

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.93

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.004

ЗОННАЯ СТРУКТУРА И ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ В СОЕДИНЕНИЯХ Cu_2X И AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$)

Алиса Данисовна Давлетшина¹, Роберт Асгатович Якшибаев²

^{1,2}Кафедра общей физики, Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

¹davletshinaalisa@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7630-405X>

²yakshibaeva@uust.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9120-3932>

Аннотация. В данной работе приведены результаты расчета зонной структуры, плотности состояний и энергии связи в бинарных халькогенидах меди Cu_2X и тройных халькогенидах меди и серебра AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) в высокотемпературной кубической фазе с использованием программного пакета BIOVIA Materials Studio DMol³ и распределения электронной плотности с использованием программного пакета Quantum Espresso, которые основаны на теории функционала электронной плотности. Установлено, что зонная структура характеризуется p - d - и s - p -гибридизацией энергетических уровней металлов и халькогена. Бинарные халькогениды меди Cu_2X и тройные халькогениды меди и серебра AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) в высокотемпературной кубической фазе являются узкозонными полупроводниками. Тройные соединения имеют большую ширину запрещенной зоны, чем бинарные соединения.

Известно, что одним из факторов, влияющих на величину ионной проводимости, является энергия связи. Показано, что при анионном замещении Te-Se-S в соединениях Cu_2X и AgCuX происходит уменьшение энергии связи на пару ионов, что способствует переходу катионов в подвижное состояние и соответственно приводит к росту ионной проводимости.

Ключевые слова: халькогениды меди и серебра, зонная структура, гибридизация, электронная плотность, энергия связи.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, соглашение № 075-03-2024-123/1 от 15.02.2024, тема № 324-21.

Для цитирования: Давлетшина А.Д., Якшибаев Р.А. Зонная структура и энергия связи в соединениях Cu_2X и AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 1. С. 43-50. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.004.

Original article

BAND STRUCTURE AND BINDING ENERGY IN Cu_2X AND AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) COMPOUNDS

Alisa D. Davletshina¹, Robert A. Yakshibaev²

^{1,2}Department of General Physics, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

¹davletshinaalisa@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7630-405X>

²yakshibaeva@uust.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9120-3932>

Abstract. This paper presents the results of calculating the band structure, density of states, and energy of binary chalcogenides Cu_2X and ternary copper and silver chalcogenides AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) in the high-temperature cubic phase using BIOVIA Materials Studio DMol³. The electron density distribution was calculated using the Quantum Espresso software, which are based on the theory of electronic density functional. It is established that the band structure is characterized by p - d and s - p hybridization of the energy levels of the metals and chalcogen. Binary copper chalcogenides Cu_2X and ternary copper and silver chalcogenides AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) in the high-

temperature cubic phase are narrow-bandgap semiconductors. Ternary compounds have a larger band gap than binary compounds.

It is known that one of the factors influencing the value of ionic conductivity is the binding energy. It has been shown that the anionic substitution of Te-Se-S in Cu_2X and AgCuX compounds results in a decrease in the binding energy per pair of ions, which promotes the transition of cations to a mobile state and, accordingly, leads to an increase in ionic conductivity.

Keywords: copper and silver chalcogenides, band structure, hybridization, electron density, binding energy.

Acknowledgements: the work was completed under a government contract, agreement № 075-03-2024-123/1 dated February 15, 2024, subject № 324-21

For citation: Davletshina A.D., Yakshibaev R.A. (2026). Band structure and binding energy in Cu_2X and AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) compounds. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(1), 43-50. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.01.004.

Введение

Интерес к исследованию явлений электронного и ионного переноса в халькогенидах меди и серебра обусловлен тем, что они, обладая полупроводниковыми свойствами, являются перспективными термоэлектрическими материалами [1, 2]. Особенностью этих систем является то, что наряду с преимущественной электронной проводимостью в них наблюдается высокая ионная проводимость ($\sim 1 \text{ ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$), обусловленная одновалентными катионами меди и серебра [3-7]. В настоящее время накоплен богатый экспериментальный материал по исследованию электронной и ионной проводимости [3-7], по исследованию явлений самодиффузии, химической диффузии и термодиффузии [5, 7-9]. Изучены фазовые соотношения в широком интервале составов и определены типы кристаллических структур, температурные интервалы их стабильности [6, 10-11].

