

**Исабаев Б.Ш.<sup>1\*</sup>, Алмасов Н.Ж.<sup>2</sup>,  
Алиакбарова А.А.<sup>2</sup>, Джолмашева У.К.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

<sup>2</sup>Казахский национальный технический исследовательский университет им. К.И. Сатпаева,  
Казахстан, г. Алматы, \*e-mail: bake\_production@bk.ru

## **ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК $As_2S_3$**

В данной работе методом термического испарения в вакууме получены тонкие аморфные пленки  $As_2S_3$ . Исследованы температурные зависимости проводимости пленочных образцов. Установлено, что температурная зависимость проводимости  $\sigma(T)$  пленочных образцов, в исследуемом интервале температур 300 – 440 К носит полупроводниковый характер и хорошо описывается экспоненциальной зависимостью вида  $\sigma = C \exp(-E_\sigma/kT)$ . Из вычислений величин предэкспоненциального множителя  $C$ , выявлено, согласно теории Мотта, что с уменьшением толщины пленочных образцов, механизм проводимости по делокализованным состояниям сменяется на прыжковый механизм проводимости по локализованным состояниям в «хвостах» разрешенных зон, а затем на механизм проводимости путем прыжков носителей заряда по локализованным состояниям вблизи уровня Ферми. Энергия активации проводимости  $E_\sigma$  пленочных образцов составляет примерно половину оптической ширины запрещенной зоны. Исследованы спектры оптического пропускания пленочных образцов. Установлено, что они имеют типичную для некристаллических полупроводников спектральную зависимость коэффициента пропускания  $T$  в области края оптического пропускания, состоящую из области межзонных переходов, экспоненциального участка и области, связанной с поглощениями на различных структурных неоднородностях. Предполагается, что экспоненциальный край поглощения обусловлен электронными переходами между локализованными состояниями в хвостах зон, причем плотность состояний экспоненциально уменьшается с энергией.

**Ключевые слова:** размерный эффект, тонкие аморфные халькогенидные пленки, электропроводность, оптическое поглощение, оптическая запрещенная зона.

Issabayev B.Sh.<sup>1\*</sup>, Almassov N.Zh.<sup>2</sup>, Aliakbarova A.A.<sup>2</sup>, Djolmasheva U.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

<sup>2</sup>Kazakh National Research Technical University after K.I. Satpaev,  
Kazakhstan, Almaty, \*e-mail: bake\_production@bk.ru

### **Electronic properties of $As_2S_3$ thin films**

In work as method of thermal evaporation in a vacuum thin amorphous films of  $As_2S_3$  are received. Temperature dependences of conductivity of films are investigated. It is established that the temperature dependence of conductivity  $\sigma(T)$  of films, in the studied interval of temperatures 300 – 440 K has semiconductor character and is well described by exponential dependence of  $\sigma = C \exp(-E_\sigma/kT)$ . From calculations of value of  $C$ , it is revealed, according to Mott's theory that with reduction of thickness of films, the conductivity mechanism on the delocalized states is replaced with the hopping mechanism of conductivity on the localized states in «tails» of the resolved zones, and then on the conductivity mechanism by jumps of carriers of a charge on the localized states near Fermi's level. Activation energy of conductivity  $E_\sigma$  of films makes about a half of optical band gap. Spectra of optical transmission of films are investigated. It is established that they have the spectral dependence of the transmission coefficient  $T$ , typical for noncrystalline semiconductors in the region of the optical transmission edge, consisting of the region of interband transitions, the exponential region and the region associated with absorption

at various structural inhomogeneities. It is supposed that the exponential absorption edge is caused by electronic transitions between the localized states in tails of the bands, and density of states exponential decreases with energy.

**Key words:** size effect, thin amorphous chalcogenidny films, electrical conductivity, optical absorption, optical forbidden region.

