

ISSN 1561-2430 (Print)
 ISSN 2524-2415 (Online)
 УДК 621.315.592
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-119-126>

Поступила в редакцию 13.01.2021
 Received 13.01.2021

И. В. Боднар, А. А. Фещенко, В. В. Хорошко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Аннотация. Методом направленной кристаллизации выращены монокристаллы соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$. Методом микрозондового рентгеноспектрального анализа определен состав полученных монокристаллов. Установлено, что содержание компонентов в выращенных монокристаллах удовлетворительно согласуется с заданным составом в исходной шихте. Рентгеновским методом определена структура полученных материалов. Показано, что как исходные соединения, так и твердые растворы на их основе кристаллизуются в кубической структуре шпинели. Методом наименьших квадратов рассчитаны параметры элементарной ячейки соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 и твердых растворов на их основе, которые с составом x изменяются линейно. Пикнометрическим методом определена плотность, по методу Кнупа – микротвердость соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$. Показано, что плотность, как и параметр элементарной ячейки, с составом x изменяется линейно, микротвердость – с максимумом для состава $x = 0,4$. С помощью дифференциально-термического анализа (ДТА) определены температуры фазовых превращений и построена диаграмма состояния системы In_2S_3 – AgIn_5S_8 , которая характеризуется небольшим интервалом кристаллизации и относится III типу по классификации Розебома. Кривые ликвидуса и солидуса вогнуты к оси абсцисс и имеют общую точку.

Ключевые слова: двухтемпературный метод, метод Бриджмена, твердые растворы, монокристаллы, пикнометрическая плотность, микротвердость, температуры фазовых превращений, диаграмма

Для цитирования. Боднар, И. В. Исследование твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ / И. В. Боднар, А. А. Фещенко, В. В. Хорошко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 119–126. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-119-126>

Ivan V. Bodnar, Artsiom A. Feshchenko, Vitaly V. Khoroshko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

STUDY OF $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ SOLID SOLUTIONS

Abstract. Herein, single crystals of compounds In_2S_3 , AgIn_5S_8 and solid solutions $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ were grown by directional crystallization. The composition of the obtained single crystals was determined by microprobe X-ray spectral analysis. It is found that the content of the components in the grown single crystals is in satisfactory agreement with the specified composition in the initial charge. The structure of the obtained materials was determined by the X-ray method. It is shown that both the initial compounds and the solid solutions based on them were crystallized in the cubic structure of the spinel. The unit cell parameters of the In_2S_3 , AgIn_5S_8 compounds and the solid solutions based on them, which vary linearly with the composition x , were calculated by the least squares method. The density was determined by the pycnometric method, and the microhardness of the In_2S_3 and AgIn_5S_8 compounds and the $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ solid solutions was determined by the Knoop method. It is shown that the density, like the unit cell parameter, changes linearly with the composition x , but the dependence of microhardness on the x parameter has a maximum for $x = 0.4$. Using differential thermal analysis (DTA), the temperatures of phase transformations were determined and the phase diagram of the In_2S_3 – AgIn_5S_8 system was constructed, which is characterized by a small crystallization interval and belongs to type III according to the Rosebom classification. The curves of liquidus and solidus are concave to the abscissa axis and have a common point.

Keywords: two-temperature method, Bridgman's method, solid solutions, single crystals, pycnometric density, microhardness, phase transformation temperatures

For citation. Bodnar I. V., Feshchenko A. A., Khoroshko V. V. Study of $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ solid solutions. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2021, vol. 57, no. 1, pp. 119–126 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-119-126>

Введение. Бинарные и тройные соединения с дефектной структурой групп $\text{B}_2^{\text{III}}\text{C}_3^{\text{VI}}$ и $\text{A}^{\text{I}}\text{B}_5^{\text{III}}\text{C}_8^{\text{VI}}$, в частности монокристаллы In_2S_3 и AgIn_5S_8 , с концентрацией вакансий в катионной подрешетке ~25 и 33 % соответственно, являются предметом внимания многих исследователей

