

Электрические свойства эвтектической композиции InSb-MnSb

Кочура А. В.¹, Родионов В. В.¹, Кочура Е. П.¹, Маренкин С. Ф.², Аронзон Б. А.³
(Статья представлена членом редакционной коллегии С. В. Блажевичем)

¹ Юго-Западный государственный университет,
Россия, 305040, г. Курск, ул. 50 лет октября, 94
akochura@mail.ru, vovarodionov2009@yandex.ru, ekochura@mail.ru

² Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский просп., 31
marenkin@rambler.ru

³ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский просп., 51
aronzon@mail.ru

Аннотация. Синтезированы направленно закристаллизованные монокристаллические эвтектики InSb-MnSb и выполнены исследования их электрических свойств. Игольчатые включения с высоким аспектным соотношением ферромагнитного металла MnSb располагаются параллельно в полупроводниковой матрице InSb. Температурные зависимости удельного сопротивления демонстрируют наличие высокой анизотропии электрических свойств в образцах с различной ориентацией направления электрического тока и игольчатых включений MnSb. При достаточно высокой эффективной концентрации основных носителей заряда (дырок) $7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ их подвижность достигает $70 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Удельное сопротивление игольчатых включений MnSb ниже, чем в объемных кристаллах, что говорит об их более высоком кристаллическом совершенстве.

Ключевые слова: эвтектический сплав, антимонид индия, антимонид марганца, проводимость, эффективная подвижность, эффективная концентрация основных носителей заряда

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (г/з № 0851-2020-0035) и в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Соглашение № 075-15-2021-1213) в части получения и характеристики объектов исследования, РФФ (21-12-00254) в части изучения их электрических свойств.

Для цитирования: Кочура А. В., Родионов В. В., Кочура Е. П., Маренкин С. Ф., Аронзон Б. А. 2024. Электрические свойства эвтектической композиции InSb-MnSb. *Прикладная математика & Физика*, 56(1): 60–65.
DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-1-60-65

Original Research

Electrical Properties of Eutectic Composition InSb-MnSb

Alexey V. Kochura¹, Vladimir V. Rodionov¹, Evgenia P. Kochura¹, Sergey F. Marenkin²,
Boris A. Aronzon³

(Article submitted by a member of the editorial board S. V. Blazhevich)

¹SouthWest State University,
94 50 Let Oktyabrya st., Kursk, 305040, Russia
akochura@mail.ru, vovarodionov2009@yandex.ru, ekochura@mail.ru

²N. S. Kurnakov Institute of General and Nonorganic Chemistry of the Russian Academy of Science,
31 Leninsky Prospekt st., Moscow, 119991, Russia
marenkin@rambler.ru

³P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science,
51 Leninsky Prospekt st., Moscow, 119991, Russia
aronzon@mail.ru

Abstract. A single crystal of directionally crystallized eutectic InSb-MnSb were synthesized and the electrical properties was determined. Needle inclusions with a high aspect ratio of MnSb ferromagnetic metal are arranged in parallel in the InSb semiconductor matrix. The temperature dependences of the resistivity demonstrate the presence of high anisotropy of electrical properties in samples with different orientations of the direction of electric current and MnSb needle inclusions. The high effective concentration of the main charge carriers (holes) is $7 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$. The mobility of the main charge carriers reaches $70 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. The resistivity of MnSb needle inclusions is lower than in bulk crystals, which indicates their higher crystal perfection.

Keywords: Eutectic Alloy, Indium Antimonide, Manganese Antimonide, Conductivity, Effective Mobility, Effective Concentration of the Main Charge Carriers

Acknowledgements: The paper was carried out with the support of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (g/w № 0851-2020-0035) and within the framework of the strategic academic leadership program "Priority 2030" (Agreement № 075-15-2021-1213) in terms of obtaining and characterizing research objects, RNF (21-12-00254) in terms of studying their electrical properties.