Исабаев Б.Ш.<sup>1\*</sup>, Алмасов Н.Ж.<sup>2</sup>, Алиакбарова А.А.<sup>2</sup>, Джолмашева Ү.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>2</sup>Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан, Алматы қ. \*e-mail: bake\_production@bk.ru

### **As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> жұқа қабықшаларының электрондық қасиеттері**

Бұл жұмыста вакуумда термиялық буландыру әдісімен As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> аморфты жұқа қабықшалар алынды. Қабықшалық үлгілердің өткізгіштігінің температураға тәуелділігі зерттелді. Зерттелген 300 – 440 К температуралар аралығында  $\sigma(T)$  қабықшалық үлгілердің өткізгіштіктерінің температураға тәуелділігі жартылай өткізгіштік сипатқа ие және олар  $\sigma = C \exp(-E_g/kT)$  түріндегі экспоненциалдық тәуелділікпен жақсы сипатталады. Экспоненциалды көбейткіштің алдындағы С шамаларын есептеулерден, Мотт теориясында келісілгендей, қабықшалық үлгілердің қалыңдығы тыйым салынбаған аймақтың «соңдарында» кемігеннен төңіректелінбеген күйдегі өткізгіштігі механизмі төңіректелінген күйдегі зарядты тасымалдаушылардың секірулері жолымен өткізгіштігі механизміне алмасатындығы анықталады. Қабықшалық үлгілердің өткізгіштік активтілігі энергиясы  $E_g$  тыйым салынған аймақтың оптикалық енінің шамамен жартысын құрайды. Қабықшалық үлгілердің оптикалық өткізушілік спектрлары зерттелінді. Олардың – кристалданбаған жартылай өткізгіштіктерге тән типтік аймақаралық ауысулар облысынан, экспоненциалды учаскелерден және әртүрлі құрылымдық біртектіместіктерде жұтылулармен байланысқан облыстардан тұратын оптикалық өткізушілік шетіндегі аймақта Т өткізгіштік коэффициентінің спектралды тәуелділігіне ие екендігі тағайындалды. Жұтылудың экспоненциалды шеті аймақтардың соңдарындағы төңіректелген күйлерімен арадағы электрондық ауысулармен шартталынған, сонымен қатар күйлердің тығыздығы энергиямен бірге экспоненциалды кемиді.

**Түйін сөздер:** өлшемдік әсер, халькогенидті аморфты жұқа қабықшалар, электрөткізгіштік, оптикалық жұтылу, оптикалық тыйым салынған аймақ.

### **Введение**

Физика некристаллических полупроводников, к которым относятся халькогенидные стеклообразные полупроводники, является одной из новых и перспективных областей физики [1,2]. Исследование особенностей атомной структуры и физических свойств таких материалов открывает новые возможности их практического использования для инфракрасной оптики, опто-волоконных систем телекоммуникации, голографических систем регистрации оптической информации, дифракционной оптики и т.д. [3-5]. Весьма привлекательными для вышеуказанных приложений являются материалы систем As-S, As-Se, As-S-Se в чистом и легированном виде [6-15], которые обладают рядом уникальных свойств, а именно, прозрачностью в инфракрасной области [16-19], эффектом оптической памяти [20-24], высокой светочувствительностью [25,26], высокой разрешающей способностью [27], дешевизной и простотой в получении [28-30] и др.

Однако количество работ, посвященных исследованию размерных эффектов в тонких

аморфных халькогенидных пленках недостаточно. Поэтому на сегодняшний момент изучение электронных свойств тонких аморфных халькогенидных пленок системы As-S представляет большой исследовательский и практический интерес.

Целью данной работы является исследование изменения электронных свойств тонких аморфных халькогенидных пленок As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, вследствие размерного эффекта, определение электрических и оптических параметров пленок.

### **Методика эксперимента**

Приготовление пленок As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> осуществлялось на установке ВУП-5М методом термического испарения в вакууме. Мишень представляла собой поликристаллический состав, синтезированный из элементов полупроводниковой степени чистоты (99,999%). Процесс термического испарения проводился в камере по достижении рабочего вакуума  $\sim 3,5 \cdot 10^{-3}$  Па. В качестве подложек использовались монокристаллический кремний, каптон, кварцевое стекло. Перед напылением образцов подложки из каптона и кварцевого

стекла подвергались химической и термической обработке.