Соединения $\text{Ag}_{2-x}\text{Cu}_x\text{X}$ ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) обладают простой кристаллической структурой, широкими областями растворимости в твердом состоянии и образуют стабильные соединения при эквимоллярных составах Cu и Ag . Эти особенности выдвигают их в число модельных систем при различных расчетах. Зонная структура бинарных халькогенидов исследована хорошо, но имеются значительные разногласия в результатах различных авторов [6, 12-13].

Зонная структура сплавов халькогенидов меди и серебра ($\text{Cu}_2\text{X}-\text{Ag}_2\text{X}$) остается мало исследованной [14].

В данной работе представлены результаты расчета зонной структуры в соединениях Cu_2X и AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) в высокотемпературной кубической фазе с целью изучения ее трансформации с изменением состава по катионной и анионной подрешеткам. Также прове-

дены расчеты энергии связи и распределения электронной плотности.

Методика расчета

Расчеты зонной структуры и энергии связи в исследуемых соединениях были проведены с использованием программного пакета BIOVIA Materials Studio DMol³ [15], которая основана на теории функционала электронной плотности. При расчете обменно-корреляционные эффекты учитывались в meta-general-gradient-approximation (m-GGA) и general-gradient-approximation (GGA). Распределение электронной плотности было рассчитано с использованием программного пакета Quantum Espresso [16]. Значения k -точек обратной решетки задаются при помощи метода Монкхорста-Пака [17] на сетке $2\times 2\times 2$.

При расчетах для меди учитываются $3d$ -, $4s$ -электроны, для серебра – $4d$ -, $5s$ -, для серы – $3s$ -, $3p$ -, для селена – $4s$ -, $4p$ -, для теллура – $5s$ -, $5p$ -электроны.

Расчеты были проведены в высокотемпературной кубической фазе $Fm\bar{3}m$ для Cu_2X и $F\bar{4}3m$ для AgCuX .

Высокосимметричная кристаллическая структура была преобразована в симметрию $P1$, при которой точки первой зоны Бриллюэна имеют следующие значения: Γ (0 0 0), F (0 0,5 0), Q (0 0,5 0,5), Z (0 0 0,5), B (0,5 0 0) (рис. 1). Данное преобразование обусловлено тем, что суперионное состояние характеризуется отклонением катионов от равновесного положения.

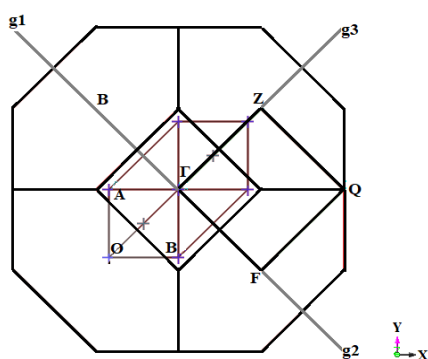


Рис. 1. Первая зона Бриллюэна для ГЦК структуры

Fig. 1. The 1st Brillouin zone of FCC structure

Зонная структура

Рассмотрим результаты расчета зонной структуры и плотности электронных состояний в исследуемых соединениях с использованием функционала GGA RPBE (revised Perdew-Burke-Ernzerhof) (рис.2, 3).

