

УДК 539.234
МРНТИ 29.19.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2026-23-1-325-333>

¹Оман З.,

магистр, ORCID ID: 0009-0008-0681-8475,
e-mail: omankaznu@gmail.com

¹Нурлыбеков Н.О.,

магистр, ORCID ID: 0009-0006-1917-4547,
e-mail: idcnurken@gmail.com

¹Карibaева К.А.,

магистр, ORCID ID: 0009-0008-6949-3161,
e-mail: kaldygul.karibaeva@bk.ru

¹Жылысбаев У.К.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0001-8892-4026,
ulankhan0802@gmail.com

¹Хуан М.,

магистр, ORCID ID: 0009-0000-4907-4623,
e-mail: maohua0114@gmail.com

¹Мархабаева А.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,
e-mail: aiko_marx@mail.ru

¹Немкаева Р.Р.,

магистр, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,
e-mail: quasisensus@mail.ru

^{1*}Мухаметкаримов Е.С.,

PhD, доцент, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,
*e-mail: yerzhan.mukhametkarimov@kaznu.kz

¹Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа,
КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК СЕЛЕНИДА ИНДИЯ

Аннотация

В данной работе проведено исследование кристаллизации аморфных пленок селенида индия (InSe) при термической обработке в инертной атмосфере. Пленки получены методом термического испарения объемных кристаллов InSe стехиометрического состава в условиях высокого вакуума. Анализ структуры пленок осуществлялся методами рамановской спектроскопии и рентгеновской дифракции, результаты которых указывают на изначальную аморфную фазу, которая переходит в структуру стехиометрического InSe с гексагональной кристаллической решеткой в результате термической обработки при температуре 350 °С. Особенностью исследуемых пленок является значительный контраст в удельном электрическом сопротивлении между аморфным и кристаллическим состояниями. Переход в кристаллическую фазу сопровождается резким снижением электрического сопротивления на несколько порядков, что позволяет косвенно оценить температуру кристаллизации пленок путем измерения зависимости сопротивления образца от температуры. В данной работе обнаружено резкое изменение электрического сопротивления в области ~ 140 °С, соответствующее температуре кристаллизации исследуемых образцов. Полученные результаты подтверждают

возможность формирования поликристаллической пленки InSe на больших площадях, что, в свою очередь, является важным при создании прототипов оптоэлектронных устройств. Кроме того, в работе продемонстрирована возможность локальной кристаллизации пленок InSe с использованием технологии лазерного гравирования.

Ключевые слова: термическое испарение, тонкие пленки селенида индия, фазовый переход, рентгеноструктурный анализ, рамановская спектроскопия, лазерное гравирование.

Введение

Бинарные полупроводниковые халькогенидные соединения, в частности селенид индия (InSe), являются многофункциональными материалами и представляют большой интерес как в кристаллическом состоянии, так и в виде тонких аморфных пленок из-за способности обратной фазовой трансформации под действием температуры [1–4]. Маленькая эффективная масса электронов, а также рекордно высокая подвижность носителей заряда в кристаллическом InSe ($>10^3$ см²/В·с) делают их перспективными материалами в нано- и оптоэлектронике [5–7].

Слоистый кристалл InSe является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны порядка ~ 1.3 эВ при комнатной температуре [8, 9]. Каждый слой кристалла состоит из последовательного чередования атомов в виде Se-In-In-Se. В свою очередь, слои связаны между собой слабыми молекулярными силами Ван-дер-Ваальса, что обеспечивает возможность их легкого расщепления на отдельные двумерные слои. Благодаря этому открывается перспектива создания миниатюрных и гибких электронных устройств, в частности высокочувствительных фотодетекторов с использованием двумерных слоев атомарной толщины [9–11].

Тонкая пленка InSe представляет интерес в качестве фазопеременного материала, демонстрирующего обратимый фазовый переход «аморфное состояние – кристалл». Фазовый переход, как правило, инициируется термическим воздействием, чаще всего нагревом короткими электрическими или оптическими импульсами. Эта способность пленок открывает перспективы создания энергонезависимых ячеек памяти для записи или перезаписи информации, создания активных фотонных устройств со способностью обратимого и контролируемого изменения оптических свойств [12–17].