с возможностью использования их в полупроводниковой опто- и микроэлектронике. Данные соединения кристаллизуются в структуре шпинели, для которой характерна кубическая плотнейшая упаковка анионов, а октаэдрические и тетраэдрические пустоты частично заняты катионами. При этом предполагается, что вакансии упорядоченно занимают места в узлах кристаллической решетки из расчета четырех электронов на узел [1]. Физические свойства твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ обусловлены его кристаллической структурой, в результате наличия большого количества стехиометрических вакансий нарушается периодичность решетки и сильно искажается потенциальное поле кристалла, что сказывается на его свойствах [2–9].

В настоящей работе представлены впервые полученные данные исследований физико-химических свойств твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$.

Методика проведения эксперимента. Кристаллы соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 и твердые растворы $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ на первом этапе синтезировали двухтемпературным методом. В данном методе металлические компоненты (серебро и индий чистотой >99,99 %), взятые в соотношениях, соответствующих составу соединения или твердого раствора, загружали в кварцевую лодочку, которую помещали в один конец кварцевой ампулы. В другом ее конце находилась сера, которую брали с избытком от стехиометрии с целью создания давления ее паров над расплавом ~2 атм.

Ампулы и лодочки предварительно проходили химико-термическую обработку: травление в плавиковой кислоте, в течение 20 мин, и в смеси $\text{HNO}_3 : \text{HCl} = 1 : 3$, в течение 30 мин. Затем ампулу промывали в дистиллированной воде и отжигали в вакууме в течение 60 мин при температуре 1270 К. Предварительная обработка такого рода способствует удалению примесей, содержащихся на поверхности кварцевой ампулы и лодочки. Подготовленную по данной методике ампулу с исходными компонентами откачивали до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па и помещали в двухзонную печь таким образом, чтобы металлические компоненты, находящиеся в кварцевой лодочке, были в «горячей» зоне, а в «холодной» зоне находилась сера.

Температуры в зонах печи регулировались независимо друг от друга. Как известно, общее давление в ампуле определяется зоной с более низкой температурой, которая регулируется так, чтобы давление не превышало допустимого значения. Температуру «горячей» зоны печи поддерживали ~1360–1420 К, «холодной» – ~700 К. При таком температурном градиенте ампула находилась в печи в течение 120 мин. За это время протекала реакция между исходными металлическими компонентами и образовавшимися парами серы, после чего температуру в зоне с серой повышали до 950 К. Для более полного протекания реакции между металлическими компонентами их дополнительно выдерживали в течение 60 мин. Направленную кристаллизацию расплава проводили путем понижения температуры в зоне с металлическими компонентами до 800 К, и затем отключали печь от питания. Синтезированные по данной методике поликристаллы в дальнейшем были использованы для выращивания монокристаллов твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ методом Бриджмена (вертикальный вариант).

Полученные поликристаллы предварительно измельчали и загружали в ампулы. Перед загрузкой компонентов ампулы проходили химико-термическую обработку по методике, описанной выше. Ампулы были двойными для предохранения соединений от окисления на воздухе в случае нарушения целостности внутренней ампулы. Последняя вакуумировалась до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па, после чего ее отпаивали от вакуумной установки и помещали во вторую кварцевую ампулу, которая имела больший диаметр, ее также вакуумировали до аналогичного давления $\sim 10^{-3}$ Па. Внутренняя ампула имела небольшую конусность и заканчивалась цилиндрическим капилляром, который обеспечивал формирование монокристаллической затравки. К наружной ампуле снизу приваривали кварцевый стержень, служивший держателем.