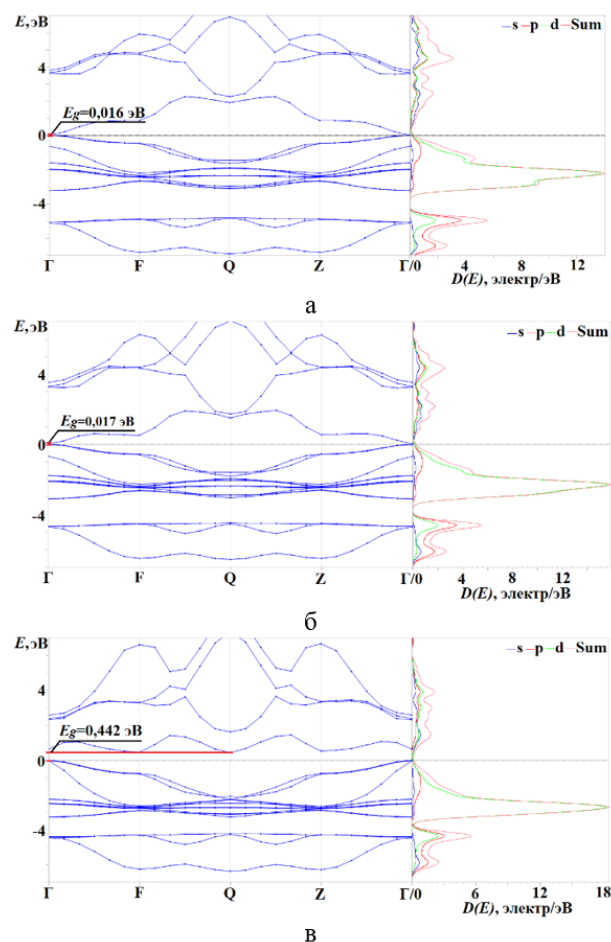
На рис. 2а приведена зонная структура и плотность электронных состояний сульфида меди. Энергия Ферми соответствует 0 эВ. Потолок валентной зоны и дно зоны проводимости находятся в точке Γ . Ширина запрещенной зоны E_g равна 0,016 эВ. Анализ парциальной и полной плотности состояний показывает, что потолок валентной зоны образован преимущественно 3d-состояниями меди с незначительным вкладом 3p-состояний серы. Максимальной плотности состояний на уровне энергии -2 эВ соответствуют 3d-состояния меди. Дно зоны проводимости образовано 4s-состояниями меди, а также 3p-состояниями серы.

Зонная структура Cu_2Se (рис. 2б) имеет на качественном уровне подобный характер зонной структуре Cu_2S . Ширина запрещенной зоны Cu_2Se равна 0,017 эВ. В случае Cu_2Te (рис. 2в) ширина запрещенной зоны равна 0,442 эВ. Потолок валентной зоны находится в точке Γ , а дно зоны проводимости в точке Q, т.е. теллурид меди является непрямозонным полупроводником.

Сравнение результатов расчета зонной структуры халькогенидов меди показывает, что при анионном замещении S-Se-Te изменяется ширина запрещенной зоны и для Cu_2Te ее величина на один порядок больше, чем для Cu_2S и Cu_2Se .

Полученные нами значения E_g (табл. 1) меньше, чем литературные данные, полученные экспериментально: Cu_2S имеет ширину за-

прещенной зоны 0,9-1,07 эВ [6], Cu_2Se – 1,1; 1,2 эВ [6] и Cu_2Te – 0,9-1,07 эВ [6].

Рис. 2. Зонная структура халькогенидов меди Cu_2S (а), Cu_2Se (б) и Cu_2Te (в)Fig. 2. Band structure of copper chalcogenides Cu_2S (a), Cu_2Se (b) and Cu_2Te (c)

На рис. 3а приведена зонная структура и плотность состояний для AgCuS . Ширина запрещенной зоны E_g в данном случае равна 0,114 эВ. Потолок валентной зоны находится в направлении Γ -F, а дно зоны проводимости в точке Γ . Анализ парциальной и полной плотности состояний показывает, что потолок валентной зоны образован преимущественно 4d-состояниями серебра и 3d-состояниями меди с незначительным вкладом 3p-состояний серы.

