



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-27-34>

УДК 538.911; 538.958; 538.975; 544.641; 621.383

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: СИНТЕЗ, СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА, ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ

В. В. ХОРОШКО¹, Т. Н. ОСМОЛОВСКАЯ^{1,2}, А. В. СТАНЧИК², Н. Г. ПУГАЧ³,
А. С. ДОРОШКЕВИЧ⁴, Ю. В. РАДЮШ², И. И. КУЗЬМАР¹, Е. В. ЛОСКО^{1,5}

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
(Минск, Республика Беларусь)

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
(Москва, Российская Федерация)

⁴Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Российская Федерация)

⁵ОАО «НИИЭВМ» (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. В статье представлены результаты получения крупноблочных поликристаллов системы полупроводниковых твердых растворов $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, образующихся во всем диапазоне концентраций. Установлено, что как соединения $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$, так и твердые растворы имеют тетрагональную структуру станнита $I4_2m$ с соотношением параметров элементарной ячейки $c/a \sim 2$. Параметры элементарной ячейки изменялись линейно в соответствии с законом Вегарда – от $a = (5,704 \pm 0,005) \text{ \AA}$ и $c = (11,26 \pm 0,01) \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ до $a = (5,441 \pm 0,005) \text{ \AA}$ и $c = (10,72 \pm 0,01) \text{ \AA}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. Установлены зависимости рентгеновской плотности и температуры Дебая. По результатам дифференциального термического анализа определены температуры плавления образцов, построена диаграмма состояния системы.

Ключевые слова: станнит, разбавленные магнитные полупроводники, кристаллическая структура, диаграмма состояния.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Полупроводниковые твердые растворы $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: синтез, структурные свойства, диаграмма состояния / В. В. Хорошко [и др.] // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 5. С. 27–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-27-34>.

SEMICONDUCTOR SOLID SOLUTIONS $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: SYNTHESIS, STRUCTURAL PROPERTIES, STATE DIAGRAM

VITALIY V. KHOROSHKO¹, TATIANA N. OSMOLOVSKAYA^{1,2}, ALIONA V. STANCHIK²,
NATALIA G. PUGACH³, ALEXANDR S. DOROSHKEVICH⁴,
YURI V. RADYUSH², INNA I. KUZMAR¹, ALENA U. LOSKA^{1,5}

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science
(Minsk, Republic of Belarus)

³National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russian Federation)

⁴Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russian Federation)

⁵OJSC “NIIEVM” (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the results of obtaining large-block polycrystals of the semiconductor solid solution system $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$, formed in the entire concentration range. It was found that both

the compounds $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ and the solid solutions have a tetragonal stannite structure $I4_2m$ with a ratio of the unit cell parameters $c/a \sim 2$. The unit cell parameters varied linearly in accordance with Vegard's law – from $a = (5.704 \pm 0.005) \text{ \AA}$ and $c = (11.261 \pm 0.01) \text{ \AA}$ for $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ to $a = (5.441 \pm 0.005) \text{ \AA}$ and $c = (10.72 \pm 0.01) \text{ \AA}$ for $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. The dependences of the X-ray density and the Debye temperature were determined. Based on the results of differential thermal analysis, the melting temperatures of the samples were determined and a system phase diagram was constructed.

Keywords: stannite, dilute magnetic semiconductors, crystal structure, state diagram.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation. Khoroshko V. V., Osmolovskaya T. N., Stanchik A. V., Pugach N. G., Doroshkevich A. S., Radyush Y. V., Kuzmar I. I., Loska A. U. (2025) Semiconductor Solid Solutions $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$: Synthesis, Structural Properties, State Diagram. *Doklady BGUIR*. 23 (5), 27–34. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-5-27-34> (in Russian).