Температуру в печи повышали до 1370–1420 К, и для гомогенизации расплава выдерживали его при этой температуре 120 мин. По истечении указанного времени выдержки проводили направленную кристаллизацию, понижая температуру печи со скоростью ~2–3 К/ч до полного затвердевания расплава. После чего полученные слитки отжигали при 1100 К в течение 400 ч. Выращенные в таких условиях монокристаллы имели диаметр ~16 мм и длину ~40 мм, были

однородными и гомогенными, что установлено методами микрорентгеспектрального и рентгеновского анализов.

Состав выращенных монокристаллов устанавливали методом микрорентгеноспектрального анализа. Анализ производился на установке Stereoscan-360, которая при помощи направленного потока электронов на исследуемый образец вызывает характеристическое рентгеновское излучение, по мере того как атомы поглощают и испускают энергию.

Структуру выращенных кристаллов определяли рентгеновским методом. Угловые положения линий дифракционного спектра записывали на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М в CuK_α -излучении с графитовым монохроматором. Образцы для измерений готовили путем измельчения кристаллов и последующей их запрессовкой в специальном держателе. Для снятия механических напряжений, возникающих при растирании монокристаллов, проводили их отжиг в вакууме при температуре 700 К в течение 2 ч.

С помощью картотеки Международного центра дифракционных данных (International Center for Diffraction Data Joint Committee on Powder Diffraction Standards, ICDD JCPDS) были индцированы дифрактограммы и определена их кристаллическая структура. Относительная погрешность в определении параметров элементарных ячеек полученных соединений не превышала $\pm 0,05\%$.

Измерение плотности производилось пикнометрическим способом, методика которого описана в работах [10–11].

Исследование микротвердости (H) проводилось методом Кнупа с использованием стандартной ромбической пирамиды, так как именно в этом случае изменение величины H наиболее чувствительно к физико-механическим свойствам кристаллов. Измерения выполнялись на микротвердомере LIECA VMHT MOT с моторизованным револьвером и подвижным столиком, при помощи которого можно точно перемещать образец без его снятия и повторной юстировки. Перед измерением микротвердости кристаллы проходили предварительную подготовку: из полученных монокристаллов вырезали пластины в виде параллелепипедов перпендикулярно оси их роста, после чего их шлифовали и полировали с одной стороны, а для снятия механических напряжений, возникающих при шлифовке и полировке, обрабатывали в травителе: $\text{Br}_2 : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1 : 3$. Значение микротвердости образца рассчитывалось как среднее арифметическое из 20 полученных отпечатков. Ошибка в определении H не превышала 5 %.

Для определения температуры фазовых переходов системы $(\text{In}_2\text{S}_3)_x-(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ и построения диаграммы состояния $\text{In}_2\text{S}_3-\text{AgIn}_5\text{S}_8$ использовался дифференциальный термический анализ (ДТА). Анализ основан на регистрации разности температур исследуемого вещества с инертным образцом и сравнения их результатов при одновременном нагревании или охлаждении. ДТА проводили с помощью установки, которая позволяет регистрировать значения зависимости $\Delta T = f(T)$, где ΔT – разность температур между исследуемым образцом и эталоном. Для осуществления ДТА полученные образцы растирали в порошок, после чего его загружали в сосудики Степанова. Свободный объем в указанных сосудиках заполняли балластом из кварцевого порошка для предотвращения диссоциации соединений или твердых растворов. В качестве эталона использовали прокаленный оксид алюминия, который, как и исследуемое вещество, загружали в аналогичные сосудики Степанова. Идентичность температурных условий образца и эталона достигали помещением их в гнезда держателя, сделанного из жаропрочной стали. Равномерный нагрев держателя в печи со скоростью ~ 5 К/мин обеспечивали с помощью прецизионного регулятора температуры РИФ-101. Установку ДТА периодически подвергали градуировке.

Результаты и их обсуждение. Экспериментальные результаты элементного состава соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 и твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ показаны в таблице. Видно, что полученные экспериментальные данные согласуются с расчетными величинами. Следует также отметить, что не наблюдается значительных отклонений составов (x) в разных точках монокристаллов, что свидетельствует об их однородности.