Максимальной плотности состояний на уровне энергии -1,6 эВ соответствуют 3d-состояния меди, а на уровне энергии -4,1 эВ – 4d-состояния серебра. Дно зоны проводимости образовано 5s-состояниями серебра и 4s-состояниями меди, а также 3p-состояниями серы.

Для AgCuSe (рис. 3б) и AgCuTe (рис. 3в) расположение энергетических уровней подобно расположению энергетических уровней для AgCuS, но переход из валентной зоны в зону проводимости находится в точке Г.

Сравнение результатов расчета зонной структуры AgCuS, AgCuSe и AgCuTe (рис. 3) показывает, что при анионном замещении происходит изменение ширины запрещенной зоны. Ширина запрещенной зоны имеет наибольшее значение для AgCuTe, а наименьшее значение – для AgCuSe.

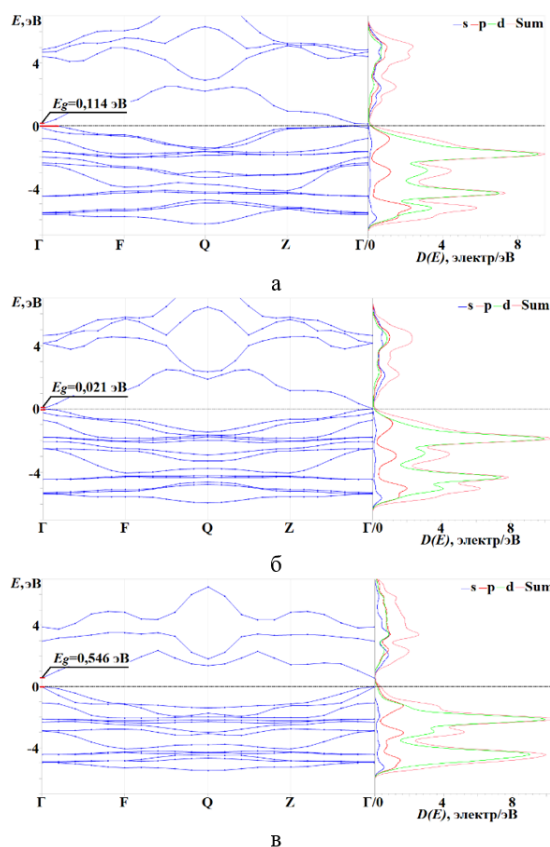


Рис. 3. Зонная структура халькогенидов меди и серебра AgCuS (а), AgCuSe (б) и AgCuTe (в)

Fig. 3. Band structure of copper and silver chalcogenides AgCuS (a), AgCuSe (b) and AgCuTe (c)

Для оценки зависимости зонной структуры от типа функционала также были проведены расчеты с использованием функционалов PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof), PW91 (Perdew-Wang 1991) и MS0 (Made Simple Zero). Получено, что во всех случаях характер расположения энергетических уровней сохраняется, но при этом изменяется ширина запрещенной зоны (табл. 1).

Таблица. 1. Значения ширины запрещенной зоны при различных типах функционалов

Table. 1. The values of the band gap for different types of functional

E_g , эВ	GGA PBE	GGA RPBE	GGA PW91	mGG A MS0
Cu ₂ S	0,014	0,016	0,014	0,016
Cu ₂ Se	0,013	0,017	0,019	0,011
Cu ₂ Te	0,304	0,442	0,320	0,302
AgCuS	0,053	0,114	0,066	0,113
AgCuSe	0,033	0,021	0,022	0
AgCuTe	0,433	0,546	0,421	0,371

Сравнение зонных структур бинарных халькогенидов меди и тройных халькогенидов меди и серебра показывает, что замена половины катионов меди катионами серебра приводит к увеличению ширины запрещенной зоны и уменьшению ширины валентной зоны.

Энергия связи

Рассмотрим результаты расчета распределения электронной плотности (рис. 4 и 5) и энергии связи (табл. 2) в халькогенидах Cu₂X и AgCuX, рассчитанные с использованием функционала GGA RPBE.