Введение

Четвертные полупроводниковые соединения класса $\text{Cu}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{X}_4^{\text{VI}}$ ($\text{A}^{\text{II}} = \text{Zn, Cd, Ni, Fe, Co, Mn}$; $\text{B}^{\text{IV}} = \text{Si, Ge, Sn}$; $\text{X}^{\text{VI}} = \text{S, Se}$) являются перспективными материалами для реализации широкой группы полупроводниковых устройств в связи с большим набором параметров по сравнению с тройными соединениями, что обусловлено усложнением их состава и кристаллической структуры. Полупроводники группы $\text{Cu}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{X}_4^{\text{VI}}$ вызывают научный интерес благодаря множеству возможностей варьирования химического состава и, следовательно, оптимизации функциональности материала под конкретное применение. Среди данного класса перспективной является система $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ (CFTS_{Se}). Так, соединение $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ обладает уникальными структурными, электронными и магнитными характеристиками [1–3]. Материал может применяться в фотоэлектрических преобразователях благодаря высокому коэффициенту оптического поглощения и близкой к оптимальной ширине запрещенной зоны [4, 5]. Также $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ обладает хорошей каталитической активностью [6–8]. Потенциал для применения их в энергохранилищах подтверждается высокими электрофизическими характеристиками в Li-ion батареях [9]. Перспективные исследования направлены на интеграцию $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ в спинтронику, гибридные наноконпозиции и экологически безопасное промышленное производство [10].

Как показал анализ литературы, несмотря на большое количество публикаций, свойства системы твердых растворов CFTS_{Se} исследованы довольно мало и не в полном диапазоне концентраций, что не позволяет установить зависимости фундаментальных свойств. В статье приведены результаты дифференциального термического анализа и диаграмма состояния системы CFTS_{Se}, полученные в процессе исследований.

Проведение эксперимента

Синтез поликристаллов CFTS_{Se}. Поликристаллические образцы были получены однотемпературным методом. Элементарные медь, олово, сера, селен чистотой не менее 99,999 % и железо чистотой 99,998 % загружали в кварцевые ампулы в соотношении $\text{Cu:Fe:Sn:(S + Se)} = 2:1:1:4,05$ с расчетной общей массой кристалла 15–20 г. Количество серы и/или селена бралось с небольшим избытком для создания противодавления внутри ампулы. Ампулы предварительно подвергались травлению, многократной промывке в деионизированной воде, термической обработке при $T = 1173 \text{ K}$.

Ампулы с веществом подсоединяли к вакуумной системе и откачивали до остаточного давления 10^{-2} – 10^{-3} Па . Свободный конец ампулы с исходными компонентами для предотвращения потерь халькогенов во время отпайки поддерживали при температуре 273 K. После отпайки ампулу с веществом размещали в наружной ампуле, которую также откачивали и производили ее отпайку.

Синтез проходил в печах по методике Бриджмена. Повышающий температурный градиент для обеспечения равномерности состава составлял $\sim 20 \text{ K}$ от низа к верху ампулы и $\sim 10 \text{ K}$ – по предполагаемой длине кристалла.

Температурно-временные режимы синтеза устанавливались, ориентируясь на имеющиеся данные по температурам плавления $T_{\text{пл}}$ соединений CFTS и CFTSe [11] с добавкой 20 K. Для об-

разцов, содержащих серу, следовал быстрый нагрев за 4 ч до 848 К, затем до 1123 К за 25 ч. Для соединения $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$, температура плавления которого по литературным данным 1045 К, с учетом сравнительно небольшого избыточного давления селена на таких температурах происходил быстрый нагрев за 4 ч до 973 К и после до 1065 К со скоростью 20 К/ч. Изотермическая выдержка для всех составов – 10 ч. Кристаллизация проводилась со скоростью 5 К/ч до 1023–1093 К в зависимости от состава и далее – со скоростью 20 К/ч до 773 К. Ниже указанной температуры происходило свободное охлаждение. По окончании синтеза для образцов твердых растворов проводился гомогенизирующий отжиг в течение 240 ч при $T = 973$ К. Полученные образцы были крупноблочными, однотонными.