Полученные результаты рентгеноструктурного анализа показали, что на дифрактограммах как исходных соединения In_2S_3 , AgIn_5S_8 , так и твердых растворов на их основе присутствуют рефлексы отражений, соответствующих кубической структуре шпинели. Разрешение высокоугловых линий на дифрактограммах свидетельствует о равновесности соединений In_2S_3 , AgIn_5S_8 и гомогенности твердых растворов на их основе.

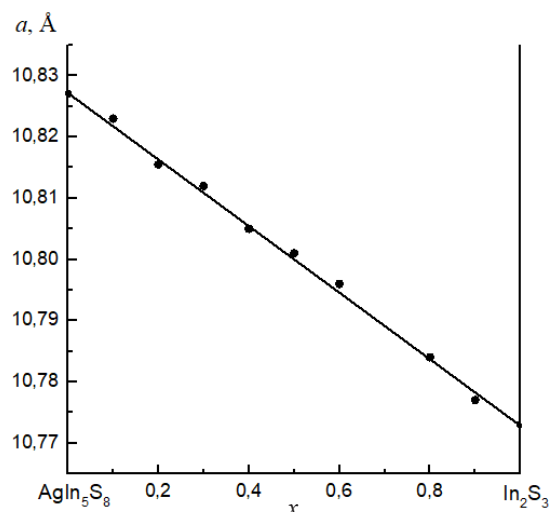


Рис. 1. Зависимость значений параметра элементарной ячейки a от состава x системы $(\text{In}_2\text{S}_3)_x-(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Fig. 1. Dependence of the unit cell parameter a on the composition x of the $(\text{In}_2\text{S}_3)_x-(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ system

**Экспериментальные и расчетные результаты элементного состава
системы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$**

Experimental and calculated results of the elemental composition of the system of solid solutions $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Состав, x Composition, x	Ag		In		S	
	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.	Расч. Calc.	Эксп. Exp.
0,0	7,14	7,29	35,72	35,03	57,14	57,68
0,2	6,57	6,87	36,06	35,21	57,37	57,92
0,3	6,19	5,98	36,31	36,44	57,50	57,58
0,4	5,77	6,45	36,53	35,84	57,79	57,71
0,5	5,27	5,83	36,84	36,13	57,89	58,04
0,6	4,65	4,96	37,21	36,98	58,14	58,06
0,8	2,95	3,09	38,25	37,93	58,80	58,98
0,9	1,69	1,78	38,98	38,72	59,39	59,50
1,0	—	—	40,00	40,36	60,00	59,64

На основании измерений угловых положений различных дифракционных линий определяли межплоскостные расстояния исследуемых плоскостей отражений. Методом наименьших квадратов были рассчитаны параметры элементарной ячейки, которые для исходных соединений равны: $a = 10,773 \pm 0,005 \text{ \AA}$ для In_2S_3 и $a = 10,827 \pm 0,005 \text{ \AA}$ для AgIn_5S_8 .

Зависимость значений параметра элементарной ячейки от состава x для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ показана на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что изменение указанных параметров с составом x осуществляется линейно, т. е. в системе $\text{In}_2\text{S}_3-\text{AgIn}_5\text{S}_8$ выполняется закон Вегарда и описывается выражением

$$a = 10,773 + 0,054x. \quad (1)$$

Концентрационная зависимость значений пикнометрической плотности от состава x изображена на рис. 2.