На рис. 4 приведено распределение электронной плотности в Cu₂X (X = S, Se, Te).

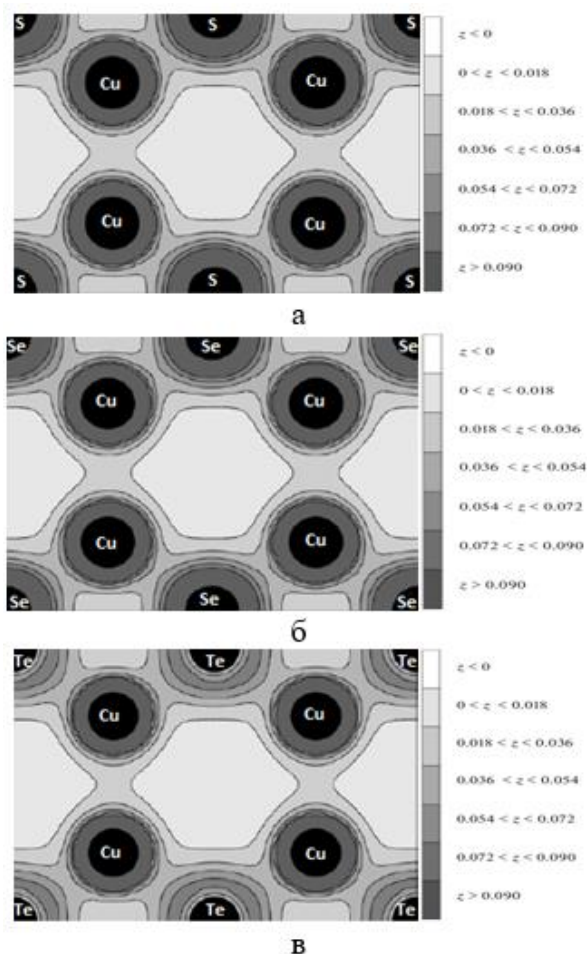


Рис. 4. Распределение электронной плотности в Cu_2S (а), Cu_2Se (б) и Cu_2Te (в)

Fig. 4. Electron density distributions in Cu_2S (a), Cu_2Se (b) and Cu_2Te (c)

При анионном замещении S-Se-Te в халькогенидах меди электронная плотность в направлении Cu-X практически не меняется, однако в направлении Cu-Cu область перекрытия электронных облаков незначительно уменьшается, что обусловлено увеличением ионного радиуса в ряду S (1,84 Å) – Se (1,98 Å) – Te (2,1 Å) [18].

Согласно распределению электронной плотности в AgCuX ($\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) (рис. 5), при анионном замещении Te-Se-S электронная плотность в направлении Ag/Cu-X остается практически постоянной, однако при этом происходит увеличение перекрытия электронных облаков в направлении Ag-Cu.