Методы исследования. Элементный состав образцов устанавливали при помощи рентгено-спектрального микроанализа на растровом электронном микроскопе S-4800 (Hitachi, Япония) с приставкой для анализа элементного состава. Кристаллическую структуру определяли методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН 3-М с использованием CuK_α -излучения ($\lambda = 1,5406$ Å). Обработку данных рентгеновской дифракции проводили по методу Ритвельда при помощи программного обеспечения FullProf и XPert-HighScore.

Температуры фазовых превращений определяли посредством дифференциального термического анализа (ДТА). Порошкообразные образцы загружали в небольшие кварцевые сосуды, которые затем вакуумировались. Скорость нагрева составляла 6 К/мин.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты элементного анализа соединения $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ приведены в табл. 1, из которой видно, что с учетом погрешности измерения состав полученных кристаллов близок к расчетному.

Таблица 1. Элементный анализ $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$
Table 1. Elemental analysis $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$

x	Cu, ат.%		Fe, ат.%		Sn, ат.%		S, ат.%		Se, ат.%	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
0	25	24,73	12,5	11,89	12,5	12,72	0	0	50	50,66
0,2	25	24,60	12,5	11,93	12,5	12,90	10	10,80	40	39,77
0,3	25	25,81	12,5	11,34	12,5	12,34	15	13,15	35	37,36
0,5	25	28,26	12,5	13,71	12,5	10,92	25	23,46	25	23,64
0,7	25	27,30	12,5	15,26	12,5	10,26	35	35,26	15	11,93
0,8	25	26,32	12,5	12,71	12,5	11,75	40	39,45	10	11,33
1,0	25	27,69	12,5	13,13	12,5	11,50	50	47,69	0	0

Рентгенограммы системы CFTSSe приведены на рис. 1 (где I – интенсивность; x – состав полученных кристаллов; (112), (220)... – индексы Миллера; θ – угол скольжения). Самым сильным отражением является (112), а относительная высота других отражений указывает на отсутствие предпочтительных ориентаций. Для анализа рентгенограммы был использован метод Ритвельда через программу FullProf.

Установлено, что как соединения, так и твердые растворы CFTSSe обладают тетрагональной структурой станнита пространственной группы $I4_2m$. Из рентгенограмм на рис. 1 четко видно смещение пиков с изменением состава кристаллов. Все дифракционные пики хорошо идентифицируются со структурой станнита CFTS (JCPDF карта № 74-1025).

В литературе присутствуют данные о нескольких структурных модификациях соединения $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$: $I4_2m$ [11, 12] и $P4$ [2, 3]. В [2] на основании данных ДТА наличие двух структурных модификаций поясняется полиморфным превращением при ~974 К, что близко к температуре гомогенизирующего отжига в рассматриваемом в статье случае. Выполняемые в процессе исследований эксперименты по низкотемпературному синтезу твердых растворов неизменно приводили к тому, что химический состав получаемых кристаллов оказывался близок к стехиометрии. Однако образцы были многофазными, исходя из чего можно сделать вывод о стабильности структуры станнита (рис. 2).