Толщина и элементный состав полученных пленок контролировался методом энерго-дисперсионного анализа на сканирующем электронном микроскопе Quanta 3D 200i. Детектирование

исследуемых пленок производилось под воздействием пучка электронов с энергией до 30 кэВ. На рис.1 и 2 соответственно приведены результаты измерения толщины и типичный энергетический спектр пленок  $As_2S_3$ . Данные элементного состава пленок приведены в таблице 1.

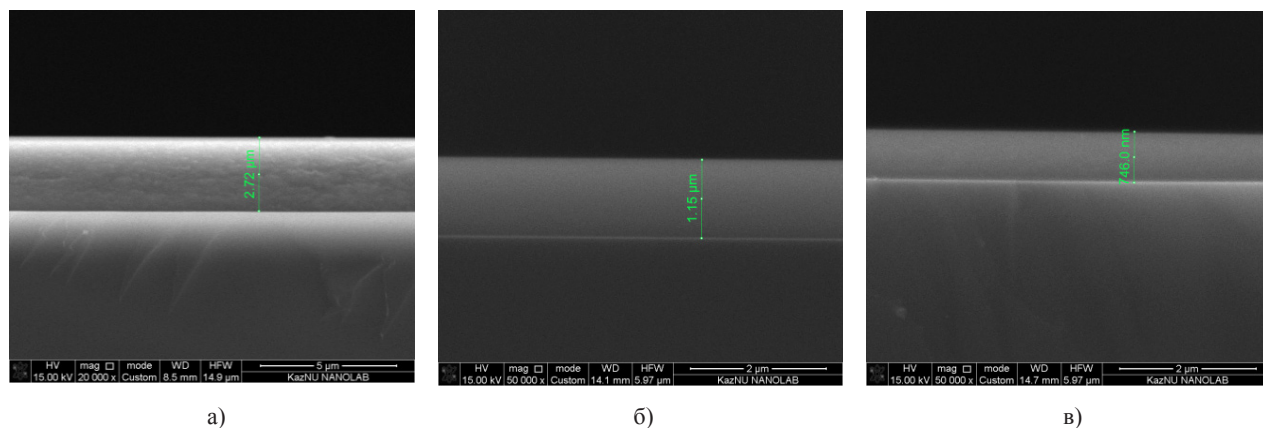


Рисунок 1 – толщина пленок а- $As_2S_3$  а) 2300 нм; б) 1100 нм; в) 750 нм

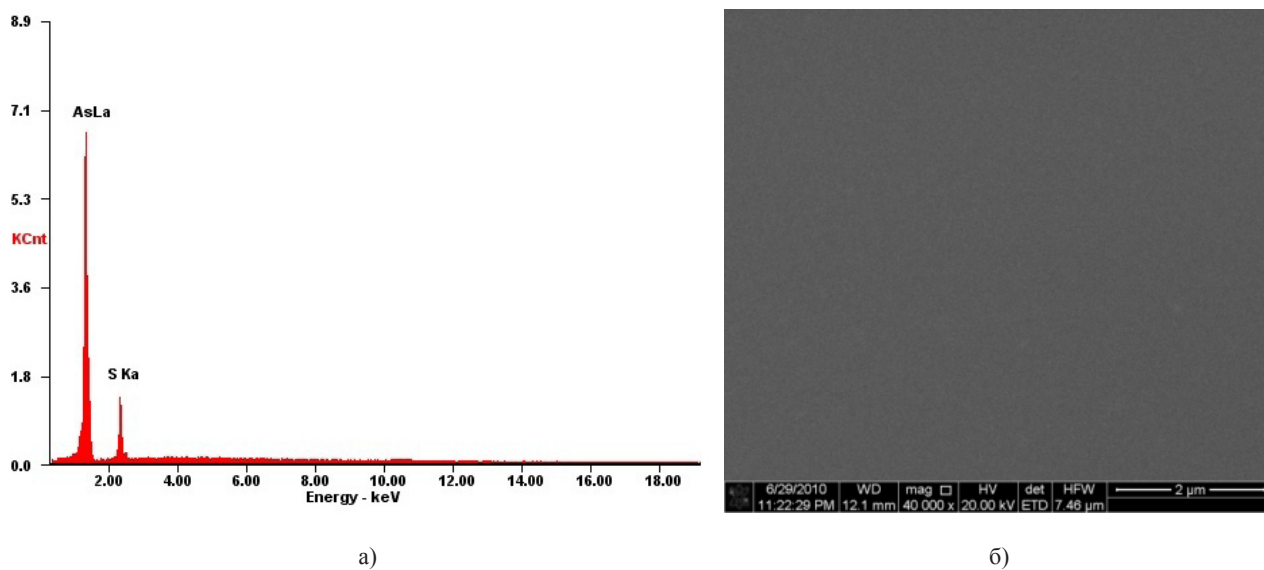


Рисунок 2 – Типичный спектр характеристического излучения а) и морфология поверхности б) пленок а- $As_2S_3$

Таблица 1 – Элементный состав тонких пленок а- $As_2S_3$

Element	Wt%	At%
SK	37.85	58.82
AsK	62.15	41.18

Как видно из рисунка 2 и таблицы 1, морфология поверхности пленок однородная, аморфная, отличие элементного состава пленок от формульного соотношения не превышало  $\pm 1,5$  ат. %.

Исследования температурной зависимости электропроводности проводились на образцах с планарной конфигурацией расположения электродов в электрических полях напряженностью  $E = (10^3 - 10^4)$  В/см в области линейности вольт-амперных характеристик. Для измерения малых токов (до  $10^{-14}$  А) использовался пикоамперметр Keitley. Температура образца регистрировалась медь-константановой термопарой. Скорость нагрева образцов в процессе измерений составляла около 2 град/мин.