В связи с вышеуказанными уникальными свойствами в данной работе проведены исследования процесса кристаллизации аморфных пленок InSe, полученных методом термического испарения. Понимание механизмов кристаллизации имеет ключевое значение для последующего управления структурой и свойствами тонкопленочных материалов, что, в свою очередь, критично для создания устройств памяти с изменяемой фазой, фотонных и оптоэлектронных компонентов на основе InSe.

Материалы и методы

Исходные объемные кристаллы InSe были получены путем стехиометрического сплавления высокочистых (4N) частиц индия (In) и селена (Se) в кварцевой ампуле при температуре 870 °С в условиях высокого вакуума. Структура синтезированных кристаллов InSe контролировалась с помощью рентгеновской дифракции (Rigaku Miniflex) и рамановской спектроскопии (Solver Spectrum, NT-MDT), а элементный состав пленок – методом энергодисперсионного анализа (EDS) с использованием приставки EDAX на сканирующем электронном микроскопе (SEM, Quanta 3D 200i, FEI). Далее полученные кристаллы фиксированной массы были термически испарены и осаждены на кварцевые стекла (КУ-1) и кремниевые подложки. Для определения температуры кристаллизации полученных пленок проводились измерения температурной зависимости их удельного электрического сопротивления. Для предотвращения процессов окисления пленок при нагреве измерения осуществлялись в атмосфере особо чистого (ОСЧ, Ихсан Техногаз) аргона. Для этого пленки на кварцевых подложках помещались

в герметичную камеру, обеспечивающую стабильность инертной среды на протяжении всего измерения. Камера оснащена двумя стальными игольчатыми электродами и нагревательным столиком. Скорость нагрева в процессе электрических измерений составляла 2 °С в минуту, что позволило достаточно точно определить изменения проводимости пленок при их структурной перестройке. Для обеспечения полной кристаллизации образцы были выдержаны при максимальной температуре (350 °С) в течение 20 минут.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1(а) представлено СЭМ-изображение скола структуры объемного кристалла InSe, выращенного методом стехиометрического сплавления. Из рисунка видно, что объемные кристаллы InSe, использованные для термического испарения, имеют слоистую структуру. Состав объемных кристаллов, определенный методом энергодисперсионного анализа, также показал требуемое стехиометрическое соотношение элементов In и Se в пленках (таблица 1).

В данной работе была получена серия образцов тонкопленочного InSe различной толщины методом термического испарения кристаллов InSe в вакууме. Площадь получаемых пленок ограничивается только параметрами, определяемыми размерами камеры и испарителя. В нашем случае однородные по толщине пленки были получены на площади 1 см². Типичная морфология свежесаженных пленок InSe представлена на рисунке 1(б). Согласно результатам рентгеноструктурного анализа и рамановской спектроскопии, осажденные тонкие пленки InSe обладают аморфной структурой. Об этом свидетельствует отсутствие ярко выраженных пиков в рамановском спектре и в рентгеновской дифрактограмме. Для демонстрации на рисунке 2(а) и 2(б) красными кривыми представлены рамановский спектр и рентгеновская дифрактограмма свежесаженной на кварцевое стекло тонкой пленки InSe с толщиной порядка 165 нм. Важно отметить, что состав осажденной пленки InSe близок к стехиометрическому, так же как и состав исходного объемного кристалла InSe, что подтверждается результатами анализа элементного состава пленки, представленными в таблице 1.