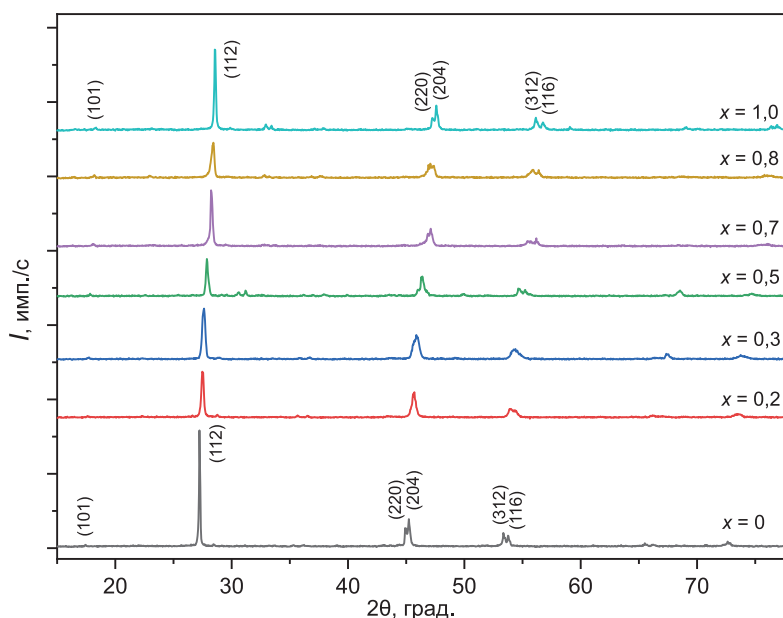


Рис. 1. Рентгенограммы системы CFTSSe
Fig. 1. Radiographs of the CFTSSe system

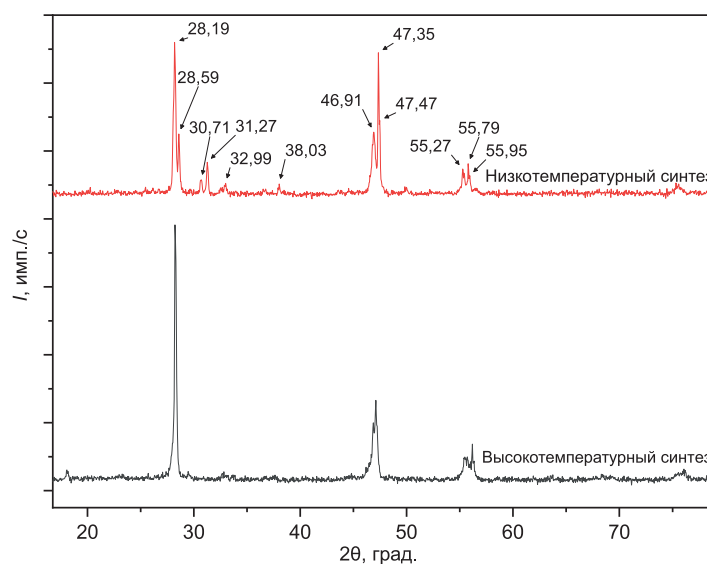


Рис. 2. Пример многофазного образца (сверху) в отличие от завершённого синтеза (снизу) для $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_{0.7}\text{Se}_{0.3})_4$
Fig. 2. Example of a multiphase sample (top) versus completed synthesis (bottom) for $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_{0.7}\text{Se}_{0.3})_4$

Данные рентгенофазового анализа использовались для расчета параметров элементарной ячейки, рентгеновской плотности, объема, a_{eff} . Результаты ДТА и диаграмма состояния системы CFTSSe представлены на рис. 3. Согласно [10], для CFTS $T_{\text{пл}} = 1104$ К и, согласно [13], для CFTSe $T_{\text{пл}} = 951,4$ К. Для твердых растворов по линии на нагрев в точке начала плавления установлены значения солидус, по максимуму кривой плавления – значение ликвидус. По аппроксимации прямолинейного участка кривой на нагрев для соединений установлены температуры плавления, а для твердых растворов определены значения температур, использованных в дальнейшем для расчета температуры Дебая (для простоты восприятия обозначены в табл. 2 единообразно – $T_{\text{пл}}$). При этом с линейным уменьшением параметров кристаллической решетки наблюдается близкое к логарифмическому закону повышение температуры плавления. Между некоторыми фундаментальными параметрами четвертных соединений с тетрагональной решеткой – размеры кристаллической решетки, микротвердость, температура плавления, температу-

ра Дебая и ряд других – могут быть установлены зависимости, также возможно прогнозирование параметров лишь по начальным рентгеновским измерениям.