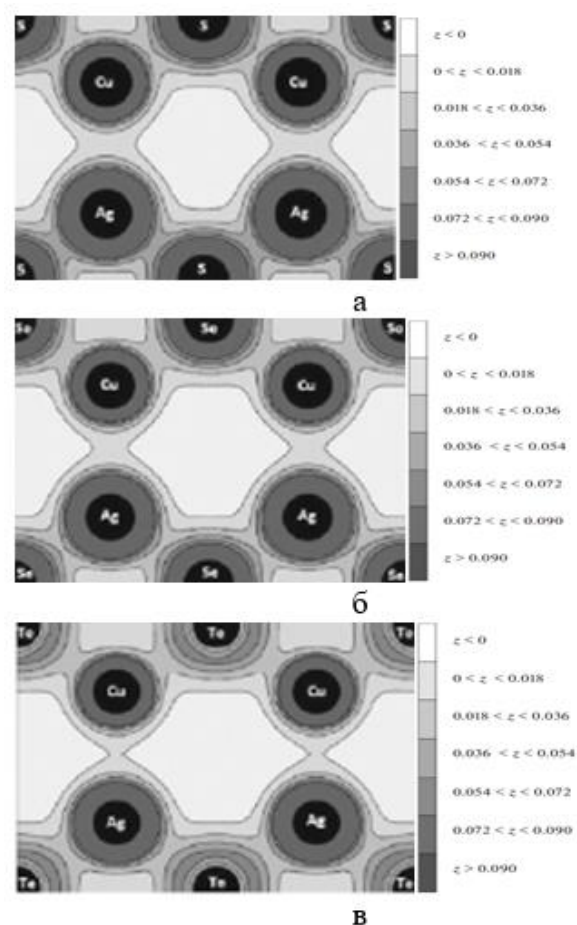


Рис. 5. Распределение электронной плотности в AgCuS (а), AgCuSe (б) и AgCuTe (в)

Fig. 5. Electron density distributions in AgCuS (a), AgCuSe (b) and AgCuTe (c)

Энергия связи в соединениях Cu_2X и AgCuX представлена в табл. 2. Согласно полученным результатам расчета, в ряду S-Se-Te наибольшей энергией связи обладают теллуриды.

Сравнение полученных результатов с величиной ионной проводимости [3, 19, 20] показывает, что при замещении халькогена в ряду S-Se-Te происходит уменьшение ионной проводимости и в этом же направлении увеличивается энергия связи на пару ионов. Это мы связываем с увеличением степени ковалентности связи в ряду S-Se-Te.

Таблица 2. Энергия связи в соединениях AgCuX и величина ионной проводимости**Table 2.** Binding energy in AgCuX compounds and ionic conductivity

Соединение	$E_{св}$, эВ/пару ионов	σ_i , Ом ⁻¹ см ⁻¹
Cu ₂ S	16,11	1,60 [19]
Cu ₂ Se	17,23	1,51 [19]
Cu ₂ Te	19,03	0,30 [19]
AgCuS	18,39	2,38 [3]
AgCuSe	19,85	2,04 [20]
AgCuTe	21,72	0,78 [20]

Увеличение энергии связи на пару ионов при анионном замещении S-Se-Te хорошо согласуется с литературными данными по степени ионности химической связи, оцененными по соотношению электроотрицательностей [6].

Выводы

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- зонная структура халькогенидов меди и серебра характеризуется *p-d*- и *s-p*-гибридизацией энергетических уровней металлов и халькогена;
- данные соединения в высокотемпературной кубической фазе являются узкозонными полупроводниками;
- показано, что одним из факторов, влияющих на величину ионной проводимости, является энергия связи. При анионном замещении Te-Se-S в соединениях Cu₂X AgCuX (X= S, Se, Te) происходит уменьшение энергии связи, что способствует переходу катионов в подвижное состояние и соответственно приводит к росту ионной проводимости.

Список литературы

1. Deng Ph, Rabenbauer A., Vosseler K., Venturini J., Nilges T. AgCuS: a single material diode with fast switching times // Adv. Funct. Mater. 2023. V. 33. 2214882.

2. Liu F., Yu H., Fu J., Zhang X. Good thermoelectric performance and stability in copper sulfide synthesized by hydrothermal method and densified by HP technique // J. Mater Sci: Mater Electron. 2023. V. 34. 1163.

3. Kadrugulov R.F., Yakshibaev R.A., Khasanov M.A. Phase Relations, Ionic Conductivity and Diffusion in the Alloys of Cu₂S and Ag₂S Mixed Conductors // Ionics. 2001. V. 7. P. 156–160.

4. Yakshibaev R.A., Mukhamadeeva N.N., Kadrugulov R.F. Phase relations, ionic transport, and diffusion in the alloys of Ag₂Te-Cu₂Te mixed conductors // Phys. Stat. Solidi(a). 1990. V. 121. P. 111-117.

5. Ishikawa T., Miyatani S. Electronic and Ionic Conduction in Cu_{2-δ}Se, Cu_{2-δ}S and Cu_{2-δ}(Se, S) // J. Phys. Soc. Japan. 1977. V. 42. P. 159-167.