Спектры оптического пропускания и отражения регистрировались на спектрофотометре Shimadzu UV3600.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 3 приведены температурные зависимости электропроводности тонких пленок  $As_2S_3$ .

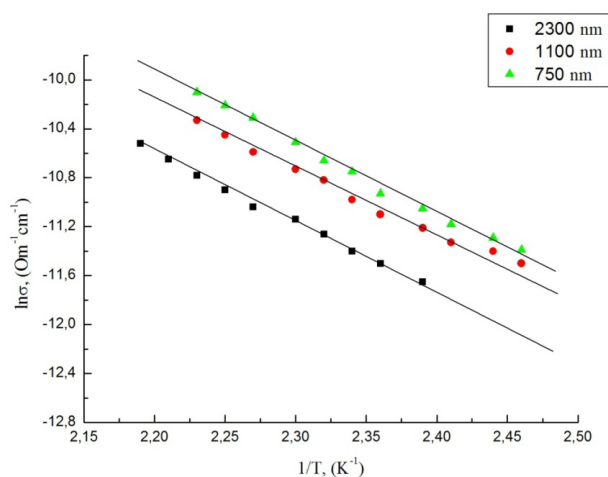


Рисунок 3 – Температурные зависимости электропроводности тонких пленок  $As_2S_3$

Из температурных зависимостей электропроводности были определены энергии активации проводимости  $E_\sigma$  с точностью до ( $\pm 0.02$  eV), проводимости при комнатной температуре  $\sigma_0$  и величины предэкспоненциального множителя  $C$  тонких пленок  $As_2S_3$ . Результаты приведены в таблице 2.

Спектры оптического пропускания пленок приведены на рисунке 4.

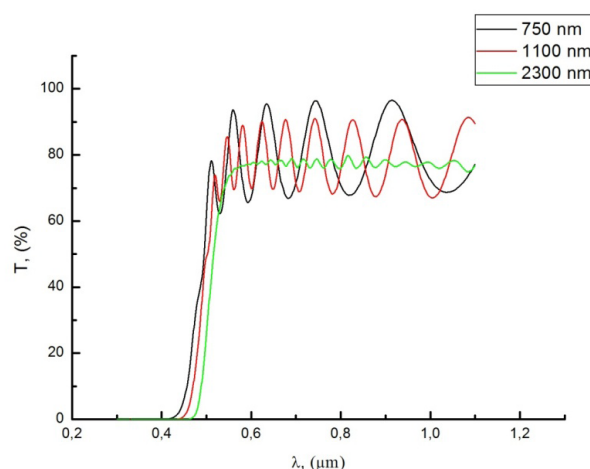


Рисунок 4 – Спектры оптического пропускания пленок  $As_2S_3$

Оптическая ширина запрещенной зоны  $E_g$  пленок определялась по методу Тауца из спектральных зависимостей коэффициента поглощения  $\alpha$  в области, соответствующей краю полосы фундаментального поглощения, путем экстраполяции экспериментальных зависимостей  $(ahv)^{1/2} = f(hv)$  на ось энергий.