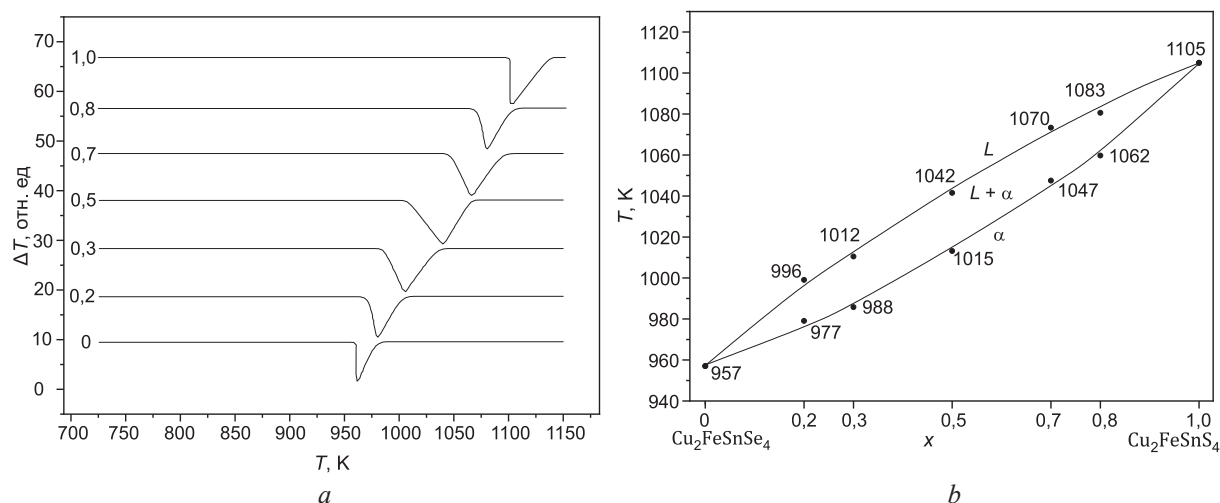


Рис. 3. Результаты дифференциального термического анализа (a) и диаграмма состояния (b) системы CFTSSe

Fig. 3. Results of differential thermal analysis (a) and phase diagram (b) of the CFTSSe system

Температуру Дебая θ_D и скорость звука v_s [14, 15] определяли по следующим формулам:

$$\theta_D = C \left(\frac{T_{пл}}{M/n} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{a_{eff}} \right); \quad (1)$$

$$v_s = \frac{k_B \theta_D}{\hbar} \left(\frac{V/16}{6\pi^2} \right), \quad (2)$$

где C – константа, принятая равной 300 по аналогии для четвертных соединений с тетрагональной структурой [10]; $T_{пл}$ – температура плавления; M – молярная масса; n – количество атомов, $n = 8$; $a_{eff} = \sqrt[3]{\frac{a^2 c}{2}}$; k_B – постоянная Больцмана; $\hbar$ – приведенная постоянная Планка; V – объем элементарной ячейки.

Для определения температуры Дебая θ_D в формуле (1) использовались данные $T_{пл}$, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Параметры системы $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$
Table 2. Parameters of the system $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$

x	a, Å	c, Å	c/a	V, Å ³	a_{eff} , Å	M, г/моль	D_x , г/см ³	$T_{пл}$, K	θ_D , K	$v_s, \times 10^5$, см/с
0	5,704	11,26	1,974	366,47	5,679	617,849	5,56	957	186	1,77
0,2	5,652	11,18	1,979	357,38	5,632	579,973	5,35	996	197	1,86
0,3	5,624	11,09	1,971	350,93	5,598	561,215	5,27	1012	204	1,91
0,5	5,581	11,04	1,979	344,22	5,562	532,699	5,10	1042	213	1,99
0,7	5,484	10,85	1,979	326,62	5,466	486,183	4,91	1070	230	2,11
0,8	5,476	10,75	1,963	322,62	5,443	467,425	4,78	1083	237	2,16
1,0	5,441	10,72	1,971	317,63	5,415	429,909	4,46	1105	251	2,28

Зависимости параметров элементарной ячейки a и c и рентгеновской плотности D_x от концентрации вещества x изображены на рис. 4.