6. Горбачев В.В. Полупроводниковые соединения $A_2^I B^VI$. М.: Металлургия, 1980. 132 с.

7. Абрикосов Н.Х., Банкина В.Ф., Порецкая Л.В., Скуднова Е.В., Чижевская С.Н., Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе: М.: Наука, 1975. 220 с.

8. Becker K.D., Schmalzried H., von Wurb V. The chemical diffusion coefficient in (low temperature) α -Ag₂S determined by an electrochemical relaxation method // Solid State Ionics. 1983. V. 11. P. 213-219.

9. Bucur R.V., Berger R. Electrochemical potentiometric determination of the diffusion coefficient of copper in low digenite, a copper sulfide // Solid State Ionics. 1995. V. 76. P. 291-296.

10. Tsushiya Y. The diffuse X-ray scattering of silver-chalcogenide-type fast-ion conductors // J. Phys. C: Solid State Phys. 1986. V. 19. P. L637-L641.

11. Cava R.J., Reidinger F., Wuensch B.J. Mobile ion distribution and anharmonic thermal motion in fast ion conducting Cu₂S // Solid State Ionics. 1981. V. 5. P. 501-504.

12. Shao Z.P., Shi C.L. First principles calculation of magnetic resonance properties of Cu_{2-δ}X

($\text{X} = \text{Se}, \text{S}, \text{Te}$) // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2021. V. 9. № 6. P. 1245-1256.

13. Kikuchi H., Iyetomi H., Hasegawa A. Insight into the origin of superionic conductivity from electronic structure theory // J. Phys.: Condens. Matter. 1998. V. 10. P. 11439-11448.

14. Ismayilova N.A., Asadullayeva S.G., Kasumova E.K., Hidiyev Kh.A., Hashimova N.N., Guliyeva J.A. Electronic, optical and elastic properties of AgCuS // Chalcogenide Letters. 2024. V. 21 P. 493-498.

15. <https://biovia-materials-studio-2017.updatestar.com/>

16. <https://www.quantum-espresso.org/>

17. Monkhorst H.J., Pack J.D. Special points for Brillouin-zone integrations // Phys. Rev. B. 1976. V. 13. P. 188-5192.

18. Lide D.R. CRS Handbook of physics and chemistry: Taylor & Francis: CRC Press, 2007.

19. Иванов-Шиц А.К., Мурин И.В. Ионика твердого тела в 2 т. СПб.: Изд-во С.Петербург. ун-та, 2010. 1000 с. 2 т.

20. Yakshibaev R.A., Balapanov M.Kh., Mukhamadeeva N.N., Akmanova G.R. Partial conductivity of cations of different kinds in the alloys of $\text{Ag}_2\text{X}-\text{Cu}_2\text{X}$ ($\text{X} = \text{Se}, \text{Te}$) mixed conductors, Phys. Status Solidi (A). 1989. V. 112. P. 97-100.

Информация об авторах

А.Д. Давлетишина – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, УУНУТ.

Р.А. Якишбаев – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики, УУНУТ

References

1. Deng Ph, Rabenbauer A., Vosseler K., Venturini J., Nilges T. AgCuS : a single material diode with fast switching times // Adv. Funct. Mater. 2023. V. 33. 2214882.

2. Liu F., Yu H., Fu J., Zhang X. Good thermoelectric performance and stability in copper sulfide synthesized by hydrothermal method and densified by HP technique // J. Mater Sci: Mater Electron. 2023. V. 34. 1163.

3. Kadrgulov R.F., Yakshibaev R.A., Khasanov M.A. Phase Relations, Ionic Conductivity and Diffusion in the Alloys of Cu_2S and Ag_2S Mixed Conductors // Ionics. 2001. V. 7. P. 156-160.

4. Yakshibaev R.A., Mukhamadeeva N.N., Kadrgulov R.F. Phase relations, ionic transport, and diffusion in the alloys of $\text{Ag}_2\text{Te}-\text{Cu}_2\text{Te}$ mixed conductors // Phys. Stat. Solidi(a). 1990. V. 121. P. 111-117.