Отжиг образцов при 350 °С в атмосфере ОСЧ аргона привел к кристаллизации тонких пленок. СЭМ-изображение поверхности кристаллизованной пленки можно увидеть на рисунке 1(с). Из рисунка видно возникновение трещин, связанных с термическим воздействием. Дифрактограмма кристаллизованных (с-InSe) тонких пленок, представленная на рисунке 1(а), соответствует гексагональной структуре InSe с параметрами решетки: $a = 3.998 \text{ \AA}$ и $c = 16.620 \text{ \AA}$ (пространственная группа: 194:Р6₃/mmc, номер карты: 00-034-1431). Появление пиков в рамановском спектре при 114 см⁻¹, 170 см⁻¹ и 214 см⁻¹, соответствующих фононным модам A₁, E_g и A₂, также подтверждает формирование кристаллической β-фазы InSe. В целом результаты исследования указывают на то, что постотжиг тонких пленок в инертной атмосфере позволяет получить поликристаллические пленки InSe на большой площади, что важно с точки зрения практического применения.

Таблица 1 – Элементный состав пленок InSe

Название	Элемент, ат.%	
	In	Se
Объемный кристалл InSe	49.57	50.43
a-InSe (аморфная свежесаженная пленка)	48.72	51.28
c-InSe (поликристаллическая тонкая пленка)	49.22	50.78

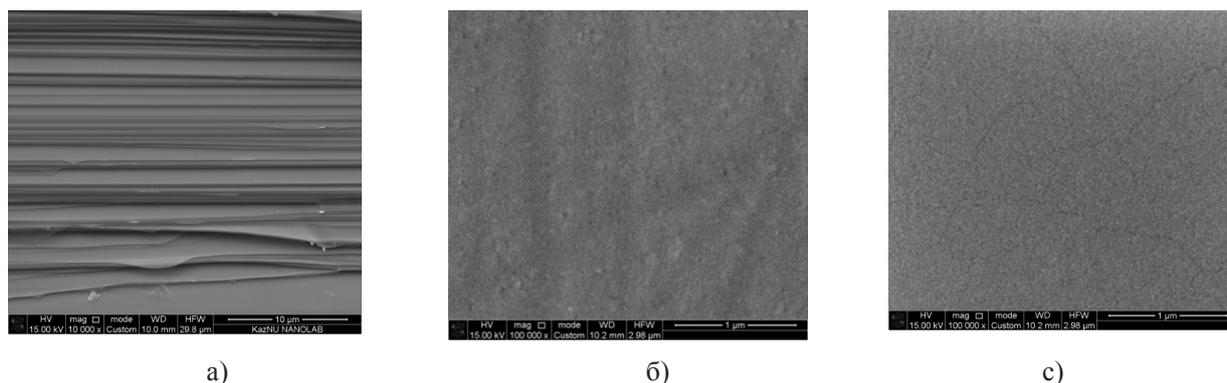


Рисунок 1 – СЭМ изображения (а) – скола структуры монокристаллического InSe; (б) – тонкой пленки InSe до отжига (аморфное состояние); (с) – тонкой пленки InSe после отжига (кристаллическое состояние)

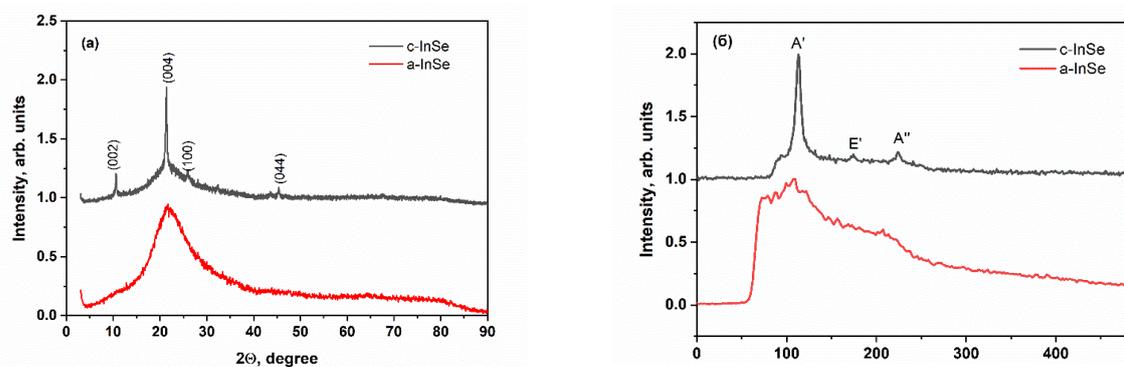


Рисунок 2 – Рентгеновская дифрактограмма (а) и рамановские спектры (б) тонкой пленки InSe до (a-InSe) и после отжига (c-InSe)