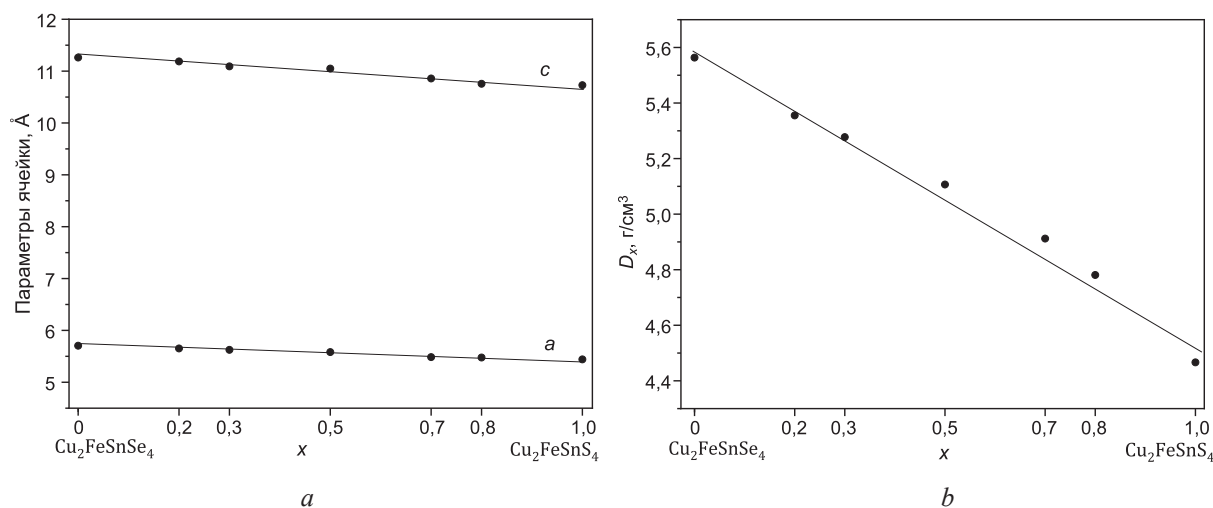


Рис. 4. Зависимости параметров элементарной ячейки (a) и рентгеновской плотности (b) от концентрации системы CFTSSe

Fig. 4. Dependence of the unit cell parameters (a) and X-ray density (b) on the concentration of the CFTSSe system

Для системы твердых растворов соотношение c/a близко к 1,97. По результатам расчетов установлено, что для CFTSSe параметры элементарной ячейки изменяются линейно в соответствии с законом Вегарда. Закономерности изменения параметров a , c , D_x , θ_D для CFTSSe описываются выражениями:

$$\begin{aligned} a &= 5,427 + 0,279(1-x); \\ c &= 10,699 + 0,582(1-x); \\ D_x &= 4,551 + 1,031(1-x); \\ \theta_D &= -151,8 + 8392 \left(M^{-\frac{1}{2}} \right). \end{aligned}$$

Закключение

1. Методом однотемпературного синтеза получены образцы объемных кристаллов $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$. Химический состав образцов соответствовал расчетным величинам. Данные рентгенофазового анализа показали, что параметры элементарной ячейки изменяются линейно в соответствии с законом Вегарда: от $a = (5,704 \pm 0,005) \text{ Å}$ и $c = (11,26 \pm 0,01) \text{ Å}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnSe}_4$ до $a = (5,441 \pm 0,005) \text{ Å}$ и $c = (10,72 \pm 0,01) \text{ Å}$ для $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. Установлены зависимости рентгеновской плотности и температуры Дебая от концентрации серы и селена. Диаграмму состояния системы $\text{Cu}_2\text{FeSn}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_4$ можно отнести к первому классу по классификации метода Розебома, и она имеет вид, характерный для тетрагональных твердых растворов соединений группы $\text{Cu}_2\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{IV}}\text{X}_4^{\text{VI}}$.

2. Исследование выполнено в рамках Государственной программы научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограммы «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения».