For citation: Kochura A. V., Rodionov V. V., Kochura E. P., Marenkin S. F., Aronzon B. A. 2024. Electrical Properties of Eutectic Composition InSb-MnSb. *Applied Mathematics & Physics*, 56(1): 60–65. (in Russian)
DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-1-60-65

1. Введение. Протяженные микро- и наноразмерные магнитные материалы в виде стержней с высоким аспектным соотношением могут найти применение в устройствах спиновой электроники [1, 2], а их внедрение в полупроводниковую матрицу может облегчить манипулирование спинами носителей заряда в двухфазных магнитных системах. Примером такой системы может служить направленно закристаллизованный эвтектический сплав InSb-MnSb. Он входит в состав группы эвтектических сплавов InSb-MeSb, где одним из компонентов является атом 3d-металла Me = Mn, Ni, Fe, Cr. Ранее в композитах InSb-MnSb было обнаружено гигантское положительное магнитосопротивление при температуре порядка комнатной [3]. Кроме того, они могут выступать в качестве поляризаторов инфракрасного излучения с эффективностью более 99 % [4]. Также предлагалось использовать InSb-MnSb в качестве элемента Пельтье для детекторов дальнего инфракрасного диапазона [5]. Следует отметить, что MnSb является ферромагнитным полуметаллом с температурой Кюри значительно выше комнатной $T_c = 585 - 598$ K [6, 7]. С учетом того, что MnSb имеет достаточно хорошую структурную совместимость с традиционными материалами электроники, ранее проводились исследования гибридных структур MnSb/полупроводник (Si, GaAs, GaSb, InP) [8, 9, 10, 11]. Например, было показано, что внедрение включений MnSb в полупроводниковую матрицу приводит к возникновению магнито-оптического эффекта, что свидетельствует о спиновой поляризации носителей заряда в немагнитной полупроводниковой матрице [12]. Вторым компонент системы InSb – узкозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 0,18 эВ ($T = 300$ K) с подвижностью электронов $\mu = 8 \text{ м}^2 \cdot (\text{В} \cdot \text{с})^{-1}$, что на порядок превышает значение для наиболее широко используемого в сверхбыстродействующих устройствах GaAs. Поэтому InSb является основным материалом ряда инфракрасных детекторов, систем теплового зрения и высокоскоростных электронных элементов [13]. Простое внедрение микро- и нановключений MnSb в матрицу InSb сопровождается резким снижением подвижности носителей заряда, поэтому представляет интерес исследование особенностей проводимости гибридной анизотропной системы, в которой включения MnSb представляют собой соориентированные монокристаллические иглы, внедренные в монокристалл InSb.

2. Материалы и методика эксперимента. Направленно закристаллизованные эвтектические сплавы InSb-MnSb выращивали методом Бриджмена – Стокбаргера. Исходными материалами служили монокристаллы InSb (чистота 99,999 %) и поликристаллы MnSb, синтезированные предварительно прямым сплавлением Sb (чистота 99,99 %) и дважды сублимированного Mn (чистота 99,999 %). Исходные материалы измельчали и загружали в ростовые ампулы. Содержание MnSb выдерживалось в 6,5 % мол., что соответствует эвтектической области на фазовой диаграмме системы InSb-MnSb [14]. Было установлено, что наиболее совершенные по структуре образцы с наименьшим количеством объемных дефектов синтезировались в ходе пятиэтапного процесса. Вначале ампулы нагревали до 803 K в «горячей» зоне, выдерживали при этой температуре 10 ч, затем температуру поднимали до 838 K. После выдержки при этой температуре в течение 5 ч включали вращательный механизм ампулы и медленно опускали ее до «холодной» зоны (593 K), чтобы температурный градиент был не менее 50 K/см. После полного перехода ампулы в «холодную» зону подогрев отключали и осуществляли охлаждение в естественном режиме до комнатной температуры. Дополнительно для выращивания эвтектических сплавов с однородным распределением ориентированных игл MnSb требовалось выполнение ряда условий: температура перегрева выставлялась выше температуры плавления не более чем на 3-5 K, скорость кристаллизации поддерживалась не более 1 см/сут и для ориентированного роста использовался затравочный кристалл InSb, помещенный на дно ампулы так, что его кристаллографическая плоскость (110) была ориентирована поперек направления роста эвтектического сплава.

Состав синтезированных кристаллов изучали методами атомно-сканирующей электронной (СЭМ) микроскопии и энергодисперсионного анализа. Для обнаружения возможных неосновных фаз был проведен анализ порошковых рентгеновских дифрактограмм. Дифрактограммы образцов из центральной части були имели только пики, принадлежащие InSb и MnSb, а также наблюдались слабые рефлексы InMn_3 и Mn_2Sb , когда образцы были взяты с края були. InMn_3 и Mn_2Sb являются магнитными соединениями – ферримагнетиками, у которых температуры Нееля равны 583 K [15] и 550 K [6], соответственно. Поэтому для исключения их влияния на электрические свойства эвтектической композиции образцы

для исследований вырезались только из центральной части були в параллельном (осевом) (образец №1) и перпендикулярном (поперечном) (образец №2) направлении наиболее длинных сторон к оси роста. Электрические и магнитотранспортные свойства исследовали в интервале от 1,6 до 320 К с использованием стандартной шестизондовой геометрии в постоянном (до 70 кГс) магнитном поле. Образцы имели высокую проводимость р-типа и линейные вольт-амперные характеристики в выбранном для измерений диапазоне.