Температура, при которой происходит трансформация структуры пленок из аморфного состояния в кристаллическое, была выявлена косвенным методом, а именно изучением температурной зависимости электрического сопротивления пленок в атмосфере инертного газа. Дело в том, что пленки с аморфной структурой характеризуются высоким значением удельного электрического сопротивления, а в кристаллическом состоянии значение удельного электрического сопротивления на несколько порядков меньше. Поэтому при контролируемом нагреве можно наблюдать резкое изменение электрического сопротивления пленок, вызванное трансформацией структуры. В данной работе температурная зависимость сопротивления пленок была изучена в атмосфере ОСЧ аргона с использованием специальной герметичной камеры с контроллером нагрева столика. Скорость нагрева составила $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в минуту. Указанная зависимость представлена на графике рисунка 3 и характеризуется резким изменением поверхностного сопротивления пленок в области $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из представленной на рисунке зависимости видно, что сопротивление пленки InSe в кристаллическом состоянии на 4–5 порядков меньше, чем сопротивление пленки в аморфном состоянии, и сохраняется после охлаждения пленки. Выявленная температура фазового перехода имеет ключевое значение для разработки и оптимизации устройств активной фотоники и технологий энергонезависимой памяти. Резкое изменение удельного сопротивления в пленках InSe при структурной трансформации открывает возможность реализации фазопеременных элементов, в которых информация кодируется различными состояниями проводимости [14].

В системах оптической обработки сигналов такие пленки могут быть использованы в качестве управляемых модуляторов или оптических затворов, где переход между аморфным и кристаллическим состоянием изменяет коэффициент поглощения или преломления света, обеспечивая высокую контрастность переключения. Используя нагрев посредством достаточно мощного лазерного пятна, можно осуществлять локальную кристаллизацию создавая при этом фотонные структуры. В качестве доказательства на рисунке 4 представлена спектральная зависимость коэффициента поглощения пленок до и после отжига. Из рисунка видно, что коэффициент поглощения света аморфной пленки InSe уменьшается на порядок при ее кристаллизации, обеспечивая необходимый оптический контраст в видимом диапазоне. Данное изменение оптических свойств, а именно уменьшение оптического поглощения света, можно объяснить уменьшением дефектных состояний, характерных для аморфной фазы, и, соответственно, уменьшением плотности локализованных состояний в запрещенной зоне пленки InSe [18]. Это, в свою очередь, приводит к формированию более резкого края оптического поглощения и увеличению ширины запрещенной зоны тонкой пленки [19].

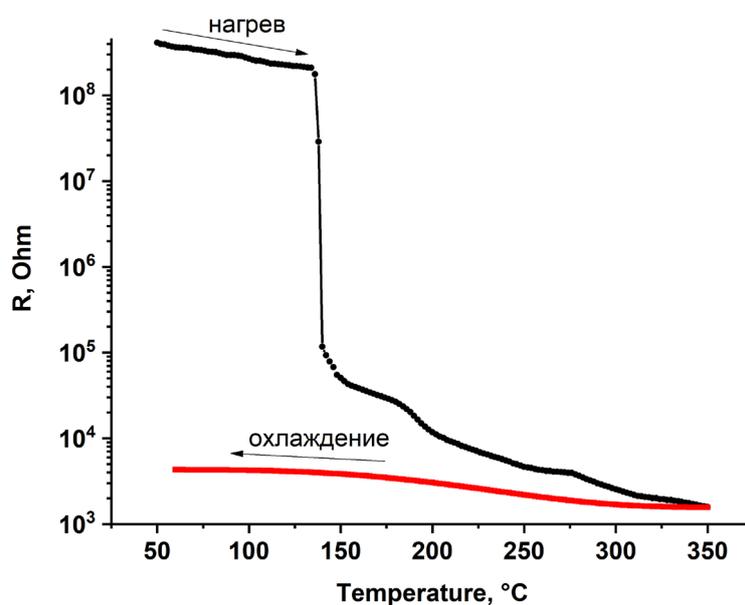


Рисунок 3 – Температурная зависимость сопротивления пленки InSe.
Измерения проведены в атмосфере ОСЧ аргона