На основе спектральных характеристик поглощения света для пленок  $a-As_2S_3$  были построены зависимости  $(ahv)^{1/2} - f(hv)$ , показанные на рисунке 5.

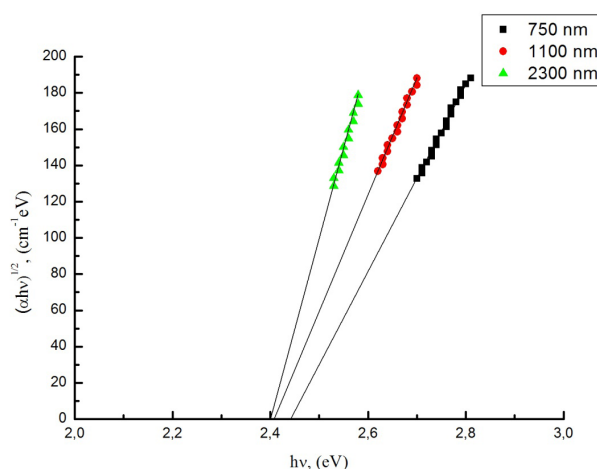


Рисунок 5 – Спектральная зависимость края оптического поглощения пленок  $a-As_2S_3$

Как видно из рисунка, для пленок в области коэффициента поглощения  $\alpha \geq 10^3 \text{ см}^{-1}$  хорошо выполняется квадратичный закон поглощения Тауца  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim (h\nu - E_g)$ . Экстраполяция прямых участков кривых до пересечения с осью энергией  $(h\nu)$  позволяла определить значение оптической ширины запрещенной зоны  $E_g$  пленок с точностью ( $\pm 0.01 \text{ eV}$ ). Результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Энергия активации проводимости, проводимость при комнатной температуре, величина предэкспоненциального множителя и оптическая ширина запрещенной зоны тонких пленок As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>

d, (nm)	$E_{\sigma}$ , (eV)	$\sigma_0$ , ( $\text{Om}^{-1}\text{cm}^{-1}$ )	C, ( $\text{Om}^{-1}\text{cm}^{-1}$ )	$E_{\sigma}$ , (eV)
750	1.15	$3.5 \cdot 10^{-17}$	$5.9 \cdot 10^2$	2.45
1100	1.03	$9.47 \cdot 10^{-17}$	$1.30 \cdot 10$	2.41
2300	0.95	$1.9 \cdot 10^{-16}$	1.32	2.40

Как видно из таблицы 2, при уменьшении толщины пленок от 2300 нм до 750 нм их оптическая ширина запрещенной зоны увеличивается от 2.40 до 2.45 eV, их энергии активации проводимости увеличиваются от 0.95 до 1.15 eV, а проводимости при комнатной температуре уменьшаются от  $1.9 \cdot 10^{-16}$  до  $3.5 \cdot 10^{-17} \text{ Om}^{-1}\text{cm}^{-1}$ . Величины предэкспоненциального множителя C, согласно теории Мотта, для пленок толщиной 2300 нм указывают на прыжковый характер проводимости вблизи уровня Ферми, в то время как для пленок с толщинами 1100 и 750 нм проводимость осуществляется по пространственным состояниям.

### Заключение

Изменение толщин пленок As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, полученных методом термического испарения в вакууме, приводит к некоторым изменениям в их электронных параметрах, что, по-видимому, связано с флуктуациями в их спектре электронных состояний.