3. Результаты и обсуждение. Исследование лауэграмм показало соориентацию кристаллических структур полупроводниковой матрицы InSb [110] и монокристаллических игольчатых включений MnSb [001] по отношению к направлению роста. По СЭМ изображениям хорошо видно, что игольчатые включения были распределены равномерно (рис. 1), причем их длинная сторона была ориентирована вдоль оси роста. Диаметр включений находился в диапазоне $d = 9-15$ мкм, а их длина l превышала 1 мм, поэтому аспектное соотношение $a = l/r > 100$.

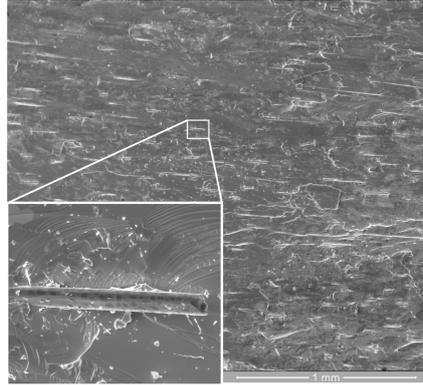


Рис. 1. СЭМ изображение поверхности скола слитка InSb-MnSb вдоль направления роста. Отдельное игольчатое включение MnSb показано на увеличенной части рисунка

Fig. 1. SEM image of the chipping surface of an InSb-MnSb ingot along the growth direction. A separate needle-like inclusion of MnSb is shown in the enlarged part of the figure

Для MnSb существует проблема нестехиометрии, возникающая из-за фазовой нестабильности всех соединений со структурой арсенида никеля, которую имеет и MnSb, что отражено на бинарной фазовой диаграмме системы Mn-Sb [6]. Так, в соединениях $Mn_{1+\delta}Sb$ избыток Mn занимает межузельные позиции, что вызывает уменьшение T_c и намагниченности насыщения с увеличением δ [16]. Энергодисперсионный анализ состава монокристаллических игольчатых включений показал, что они содержат 2 % мол. избытка Sb ($MnSb_{1.02}$). В отличие от Mn максимальный предел растворимости Sb в MnSb близок к стехиометрическому составу [17] и максимальное наблюдаемое ранее содержание Sb 52 ат. % в MnSb [18] близко к нашему значению. Также ранее было установлено, что избыточное содержание Sb в MnSb не приводит к снижению T_c [18], в отличие от избытка Mn. Признаков присутствия Mn в полупроводниковой матрице InSb с точностью 0,1 % ат. обнаружено не было.

На рис. 2 представлены результаты исследования температурной зависимости продольного удельного сопротивления $\rho(T)$ образцов эвтектического сплава InSb-MnSb в диапазоне 1,6 - 320 К и эффективных значений концентрации и подвижности основных носителей заряда.

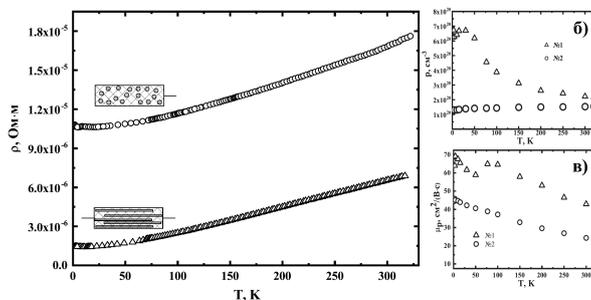


Рис. 2. Зависимости основных электрических параметров от температуры образцов InSb-MnSb с разными ориентациями игольчатых включений относительно протекающего тока: удельного сопротивления (а), эффективной концентрации основных носителей заряда – дырок (б) и их эффективной подвижности (в)

Fig. 2. The dependences of the main electrical parameters on the temperature of InSb-MnSb samples with different orientations of needle inclusions relative to the flowing current: resistivity (a), the effective concentration of the main charge carriers – holes (b) and their effective mobility (c)