Во вкладке рисунка 4 представлена оптическая микрофотография аморфной пленки с периодической структурой локальных кристаллических областей, полученных лазерным гравированием аморфной пленки InSe. Формирование таких локальных кристаллических областей с пониженным коэффициентом поглощения относительно аморфной фазы приводит к пространственной модуляции оптических свойств пленки, что экспериментально проявляется в виде оптического контраста и свидетельствует о решающей роли кристаллизации в изменении оптических характеристик InSe. Полученные результаты демонстрируют возможность прямой лазерной записи периодических кристаллических структур в аморфных пленках InSe большой площади без применения дополнительных литографических процессов. Такой подход является перспективным методом пространственного управления фазовым состоянием и оптическими параметрами материала и может быть использован при разработке новых фотонных и оптоэлектронных устройств на основе InSe.

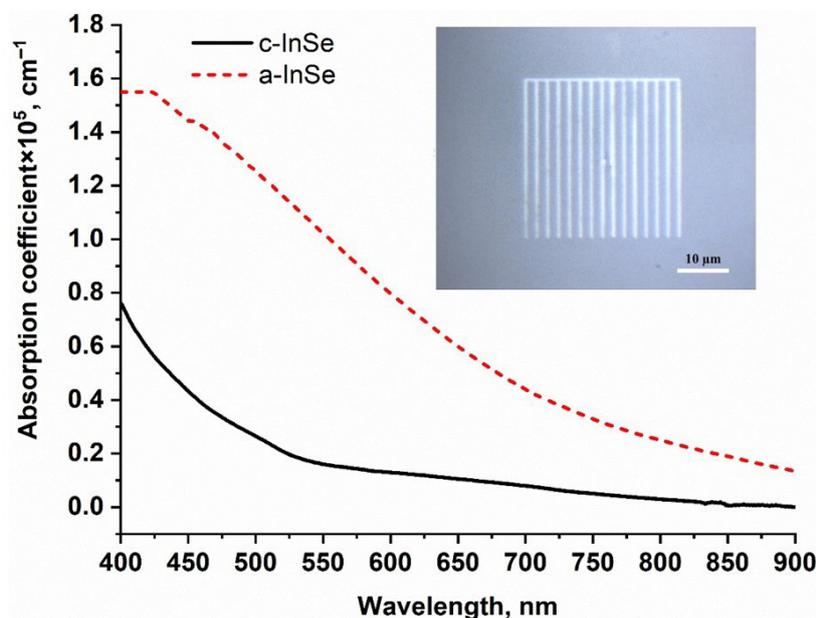


Рисунок 4 – Коэффициент поглощения тонкой пленки InSe до (a-InSe) и после отжига (c-InSe).

Заключение

Таким образом, в данной работе представлены результаты с указанием технологических параметров получения поликристаллических тонких пленок InSe большой площади. Предлагаемая технология заключается в контролируемой термической обработке аморфных пленок InSe в атмосфере инертного газа. Термический отжиг при температуре 350 °C в атмосфере особо чистого аргона приводит к кристаллизации пленок с формированием гексагональной фазы InSe, что подтверждается наличием характерных пиков на дифрактограммах и рамановских спектрах.

Температура фазового перехода была определена на основе температурной зависимости электрического сопротивления пленок. Резкое снижение сопротивления в области 140 °C свидетельствует о начале фазового перехода из аморфного состояния в кристаллическое.

Кроме того, в работе продемонстрирована возможность локальной кристаллизации тонких пленок аморфного InSe с использованием технологии лазерного гравирования. Лазерное тепловое воздействие обеспечивает пространственно локальную кристаллизацию материала, что позволяет формировать кристаллические области со структурными и оптическими свойствами, отличающимися от окружающей аморфной матрицы, с заданной периодичностью.