Из данных, представленных рис. 2, следует, что плотность с составом x изменяется линейно от $4,62 \text{ г/см}^3$ для In_2S_3 , до $4,84 \text{ г/см}^3$ для AgIn_5S_8 . Указанная зависимость описывается следующим выражением:

$$d_{\text{пикн}} = 4,62 + 0,22x. \quad (2)$$

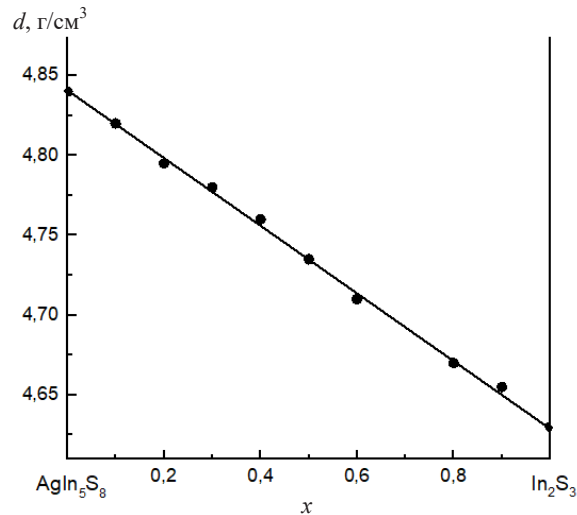


Рис. 2. Изменение пикнометрической плотности с составом x для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Fig. 2. Change in pycnometric density with composition x for $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ solid solutions

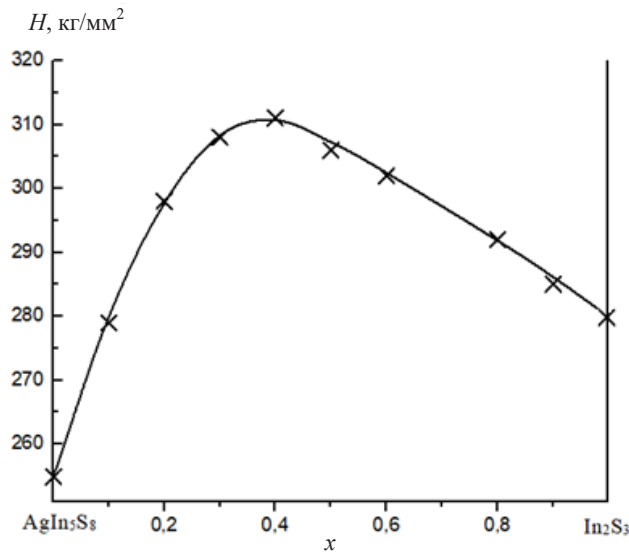


Рис. 3. Концентрационная зависимость микротвердости $H(x)$ системы $(\text{In}_2\text{S}_3)_x - (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Fig. 3. Concentration dependence of the microhardness of the system $(\text{In}_2\text{S}_3)_x - (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Данные по микротвердости представлены на рис. 3. Как видим, для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ выполняется закон Курнакова, согласно которому при образовании в системе непрерывного ряда твердых растворов концентрационная зависимость $H(x)$ описывается плавной кривой с максимумом [12]. Точка максимальной микротвердости соответствует составу $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,4} \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,6}$.

На рис. 4. показаны результаты дифференциального термического анализа системы $\text{In}_2\text{S}_3 - \text{AgIn}_5\text{S}_8$. Из представленных термограмм видно, что для соединения AgIn_5S_8 и твердых растворов присутствует один тепловой эффект, который соответствует температуре плавления для соединения AgIn_5S_8 и точкам солидуса и ликвидуса для твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x \cdot (\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$. Для монокристалла In_2S_3 присутствуют два тепловых эффекта при температурах 1012 и 1364 К. Тепловой эффект при температуре 1012 К соответствует твердофазному превращению, при котором кубическая структура шпинели соединения In_2S_3 трансформируется в тригональную, а тепловой эффект при температуре в 1364 К соответствует температуре плавления данного соединения.