### Литература

- 1 Applications of Chalcogenides: S, Se, and Te. Ed. Ahluwalia G.K. / Springer Series in Material Science, 2017. – 234 p.
- 2 Tanaka K., Shimakawa K. Amorphous Chalcogenide Semiconductors and Related Materials. Springer Science, 2011. – 239 p.
- 3 Tan, Cao, Wu, He, Yang, Zhang, Chen, Zhao, Han, Nam, Sindoro, and Zhang. Recent Advances in Ultrathin Two-Dimensional Nano-materials/ Chemical Reviews. – 2017, 117 (9). – P. 6225–6331.
- 4 Sugawara K., Nakata Y., Shimizu R., Han P., Hitosugi T., Sato T., and Takahashi T. Unconventional Charge-Density-Wave Transition in Monolayer 1T-TiSe<sub>2</sub>/ ACS Nano. 2016, 10 (1). – P. 1341–1345.
- 5 Hosseini P., Wright C.D., H. Bhaskaran. An optoelectronic framework enabled by low-dimensional phase-change films // Nature. – 2014. – Vol. 511(7508). – P.206.
- 6 Ilcheva V., Petkova P., Boevb V., Petkova T. Optical properties of thermally evaporated (As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>)<sub>100-x</sub>Ag<sub>x</sub> thin films // Physics Proce-dia. 10th International Conference on Solid State Chemistry, Pardubice, Czech Republic. – 2013. – P.67-74.
- 7 Hristova-Vasileva T., Bineva I., Dinescu A., Danila M. and Arsova D. As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin films deposited by frequency assisted thermal evapo-ration – morphology and structure // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol.794, No 1. – 012015 (6p.).
- 8 Dinesh C. Sati, Kumar R., Mehra R. M., Jain H., and Ashtosh Ganjoo Kinetics of photodarkening in a-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>a-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin films // Journal of Applied Physics. – 2009. – Vol.105. – 123105.
- 9 Bryce R.M., Nguyen H.T., Nakeeran P., DeCorby R.G., Dwivedi P.K., Haugen C.J., and McMullin J.N. Direct UV patterning of wave-guide devices in As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> thin films // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2004. – Vol.22. – 1044.
- 10 Färma E., Heikkilä M.J., and Vehkamäki M. As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin films deposited by atomic layer deposition // Journal of Vacuum Science & Tech-nology A: Vacuum, Surfaces, and Films. – 2017. – Vol.35. – 01B114.
- 11 Almeida J.M.P., Barbano E.C., Arnold C.B., Misoguti L., and Mendonça C.R. Nonlinear optical waveguides in As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-Ag<sub>2</sub>S chalco-genide glass thin films // Optical Materials Express. – 2017. – Vol. 7, Is.1. – P.93-99.
- 12 Takenobu S., Hideo H. Ion-beam doping of silver in amorphous As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> thin films // Journal of Applied Physics. – 2002. – Vol. 92, No.4. – P.1821-1824.
- 13 Neimet Yu.Yu., Studenyak I.P., Buchuk M.Yu., Bohdan R., Kökényesi S., Daróci L., Nemeč P. Photo-induced effects in (Ag<sub>3</sub>AsS<sub>3</sub>)<sub>0.6</sub>(As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>0.4</sub> thin films and multilayers with gold nanoparticles // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoe-lectronics. – 2015. – Vol. 18, Iss. 4. – P.385-390.
- 14 Korobova N., Almasov N., Prikhodko O., Timoshenkov S., Tsendin K. Efficient method of structural and electronic properties modifica-tion of amorphous As-S-Se Chalcogenide Films // Proceedings of Materials Science and Technology (MS&T 2014), October 12-16, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. – 2014. – P. 253 – 258.