Полученные результаты демонстрируют возможность управляемой кристаллизации тонкой пленки InSe и показывают, что лазерно-индуцированное формирование пространственно-модулированных фазовых структур может рассматриваться как перспективный подход для создания устройств фазопеременной памяти, элементов оптоэлектроники и других наноразмерных компонентов.

Информация о финансировании. Работа выполнена в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН проекта AP26103225).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Chakraborty, I., Saha, G., Sengupta, A., and Roy, K. Toward fast neural computing using all-photonics phase change spiking neurons. *Scientific Reports*, 8 (1) (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31365-x>
- 2 Ahmed, T., Krishnamurthi, V., Mitchell, A., and Walia, S. Operating principle and device configuration driven mechanisms in low-dimensional materials for neuromorphics. *Advanced Intelligent Systems*, 5 (2023), 2200316. <https://doi.org/10.1002/aisy.202200316>
- 3 Prabhathan, P., Patinharekandy, et al. Roadmap for phase change materials in photonics and beyond. *iScience*, 26 (10) (2023), 107946. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107946>
- 4 Gong, Z., Yang, F., Wang, L., Chen, R., Wu, J., Grigoropoulos, C.P., and Yao, J. Phase change materials in photonic devices. *Journal of Applied Physics*, 129 (3), 030902 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0027868>
- 5 Bandurin, D.A., Tyurnina, A.V., Yu, G.L., Mishchenko, A., Zólyomi, V., Morozov, S.V., Kumar, R.K., Gorbachev, R.V., Kudrynskiy, Z.R., Pezzini, S., Kovalyuk, Z.D., Zeitler, U., Novoselov, K.S., Patané, A., Eaves, L., Grigorieva, I.V., Fal'ko, V.I., Geim, A.K., and Cao, Y. High electron mobility, quantum Hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe. *Nature Nanotechnology*, 12 (3), 223–227 (2017). <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.242>
- 6 Zhao, Q., Chen, P., Zheng, D., Wang, T., Castellanos-Gomez, A., and Frisenda, R. Multifunctional indium selenide devices based on van der Waals contacts: High quality Schottky diodes and optoelectronic memories. *Nano Energy*, 108 (2023), 108238. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108238>
- 7 Qin, B., Jiang, J., Wang, L., Guo, Q., Zhang, C., Xu, L., Ni, X., Yin, P., Peng, L.-M., Wang, E., Ding, F., Qiu, C., Liu, C., and Liu, K. Two-dimensional indium selenide wafers for integrated electronics. *Science*, 389, 299–302 (2025). <https://doi.org/10.1126/science.adu3803>
- 8 Aitzhanov, M., Guseinov, N., Nemkayeva, R., Tolepov, Zh., Prikhodko, O., and Mukhametkarimov, Ye. InSe crystals obtained by stoichiometric fusion for optoelectronic device application. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 13 (5) (2021), 05037. [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(5\).05037](https://doi.org/10.21272/jnep.13(5).05037)