Металлическое поведение преобладает при обеих ориентациях электрического тока относительно игольчатых включений (рис. 2а). Лишь при $T < 20$ К для образца №2 вид $\rho(T)$ приобретает полупроводниковый характер. Недавно было показано, что в подобных эвтектических композициях при низких температурах преобладает прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка в режиме Мотта [19]. Эффективная концентрация носителей заряда превышает 10^{20} см³, а ее измеренная величина отличается для различных ориентаций игольчатых включений (рис. 2б), что связано с существенным различием реальных концентраций дырок в узкозонном полупроводнике p^{InSb} (InSb, легированный марганцем) и ферромагнитном полуметалле p^{MnSb} (MnSb). Следует также указать, что при учете вклада в проводимость нужно учитывать наличие двух подзон в валентной зоне InSb – легких и тяжелых дырок. Однако, выполненные нами измерения проводимости и эффекта Холла недостаточны для разделения вкладов всех трех видов дырок и требуют дополнительно проведения исследований зависимостей магнитосопротивления от температуры и магнитных полей. Механизмы рассеяния носителей заряда во включениях и основной матрице различны, на что указывает вид зависимостей их эффективной подвижности от температуры (рис. 2в). Обращает на себя внимание достаточно высокое значение μ для двухфазной системы полупроводник/ферромагнетик (до 70 см²/(В·с)), что представляет интерес для исследования влияния ферромагнитных включений на спиновую поляризацию основных носителей заряда в полупроводниковой матрице.

Наличие температурных зависимостей $\rho(T)$ для различных ориентаций игольчатых включений в полупроводниковой матрице позволяет использовать теорию проводимости двухфазных систем, состоящих из цилиндрических, ориентированных в одном направлении стержней, игл или волокон, встроенных в непрерывную матрицу из другого материала. Согласно этой теории общая электропроводность таких систем при измерениях в соосном (σ_A) и поперечном (σ_T) направлениях электрического тока и игольчатых включений определяются системой уравнений [5]:

$$\sigma_A = V_1\sigma_1 + V_2\sigma_2 \tag{1}$$

$$\sigma_T = \sigma_2 + \frac{V_1}{\frac{1}{\sigma_1 - \sigma_2} + \frac{V_2}{2\sigma_2}}, \tag{2}$$

где V_1 – объемная доля включений, $V_2 = 1 - V_1$ – объемная доля матрицы, σ_1 и σ_2 – проводимости включений и матрицы, соответственно. Структурные исследования показали, что для наших образцов плотность распределения игл составляет 503 мм⁻². Это позволило рассчитать $V_1 = 0,057$. Подставив экспериментальные данные $\sigma(T) = 1 / \rho(T)$ (рис. 2) в уравнения (1) и (2), можно решить обратную задачу и найти отдельно температурную зависимость удельного сопротивления игольчатых включений MnSb $\rho_1(T)$ и полупроводниковой матрицы InSb $\rho_2(T)$ (рис. 3).

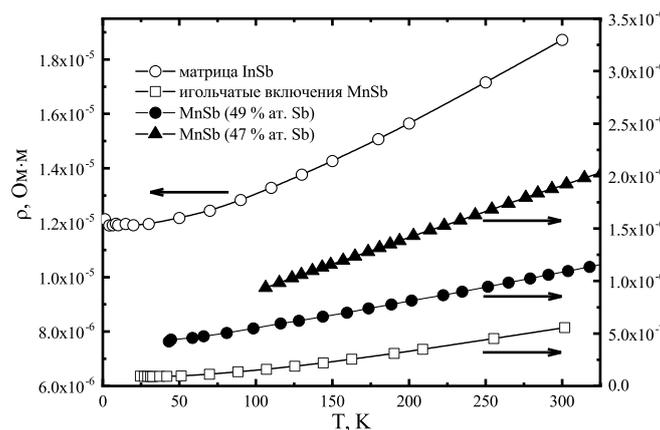


Рис. 3. Восстановленные из экспериментальных зависимостей удельного сопротивления образцов InSb-MnSb от температуры (Рис. 2а), согласно уравнениям (1) и (2), зависимости удельного сопротивления основной матрицы InSb и игольчатых включений MnSb. Показаны также данные по зависимостям $\rho(T)$ для кристаллов MnSb с содержанием Sb 47 и 49 % ат., взятые из работы [20]. Интерполяция вычисленных и экспериментальных данных выполнена с помощью β -сплайнов для наглядности