Список литературы / References

1. Jing B., Ji J., Hao L., Yang T., Tan E. (2020) DFT Investigation on the Electronic, Magnetic, Mechanical Properties and Strain Effects of the Quaternary Compound $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. *Crystals*. 10 (6), 1–12. <https://doi.org/10.3390/cryst10060509>.
2. Rincón C., Quintero M., Moreno E., Power Ch., Quintero E., Henao J. A., et al. (2011) X-Ray Diffraction, Raman Spectrum and Magnetic Susceptibility of the Magnetic Semiconductor $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$. *Solid State Communications*. 151 (13), 947–951. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2011.04.002>.
3. Xiaolu L., Xianhua W., Daocheng P. (2012) Dilute Magnetic Semiconductor $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanocrystals with a Novel Zincblende Structure. *Journal of Nanomaterials*. 12. <https://doi.org/10.1155/2012/708648>.

4. Ghemud, V. S., Jadhav P. R., Kolhe P. T., Shelke P. N., Dahiwalé S. S., Kshirsagar A. (2023) Experimental and Computational Study of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$: An Emerging Quaternary Semiconductor. *Optical Materials*. 142. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114123>.
5. El Khouja O., Negrila C. C., Nouneh K., Secu M., Ebn Touhami M., Matei E., et al. (2022) Bulk and Surface Characteristics of Co-Electrodeposited $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Thin Films Sulfurized at Different Annealing Temperatures. *Journal of Alloys and Compounds*. 906. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164379>.
6. Salla J. S., Silvestri S., de Moraes Flores E. M., Foletto E. L. (2018) A Novel Application of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Particles Prepared by Solvothermal Route as Solar Photo-Fenton Catalyst. *Materials Letters*. 228, 160–163. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.004>.
7. Dhiman V., Kumar S., Kaur M., Sharma R., Chandel T., Bhardwaj D., et al. (2023) Synergistic Effect of Stirring and Marigold Shaped $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanostructure for the Enhanced Performance of Rhodamine B Degradation Under Visible Light. *Inorganic Chemistry Communications*. 154. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110923>.
8. Sahoo M. K., Gusain M., Thangriyal S., Nagarajan R., Ranga Rao G. (2020) Energy Storage Study of Trime-tallic Cu_2MSnS_4 (M: Fe, Co, Ni) Nanomaterials Prepared by Sequential Crystallization Method. *Journal of Solid State Chemistry*. 282. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2019.121049>.
9. Inamdar A. I., Salunke A. S., Hou B., Shrestha N. K., Im H., Kim H. (2023) Highly Durable and Sustainable Copper-Iron-Tin-Sulphide ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) Anode for Li-Ion Batteries: Effect of Operating Temperatures. *Dalton Transactions*. 34 (52), 12020–12029. <https://doi.org/10.1039/D3DT01338C>.
10. Quintero M., Moreno E., Alvarez S., Marquina J., Rincón C., Quintero E., et al. (2014) Lattice Parameter Values and Phase Transitions for the $\text{Cu}_2\text{-II-IV-S}_4(\text{Se}_4)$ (II=Mn, Fe, Co; IV=Si, Ge, Sn) Magnetic Semiconductor Compounds. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. 34 (1), 28–38.
11. Zhou B., Yan X., Li P., Yang L., Yu D. (2015) Raman Spectroscopy as a Superior Tool to Understand the Synthetic Pathway of $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanoparticles. *European Journal of Inorganic Chemistry*. 16, 2690–2694. <https://doi.org/10.1002/ejic.201500189>.
12. Ahmadi S., Khemiri N., Cantarero A., Kanzari M. (2024) Effect of Calcination on the Structural, Morphological and Optical Properties of Earth Abundant $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Powders Prepared by Solid-State Reaction. *Journal of Solid State Chemistry*. 339. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2024.124969>.
13. Quintero M., Barreto A., Grima P., Tovar R., Quintero E., Sánchez Porras G., et al. (1999) Crystallographic Properties of $\text{I}_2\text{-Fe-IV-VI}_4$ Magnetic Semiconductor Compounds. *Materials Research Bulletin*. 34 (14–15), 2263–2270. [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(00\)00166-5](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(00)00166-5).
14. Lindemann F. (1910) About the Calculation of Molecular Own Frequencies. *Physical Magazine*. 11 (14), 609–612.
15. Sánchez Porras G., Quintero M., Wasim. S. M. (1990) Journal of Applied Physics Electrical Properties of $(\text{CuIn})_{1-z}\text{Mn}_{2z}\text{Te}_2$ Alloys. *Applied Physics*. 67 (7), 3382–3386. <https://doi.org/10.1063/1.345349>