- 9 Tamalampudi, S.R., Lu, Y.-Y., Kumar, U.R., Sankar, R., Liao, C.-D., Moorthy, B.K., Cheng, C.-H., Chou, F.C., and Chen, Y.-T. High performance and bendable few-layered InSe photodetectors with broad spectral response. *Nano Letters*, 14 (5) (2014). <https://doi.org/10.1021/nl500817g>
- 10 Wang, R., Wu, Q., Kiang, X., Fan, T., Guo, J., Wang, C., Zhang, F., Gao, Y., Zhang, M., Luo, Zh., and Zhang, H. A few-layer InSe-based sensitivity-enhanced photothermal fiber sensor. *Journal of Materials Chemistry C*, 8, 132–138 (2020). <https://doi.org/10.1039/C9TC05818D>
- 11 Guo, Z., Chen, R., Wang, H., Zhang, X., Ma, F., Chen, X., Gao, S., Sang, D.K., Nguyen, T.H., Duong, A.T., Zhang, J., Zeng, Y.-J., Choi, S., Zhao, B., Tan, P.-H., Zhang, H., and Feng, D. High-performance polarization-sensitive photodetectors on two-dimensional β -InSe. *National Science Review*, 9 (5) (2022). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab098>
- 12 Hossain, J., Julkarnain, M., Sharif, K.S., and Khan, K.A. Crystallization of e-beam evaporated amorphous InSe thin films after heat-treatment. *International Journal of Renewable Energy Technology Research*, 2 (2013), 220–226. http://ijretr.org/IJRETR_Vol.%202,%20No.%209,%20September%202013/Crystallization%20of.pdf
- 13 Persin, M., Celustka, B., Markovi, B., and Persin, A. Some electrical and optical properties of InSe thin films. *Thin Solid Films*, 5, 123–128 (1970). [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(70\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0040-6090(70)90030-1)
- 14 Xu, Z., Yuan, Y., Song, S., Song, Z., Liu, R., and Zhai, J. Successive crystallization in indium selenide thin films for multi-level phase-change memory. *Applied Surface Science*, 633 (2023), 157642. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157642>
- 15 Li, K., Ling, K., Li, W., and Liu, X. Controllable growth of γ -In₂Se₃ and β -InSe thin films for high-performance broadband photodetectors. *IEEE Sensors Journal*, 23 (24), 30318–30324 (2023). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3327382>
- 16 Emir, C., Tataroglu, A., Coşkun, E., and Ocak, S.B. Structural and optical properties of interfacial InSe thin film. *ACS Omega*, 9 (7), 7588–7596 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c06600>
- 17 Song, C., Huang, S., Wang, C., Luo, J., and Yan, H. The optical properties of few-layer InSe. *Journal of Applied Physics*, 128 (2020), 060901. <https://doi.org/10.1063/5.0018480>
- 18 Mott, N.F., and Davis, E.A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*, 2nd ed. Oxford: Clarendon Press (1979).
- 19 Singh, H., Kumari, S., Singh, P., Kumar, A., and Thakur, A. Effect of annealing on structural, morphological and optical properties of InSe thin films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33, 23599–23606 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10854-022-09118-4>