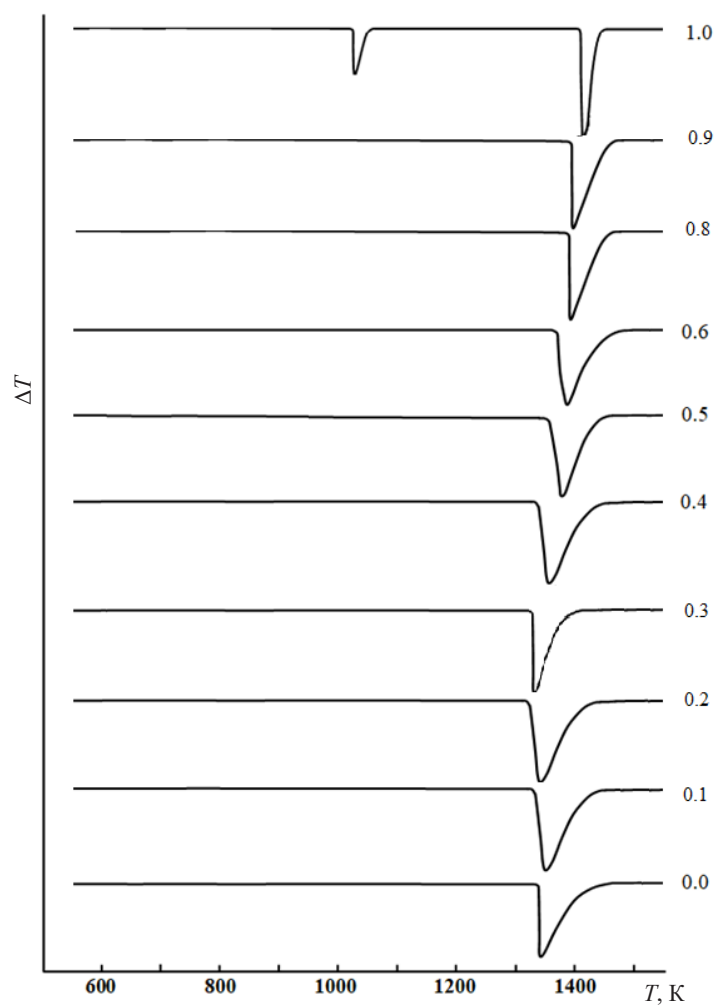


Рис. 4. Термограммы системы $(\text{In}_2\text{S}_3)_x-(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$

Fig. 4. Thermograms of the $(\text{In}_2\text{S}_3)_x-(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ system

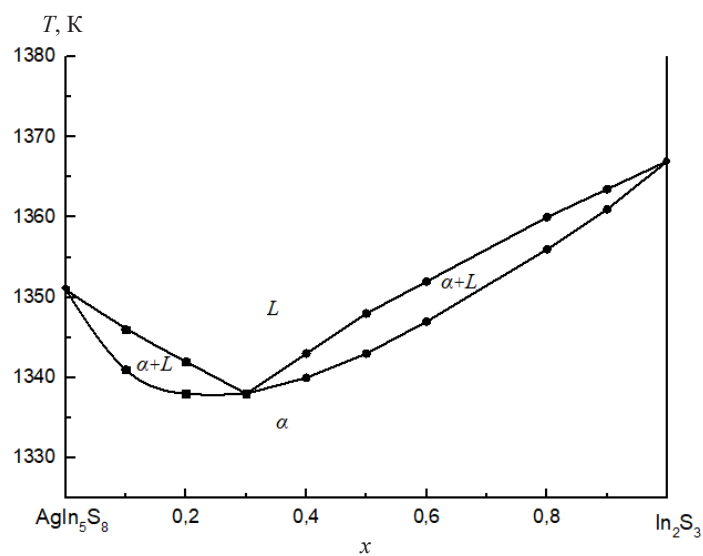


Рис. 5. Диаграмма состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3-\text{AgIn}_5\text{S}_8$

Fig. 5. System state diagram of $\text{In}_2\text{S}_3-\text{AgIn}_5\text{S}_8$

Диаграмма состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3\text{--AgIn}_5\text{S}_8$, построенная по данным РФА и ДТА, показана на рис. 5. На ней имеется одна общая точка для твердого раствора $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,3}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,7}$. Из указанной диаграммы состояния можно сделать вывод, что система характеризуется неограниченной растворимостью как в твердом, так и жидком состоянии, а интервал кристаллизации составляет ~ 5 К. Данная диаграмма относится к III типу по классификации Розебома.