- 15 Prikhodko O., Almasov N., Dyussebayev S., Maksimova S., Ushanov V., Tsendin K., Nesterov S. Bismuth impurity influence on elec-tronic properties of amorphous As<sub>40</sub>Se<sub>30</sub>S<sub>30</sub> films // *Chalcogenide Letters*. – 2013. – Vol. 10, No. 12. – P.519 – 523.
- 16 Korobova N., Almasov N., Prikhodko O., Timoshenkov S., and Tsendin K. Structure and electronic properties features of amorphous chalcogenide semiconductor films prepared by ion-plasma spraying // *AIP Conf. Proc.* – 2014. – Vol. 1624. – P.69-74.
- 17 Almasov N.Zh., Prikhodko O.Yu., Tsendin K.D. Sign universion of impurity conduction of As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>: Bi vitreuos films made by two dif-ferent methods // *Semiconductors*. – 2012. – №10, Vol. 46. – P. 1319-1321.
- 18 Электронные явления в халькогенидных стеклообразных полупроводниках. Под. ред. Цендина К.Д. – СПб.: Наука, 1996. – 486 с.
- 19 Andriesh A.M. Chalcogenide glasses in optoelectronics // *ФТП*. – 1998. – Т. 32, № 8. – С. 970-975.
- 20 Almasov N., Bogoslovskiy N., Korobova N., Kozyukhin S., Fefelov S., Kazakova L., Jakovlev S., Tsendin K., Guseinov N. Switching and memory effects in partly crystallized amorphous Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> films in a current controlled mode // *J. Non-Cryst. Solids*. – 2012. – Vol. 358. – P. 3299–3303.
- 21 Попович А. Халькогенидная энергонезависимая память CRAM // *Компоненты и технологии*. – 2010. – №103. – С.52-54.
- 22 Козюхин С.А., Шерченков А.А., Новоторцев В.М., Тимошенков С.П. Материалы фазовой памяти на основе сложных халькогенидов и их применение в устройствах оперативной памяти//*Нанoeлектроника*. – 2011. – Т.6, №3-4.-С.73-81.
- 23 Paesler M.A., Baker D.A., Lucovsky G., Taylor P.C., Washington J.S.//Bond constraint theory and EXAFS studies of local bonding structures of Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>4</sub>, Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> and Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>7</sub>. *J. Optoelectronics and Advanced Materials*. -2007. Vol. 9. № 10.- P. 2996–3001.
- 24 Kolobov A.V., Fons P., Frenkel A.I., Ankudinov A.I., Tominaga J., Uruga T.//Understanding the phase-change mechanism of rewritable optical media. *NatureMater*. -2004. Vol. 3. -P. 703–708.
- 25 Несеребрянные фотографические процессы. Под ред. Каргужанского А.Л.– Л.: Химия, 1984. – 376 с.
- 26 Нестеров С.И. Оценка предельного разрешения халькогенидного фоторезиста//Сб. трудов VII Междунар. конф. по аморфным и микрокристаллическим полупроводникам. – СПб., 2010. – С. 115-116.
- 27 Мотт И., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах.: пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 560 с.
- 28 Аморфный кремний и родственные материалы/под ред. Х.Фришше: пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 544 с.
- 29 Фельц А. Аморфные и стеклообразные неорганические твердые тела: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 403 с.