¹Оман З.,

магистр, ORCID ID: 0009-0008-0681-8475,
e-mail: omankaznu@gmail.com

¹Нурлыбеков Н.О.,

магистр, ORCID ID: 0009-0006-1917-4547,
e-mail: idcnurken@gmail.com

¹Кәрібаева Қ.Ә.,

магистр, ORCID ID: 0009-0008-6949-3161,
e-mail: kaldygul.karibaeva@bk.ru

¹Жылысбаев Ұ.К.,

бакалавр, ORCID ID: 0009-0001-8892-4026,
e-mail: ulankhan0802@gmail.com

¹Хуан М.,

магистр, ORCID ID: 0009-0000-4907-4623,
e-mail: maohua0114@gmail.com

¹Мархабаева А.А.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,
e-mail: aiko_marx@mail.ru

¹Немкаева Р.Р.,

магистр, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,
e-mail: quasisensus@mail.ru

^{1*}Мұхаметкаримов Е.С.,

PhD, доцент, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,
*e-mail: yerzhan.mukhametkarimov@kaznu.kz

¹Ашық типтегі ұлттық нанотехнологиялық зертхана,
әл-Фараби атындағы ҚазҰУ,
Алматы қ., Қазақстан

ИНДИЙ СЕЛЕНИДИНІҢ АМОРФТЫ ЖҰҚА ҚАБЫҚШАЛАРЫНЫҢ КРИСТАЛДАНУЫ

Аңдатпа

Бұл жұмыста инертті ортада термиялық өңдеу кезінде аморфты индий селениді (InSe) қабықшаларының кристалдануы зерттелді. Қабықшалар жоғары вакуум жағдайында стехиометриялық құрамдағы көлемді InSe кристалдарын термиялық буландыру әдісімен алынды. Қабықшалардың құрылымы раман спектроскопиясы және рентгенқұрылымдық талдау әдістері арқылы зерттелді. Алынған нәтижелер қабықшалардың бастапқы құрылымы аморфты екенін және оның 350°C температурада термиялық өңдеуден кейін гексагоналды кристалдық торға ие стехиометриялық InSe құрылымының қалыптасатынын көрсетті. Зерттелген қабықшалардың ерекшелігі – аморфты және кристалдық күйлер арасындағы меншікті электрлік кедергінің айтарлықтай айырмашылығында. Кристалдық фазаға өту электрлік кедергінің бірнеше реттік күрт төмендеуімен қатар жүреді, бұл үлгінің кедергісінің температураға тәуелділігін өлшеу арқылы қабықшалардың кристалдану температурасын жанама түрде анықтауға мүмкіндік береді. Бұл жұмыста шамамен 140°C маңында кедергінің күрт өзгерісі байқалды, ол зерттелген үлгілердің кристалдану температурасына сәйкес келеді. Алынған нәтижелер үлкен ауданда поликристалдық InSe қабықшаларын қалыптастыру мүмкіндігін растайды, бұл өз кезегінде оптоэлектрондық құрылғылардың прототиптерін жасау үшін маңызды. Сонымен қатар, жұмыста лазерлік өрнектеу технологиясын пайдаланып InSe жұқа қабықшаларын локалды кристалдандыру мүмкіндігі көрсетілді.

Тірек сөздер: термиялық буландыру, индий селенидінің жұқа қабықшалары, фазалық ауысу, рентген-құрылымдық талдау, раман спектроскопиясы, лазерлік өрнектеу.

¹Oman Z.,

MSc, ORCID ID: 0009-0008-0681-8475,
e-mail: omankaznu@gmail.com

¹Nurlybekov N.O.,

MSc, ORCID ID: 0009-0006-1917-4547,
e-mail: idcnurken@gmail.com

¹Karibaeva K.A.,

MSc, ORCID ID: 0009-0008-6949-3161,
e-mail: kaldygul.karibaeva@bk.ru

¹Zhylysbaev U.K.,

BSc, ORCID ID: 0009-0001-8892-4026,
e-mail: ulankhan0802@gmail.com

¹Huan M.,

MSc, ORCID ID: 0009-0000-4907-4623,
e-mail: maohua0114@gmail.com

¹Marhabaeva A.A.,

PhD, ORCID ID: 0000-0002-0657-422X,
e-mail: aiko_marx@mail.ru

¹Nemkaeva R.R.,

MSc, ORCID ID: 0000-0002-8782-703X,
e-mail: quasisensus@mail.ru

^{1*}Muhametkarimov E.S.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0003-1381-4532,
*e-mail: yerzhan.mukhametkarimov@kaznu.kz

¹National Open-Type Nanotechnology Laboratory,
Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan

CRYSTALLIZATION OF AMORPHOUS INDIUM SELENIDE THIN FILMS

Abstract

In this paper, we study the crystallization of amorphous indium selenide (InSe) films during heat treatment in an inert atmosphere. The films were obtained by thermal evaporation of bulk stoichiometric InSe crystals under conditions of high vacuum. The film structure was analyzed using Raman spectroscopy and X-ray diffraction analysis, the results of which indicate the initial amorphous phase that transforms into a stoichiometric InSe structure with a hexagonal crystal lattice under heat treatment at 350°C. A feature of the studied films is a significant contrast in the specific electrical resistance between the amorphous and crystalline states. The transition to the crystalline phase is accompanied by a sharp decrease in electrical resistance – by several orders of magnitude, which makes it possible to indirectly determine the crystallization temperature of the films by measuring the temperature dependence of the sample's resistance. In this work, a sharp change in resistance was found in the region of ~ 140°C, corresponding to the crystallization temperature of the studied samples. The obtained results confirm the possibility of forming a polycrystalline InSe film on large areas, which in turn is important when creating prototypes of optoelectronic devices. Furthermore, in this work, the feasibility of local crystallization of InSe thin films was demonstrated using laser patterning technique.

Keywords: thermal evaporation, thin films of indium selenide, phase transition, X-ray structural analysis, Raman spectroscopy, laser patterning.

Received: August 11, 2025; accepted: March 10, 2026.