Заключение. Методом Бриджмена (вертикальный вариант) выращены монокристаллы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ во всем интервале концентраций x . Определена кристаллическая структура и элементный состав полученных твердых растворов. Установлено, что монокристаллы системы твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{1-x}$ кристаллизуются в кубическую структуру шпинели (пространственная группа $\text{Fd}\bar{3}_m\text{--O}_h^7$). Расчет параметров элементарной ячейки (a) и построение концентрационной зависимости показали, что параметры a с составом x изменяются согласно закону Вегарда. Плотность, как и в случае с параметром элементарной ячейки, имеет линейную зависимость с составом x . По измеренным данным микротвердости H установлено, что $H(x)$ изменяется с максимумом, который соответствует твердому раствору $(\text{In}_2\text{S}_3)_{0,4}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_{0,6}$. С помощью дифференциального термического анализа определены температуры фазовых превращений и построена диаграмма состояния системы $\text{In}_2\text{S}_3\text{--AgIn}_5\text{S}_8$. Построенная диаграмма состояния характеризуется небольшим интервалом кристаллизации, и ее можно отнести к III типу диаграмм состояния по классификации Розебома.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Т20МV-007).

Acknowledgments. This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (Project no. T20MV-007).

Список использованных источников

1. Полупроводниковые халькогениды и сплавы на их основе / Н. Х. Абрикосов [и др.]. – М., Наука, 1975. – 220 с.
2. Фоточувствительные структуры на кристаллах In_2S_3 / И. В. Боднар [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 11. – С. 1346–1348.
3. Sebentritt, S. Alternative buffers for chalcopyrite solar cells / S. Sebentritt // Solar Energy. – 2004. – Vol. 77, № 6. – P. 767–775. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.018>
4. Influence of In_2S_3 film properties on the behavior of $\text{CuInS}_2/\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ type solar cells / B. Asenjo [et al.] // Solar Energy Materials and Solar Cells. – 2005. – Vol. 87, № 1/4. – P. 647–656. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.07.043>
5. Band offset at the $\text{CuGaSe}_2/\text{In}_2\text{S}_3$ heterointerface / T. Schulmeyer [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 85, № 6. – P. 961–963. <https://doi.org/10.1063/1.1779340>
6. Физические свойства монокристаллов $\text{Cu}_x\text{Ag}_{1-x}\text{In}_5\text{S}_8$ и поверхностно-барьерных структур на их основе / И. В. Боднар [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 9. – С. 1043–1046.
7. Получение и исследование гетеропереходов $\text{AgIn}_5\text{S}_8/(\text{InSe}, \text{GaSe})$ / И. В. Боднар [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т. 33, № 7. – С. 805–809.
8. Боднар, И. В. Структурные и оптические свойства пленок AgIn_5S_8 , полученных методом импульсного лазерного испарения / И. В. Боднар, В. Ф. Гременок // Неорган. материалы. – 2004. – Т. 40, № 12. – С. 1418–1422.
9. Фотоэлектрхимические ячейки на монокристаллах In_2S_3 / В. Ю. Рудь [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. 43, № 4. – С. 445–448.
10. Ильинский, Г. А. Определение плотности минералов / Г. А. Ильинский. – Л.: Недра, 1975. – 119 с.
11. Воскресенский, П. И. Техника лабораторных работ / П. И. Воскресенский. – М.: Химия, 1969. – 720 с.
12. Глазов, В. М. Микротвердость металлов и полупроводников / В. М. Глазов, В. Н. Вигдорович. – М.: Металлургия, 1969. – 248 с.