Поступила 31.03.2025

Принята в печать 27.06.2025

Received: 31 March 2025

Accepted: 27 June 2025

Вклад авторов

Хорошко В. В. осуществил постановку задачи, выполнил дифференциальный термический анализ и корректировку технологических режимов, провел синтез образцов и анализ экспериментальных результатов.

Осмоловская Т. Н. провела синтез образцов, определила температурно-временные режимы, выполнила обработку и обобщение экспериментальных данных, провела анализ результатов.

Станчик А. В., Пугач Н. Г. осуществили постановку задачи, выполнили обобщение экспериментальных данных, провели анализ результатов.

Дорошкевич А. С. выполнил обработку экспериментальных данных.

Радюш Ю. В. провел рентгенофазовый анализ, осуществил обобщение и верификацию экспериментальных результатов.

Кузьмар И. И. провел элементный анализ, выполнил дифференциальный термический анализ и обработку экспериментальных данных.

Лоско Е. В. провела измерение характеристик твердых растворов.

Authors' contribution

Khoroshko V. V. formulated the problem, performed differential thermal analysis and adjustment of process modes, synthesized samples and analyzed experimental results.

Osmolovskaya T. N. synthesized the samples, determined the temperature-time regimes, processed and summarized the experimental data, and analyzed the results.

Stanchik A. V., Pugach N. G. carried out the problem statement, generalised the experimental data and analysed the results.

Doroshkevich A. S. performed the processing of experimental data.

Radyush Y. V. carried out X-ray phase analysis, generalisation and verification of experimental results.

Kuzmar I. I. conducted elemental analysis, performed differential thermal analysis and processing of experimental data.

Loska A. U. carried out measurements of the characteristics of solid solutions.

Сведения об авторах

Хорошко В. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Осмоловская Т. Н., асп. Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (НПЦ НАН Беларуси)

Станчик А. В., канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр., НПЦ НАН Беларуси

Пугач Н. Г., канд. физ.-мат. наук, проф. департамента электронной инженерии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Дорoshkevich А. С., канд. физ.-мат. наук, доц., нач. группы сектора исследований, Объединенный институт ядерных исследований

Радюш Ю. В., канд. физ.-мат. наук, доц., вед. науч. сотр., НПЦ НАН Беларуси

Кузьмар И. И., канд. техн. наук, доц., зав. лаб. «Импульсный электролиз и многокомпонентные материалы», БГУИР

Лоско Е. В., инж. ОАО «НИИЭВМ», асп. БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 44 737-99-99
E-mail: khoroshko@bsuir.by
Хорошко Виталий Викторович

Information about the authors

Khoroshko V. V., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Chair of Department of Information and Computer Systems Design, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Osmolovskaya T. N., Postgraduate of the Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (SPC NAS of Belarus)

Stanchik A. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher, SPC NAS of Belarus

Pugach N. G., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Professor of the Department of Electronic Engineering, National Research University Higher School of Economics

Doroshkevich A. S., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Research Sector Group, Joint Institute for Nuclear Research

Radyush Y. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Leading Researcher, SPC NAS of Belarus

Kuzmar I. I., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Laboratory "Pulse Electrolysis and Multicomponent Materials", BSUIR

Loska A. U., Engineer at OJSC "NII EVM", Postgraduate of BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 44 737-99-99
E-mail: khoroshko@bsuir.by
Khoroshko Vitaliy Victorovich