы β' -In₂Se₃ [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 In₂Se₃ при охлаждении до 77 К и последующем нагреве до комнатной температуры. Обнаружен гистерезис, соответствующий обратимому фазовому переходу β -In₂Se₃ \Leftrightarrow β' -In₂Se₃. При охлаждении до температуры \sim 140 К наблюдалось исчезновение пика при 175 см⁻¹, соответствующего β -In₂Se₃, с одновременным появлением пиков 155, 170 и 188 см⁻¹, явно выраженного плеча на 120 см⁻¹ и четко различимой дублетной структуры на 204 см⁻¹. При нагреве $>$ 180 К спектр КРС восстанавливается до исходного. По данным ФЭСУР, при переходе β' -In₂Se₃ \Rightarrow β -In₂Se₃ 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 β -In₂Se₃ при фазовом переходе β' -In₂Se₃ \Rightarrow β -In₂Se₃. При этом фаза β' 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 In₂Se₃ с падением в $\sim 10^4$ раз и атомной структуре поверхности In₂Se₃.

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 In_2Se_3 films

S.A. Ponomarev^{1,2}, N.N. Kurus¹, V.A. Golyashov¹,
A.Y. Mironov¹, D.I. Rogilo¹, A.G. Milekhin¹,
D.V. Sheglov¹, A.V. Latyshev^{1,2}

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

² Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

Abstract The temperature dependences of Raman scattering for In_2Se_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.