References

1. Abrikosov N. Kh., Bankina V. F., Poretskaya L. V., Skudnova E. V., Chizhevskaya S. N. *Semiconductor Chalcogenides and Alloys Based on Them*. Moscow, Nauka Publ., 1975. 220 p. (in Russian).
2. Bodnar I. V., Polubok V. A., Rud V. Yu., Rud Yu. V. Photosensitive structures on In_2S_3 crystals. *Semiconductors*, 2003, vol. 37, no. 11, pp. 1308–1310. <https://doi.org/10.1134/1.1626214>
3. Sebentritt S. Alternative buffers for chalcopyrite solar cells. *Solar Energy*, 2004, vol. 77, no. 6, pp. 767–775. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.06.018>
4. Asenjo B., Chaparro A. M., Gutierrez M. T., Herrero J., Klaer J. Influence of In_2S_3 film properties on the behavior of $\text{CuInS}_2/\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$ type solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, vol. 87, no. 1–4, pp. 647–656. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2004.07.043>
5. Schulmeyer T., Klein A., Kniese R., Powalla M. Band offset at the $\text{CuGaSe}_2/\text{In}_2\text{S}_3$ heterointerface. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, no. 6, pp. 961–963. <https://doi.org/10.1063/1.1779340>

6. Bodnar I. V., Kudritskaya E. A., Polushina I. K., Rud V. Yu., Rud Yu. V. Physical properties of $\text{Cu}_x\text{Ag}_{1-x}\text{In}_5\text{S}_8$ solid solution single crystals and related surface-barrier structures. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, no. 9, pp. 933–936. <https://doi.org/10.1134/1.1187539>

7. Bodnar I. V., Gremenok V. F., Rud V. Yu., Rud Yu. V. Creation and investigation of AgIn_5S_8 / (InSe, GaSe) heterojunctions. *Semiconductors*, 1999, vol. 33, no. 7, pp. 740–743. <https://doi.org/10.1134/1.1187773>

8. Bodnar I. V., Gremenok V. F. Structural and optical properties of AgIn_5S_8 films grown by pulsed laser deposition. *Inorganic Materials*, 2004, vol. 40, no. 12, pp. 1418–1422. <https://doi.org/10.1007/s10789-005-0051-y>

9. Rud V. Yu., Rud Yu. V., Bodnar I. V., Ushakova T. N. Photoelectrochemical cells on the base of In_2S_3 single crystals. *Semiconductors*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 425–428. <https://doi.org/10.1134/s1063782609040046>

10. Ilyinsky G. A. *Determination of the Density of Minerals*. Leningrad, Nedra Publ., 1975. 119 p. (in Russian).

11. Voskresensky P. I. *Technique of Laboratory Work*. Moscow, Khimiya Publ., 1969. 720 p. (in Russian).

12. Glazov V. M., Vigdorovich V. N. *Microhardness of Metals and Semiconductors*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 248 p. (in Russian).

Информация об авторах

Боднар Иван Васильевич – доктор химических наук, профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: chemzav@bsuir.by

Фещенко Артем Александрович – аспирант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: faa@bsuir.by. <https://orcid.org/0000-0001-8290-3884>

Хорошко Виталий Викторович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой проектирования информационно-компьютерных систем, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: khoroshko@bsuir.by

Information about the authors

Ivan V. Bodnar – Dr. Sc. (Chemistry), Professor of the Department of Design of Information and Computer Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chemzav@bsuir.by

Artsiom A. Feshshenko – Postgraduate Student, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: faa@bsuir.by. <https://orcid.org/0000-0001-8290-3884>

Vitaly V. Khoroshko – Ph. D., Head of the Department of Design of Information and Computer Systems, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khoroshko@bsuir.by