5. Ishikawa T., Miyatani S. Electronic and Ionic Conduction in $\text{Cu}_{2-\delta}\text{Se}$, $\text{Cu}_{2-\delta}\text{S}$ and $\text{Cu}_{2-\delta}(\text{Se}, \text{S})$ // J. Phys. Soc. Japan. 1977. V. 42. P. 159-167.

6. Gorbachev V.V. Pokuiprovodnikovye Soedineniya $A_2^I B^{VI}$ (Semiconductor Compounds $A_2^I B^{VI}$). M.: Metallurgiya, 1980.

7. Abrikosov N.Kh, Bankina V.F., Poretskaya L.V., Skudnova E.V., Chizhevskaya S.N. Pokuiprovodnikovye khal'kogenidy i splavy na ikh osnove (Chalcogenide Semiconductors and Related Alloys). M.: Nauka, 1975.

8. Becker K.D., Schmalzried H., von Wurb V. The chemical diffusion coefficient in (low temperature) $\alpha\text{-Ag}_2\text{S}$ determined by an electrochemical relaxation method // Solid State Ionics. 1983. V. 11. P. 213-219.

9. Bucur R.V., Berger R. Electrochemical potentiometric determination of the diffusion coefficient of copper in low digenite, a copper sulfide // Solid State Ionics. 1995. V. 76. P. 291-296.

10. Tsushiya Y. The diffuse X-ray scattering of silver-chalcogenide-type fast-ion conductors // J. Phys. C: Solid State Phys. 1986. V. 19. P. L637-L641.

11. Cava R.J., Reidinger F., Wuensch B.J. Mobile ion distribution and anharmonic thermal motion in fast ion conducting Cu_2S // Solid State Ionics. 1981. V. 5. P. 501-504.

12. Shao Z.P., Shi C.L. First principles calculation of magnetic resonance properties of $\text{Cu}_{2-\delta}\text{X}$ ($\text{X} = \text{Se}, \text{S}, \text{Te}$) // *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 2021. V. 9. № 6. P. 1245-1256.
13. Kikuchi H., Iyetomi H., Hasegawa A. Insight into the origin of superionic conductivity from electronic structure theory // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1998. V. 10. P. 11439-11448.
14. Ismayilova N.A., Asadullayeva S.G., Kasumova E.K., Hidiyev Kh.A., Hashimova N.N., Guliyeva J.A. Electronic, optical and elastic properties of AgCuS // *Chalcogenide Letters*. 2024. V. 21 P. 493-498.
15. <https://biovia-materials-studio-2017.updatestar.com/>
16. <https://www.quantum-espresso.org/>
17. Monkhorst H.J., Pack J.D. Special points for Brillouin-zone integrations // *Phys. Rev. B*. 1976. V. 13. P. 188-5192.
18. Lide D.R. *CRS Handbook of physics and chemistry*: Taylor & Francis: CRC Press, 2007.
19. Ivanov-Shits A.K., Murin I.V. *Ionica tverdogo tela (Solid state ionics) v 2 t.* SPb.: Izd-vo S.Peterb. un-ta, 2010. 1000 p. 2 t.
20. Yakshibaev R.A., Balapanov M.Kh., Mukhamadeeva N.N., Akmanova G.R. Partial conductivity of cations of different kinds in the alloys of $\text{Ag}_2\text{X}-\text{Cu}_2\text{X}$ ($\text{X} = \text{Se}, \text{Te}$) mixed conductors, *Phys. Status Solidi (A)*. 1989. V. 112. P. 97–100.

Information about the authors

A.D. Davletshina - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, UUS&T.
R.A. Yakshibaev - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professo, Associate Professor of the Department of General Physics, UUS&T.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 23.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

The article was received by the editorial board on 31 Oct. 2025; approved after reviewing 23 Feb. 2026; accepted for publication 02 Mar. 2026.