#### References

- 1 Applications of Chalcogenides: S, Se, and Te. Ed. G.K. Ahluwalia (Springer Series in Material Science, 2017), 234 p.
- 2 K. Tanaka, K. Shimakawa, *Amorphous Chalcogenide Semiconductors and Related Materials*, (Springer Science, 2011), 239 p.
- 3 Tan, Cao, Wu, He, Yang, Zhang, Chen, Zhao, Han, Nam, Sindoro, and Zhang, *Chemical Reviews*, 117 (9), 6225–6331, (2017).
- 4 K. Sugawara, Y. Nakata, R. Shimizu, P. Han, T. Hitosugi, T. Sato, and T. Takahashi, *ACS Nano*, 10 (1), 1341–1345, (2016). DOI: 10.1021/acsnano.5b06727.
- 5 P. Hosseini, C.D. Wright, and H. Bhaskaran, *Nature*, 511(7508), 206, (2014).
- 6 V. Ilchevaa, P. Petkova, V. Boevb, and T. Petkova, *Physics Procedia*, 10th Inter, Conf, on Solid State Chemistry, Pardubice, Czech Re-public, 67-74, (2013).
- 7 T. Hristova-Vasileva, I. Bineva, A. Dinescu, M. Danila, and D. Arsova, *J. of Physics: Conference Series*, 794 (1), 012015, (2017). DOI:10.1088/1742-6596/794/1/012015
- 8 Dinesh C. Sati, R. Kumar, R.M. Mehra, H. Jain, and Ashtosh Ganjooless, *J. of Applied Physics* 105, 123105 (2009). DOI. org/10.1063/1.3151804
- 9 R.M. Bryce, H.T. Nguyen, P. Nakeeran, R.G. DeCorby, P.K. Dwivedi, C.J. Haugen, and J.N. McMullin, *J. of Vacuum Science & Tech-nology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 22, 1044, (2004).
- 10 E. Färma, M.J. Heikkilä, and M. Vehkamäki, *J. of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 35, 01B114, (2017).
- 11 J.M.P. Almeida, E.C. Barbano, C.B. Arnold, L.Misoguti, and C.R. Mendonça, *Optical Materials Express*, 7 (1), 93-99, (2017). doi.org/10.1364/OME.7.000093
- 12 S. Takenobu and H. Hideo, *J. of Applied Physics*, 92, 4, 1821-1824, (2002).
- 13 Yu.Yu. Neimet, I.P. Studenyak, M.Yu. Buchuk, R. Bohdan, S. Kökényesi, L. Daróci, and P. Nemeč, *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 18, 4, 385-390, (2015).
- 14 N. Korobova, N. Almasov, O. Prikhodko, S. Timoshenkov, and K. Tsendin *Proc. of Materials Science and Technology (Pittsburgh, Penn-sylvania, USA, MS&T 2014, 12-16 October, 2014)*, 253 – 258.
- 15 O. Prikhodko, N. Almasov, S. Dyussebayev, S. Maksimova, V. Ushanov, K. Tsendin, and S. Nesterov, *Chalcogenide Letters*, 10 (12), 519 – 523, (2013).
- 16 N. Korobova, N. Almasov, O. Prikhodko, S. Timoshenkov, and K. Tsendin, *AIP Conference Proceedings*, 1624, 69-74 (2014). doi.org/10.1063/1.4900459.

- 17 N.Zh. Almasov, O.Yu. Prikhodko, and K.D. Tsendin, *Semiconductors*, 46 (10), 1319-1321, (2012),
- 18 *Elektronnyye yavleniya v khal'kogenidnykh stekloobraznykh poluprovodnikakh*. Pod. red. K.D. Tsendina, (SPb.: Nauka, 1996), 486 p. (in Russ).
- 19 A.M. Andriesh, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 32 (8), 970-975, (1998).
- 20 N. Almasov, N. Bogoslovskiy, N. Korobova, S. Kozyukhin, S. Fefelov, L. Kazakova, S. Jakovlev, K. Tsendin, and N. Guseinov, *J. Non-Cryst. Solids*, 358, 3299–3303, (2012).
- 21 Popovich, *Komponenty i tekhnologii*, 103, 52-54, (2010). (in Russ).
- 22 C.A. Kozyukhin, A.A. Sherchenkov, V.M. Novotortsev, and S.P. Timoshenkov, *Nanoelektronika*, 6 (3-4), 73-81, (2011).
- 23 M.A. Paesler, D.A. Baker, G. Lucovsky, P.C. Taylor, and J.S. Washington, *J. Optoelectronics and Advanced Materials*, 9, (10), 2996–3001, (2007).
- 24 A.V. Kolobov, P. Fons, A.I. Frenkel, Ankudinov A.I., Tominaga J., and T. Uruga, *Nature Mater*, 3, 703–708, (2004).
- 25 *Neserebryannyye fotograficheskiye protsessy*. Pod red. A.L. Kartuzhanskogo (L.: Khimiya, 1984), 376 p. (in Russ).
- 26 S.I. Nesterov, *Sb. trudov VII Mezhdunar. konf. po amorfnyim i mikrokrystallicheskim poluprovodnikam*, (SPb., 2010), pp.115-116. (in Russ).
- 27 Mott and E. Devis *Elektronnyye protsessy v nekrystallicheskikh veshchestvakh*, (Moscow: Mir, 1982), 560 p. (in Russ).
- 28 *Amorfnyy kremniy i rodstvennyye materialy*/pod red. KH.Fritsshe, (Moscow: Mir, 1991), 544 p. (in Russ).
- 29 *Fel'ts, Amorfnyye i stekloobraznyye neorganicheskiye tverdyye tela*, (Moscow: Mir, 1987), 403 p.