Fig. 3. Recovered from the experimental dependences of the resistivity of InSb-MnSb samples on temperature (Fig. 2a), according to equations (1) and (2), the dependences of the resistivity of the main InSb matrix and MnSb needle inclusions. The data on the dependences of $\rho(T)$ for MnSb crystals with Sb content of 47 and 49 % at. are also shown, taken from [20]. The interpolation of the calculated and experimental data was performed using β - splines for clarity

Как следует из рис. 3, удельное сопротивление матрицы InSb ρ_2 примерно в 40–100 раз превышает ρ_1 и близко к наблюдаемому в пленках InSb, легированных Mn, и объемных образцах с неориентированными микро- и нановключениями MnSb, выращиваемыми равновесными или околоравновесными методами [21, 22, 23]. Это косвенно свидетельствует о возможном легировании основной матрицы InSb атомами Mn и переходе ее из диамагнитного в парамагнитное состояние. Для сравнения температурных зависимостей удельного сопротивления MnSb на рис. 3 приведены экспериментальные кривые, полученные в [20] при изучении электропроводности образцов системы Mn-Sb с избытком Mn. Для игольчатых включений MnSb в образцах №1 и №2, с избыточным содержанием Sb, удельное сопротивление меньше, чем для MnSb, с избытком Mn из работы [20]. Это согласуется с тенденцией снижения ρ с увеличением содержания Sb в $Mn_{1+\delta}Sb$ [18]. Следует также отметить еще одну возможную причину пониженного сопротивления игольчатых микровключений MnSb в образцах №1 и №2. Согласно исследованиям рентгеновской дифракции, они являются монокристаллическими. В то время как синтез объемных монокристаллов MnSb существенно затруднен высокой вероятностью образования трещин при их выращивании из расплава, что способствует существенному увеличению концентрации основных носителей заряда и значительному снижению их подвижности [24]. Это указывает на перспективность использования методики синтеза эвтектической композиции в матрице для получения микро- и микрометровых монокристаллов MnSb со сниженным количеством структурных дефектов.

4. Заключение. Методом Бриджмена – Стокбаргера синтезированы направленно закристаллизованные монокристаллические эвтектические сплавы InSb-MnSb, обладающие высокой анизотропией электрических свойств. По экспериментальным зависимостям удельного сопротивления с использованием теории проводимости двухфазных систем восстановлены значения удельного сопротивления основной полупроводниковой матрицы InSb и игольчатых включений MnSb. Значение ρ для последних оказалось ниже, чем наблюдаемое ранее для кристаллов MnSb, что в совокупности с достаточно высокой подвижностью основных носителей заряда делает эти материалы перспективными для исследования спин-зависимых эффектов и использования их в устройствах спинтроники.

References

1. Sun L., et. al. Tuning the properties of magnetic nanowires. *IBM J. Res. & Dev.* 2005;49(1):79-102.
2. Yuste C., et. al. Review: from computational design to the synthesis of molecular magnetic wires for single-molecule spintronics and quantum computing nanotechnologies. *Journal of Coordination Chemistry*. 2022;75(17-19):2359-2383.
3. Umehara Y., Koda S. Structure and phase-boundary energies of the directionally solidified InSb-MnSb, InSb-NiSb, InSb-FeSb and InSb-CrSb eutectic alloys. *Metallography*. 1974;7(4):313-331.
4. Paul B., et. al. Die polarisierende Wirkung von zweiphasigem Indiumantimonid im Ultraroten. *Solid State Electronics*. 1964;7(12):835-841.
5. Hale KD. The physical properties of composite materials. *J. Mat. Sci.* 1976;11:2105-2141.
6. Marenkin SF., et. al. Manganese pnictides MnP, MnAs, and MnSb are ferromagnetic semimetals: Preparation, structure, and properties (a survey). *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2018;63(14):1753-1763.
7. Liang D., et. al. Tunable structural and magnetic properties of NiAs-type Mn_xSb (1.00 x 1.30) compounds. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;856(158184):1-5.
8. Burrows ChW, et. al. Hybrid heteroepitaxial growth mode. *Physica Status Solidi A*. 2018;216(1800600):1-6.
9. Hatfield SA., Bell GR. Growth by molecular beam epitaxy and interfacial reactivity of MnSb on InP(001). *J. Cryst. Growth*. 2006;296:165-173.
10. Oveshnikov LN., et. al. High-temperature magnetism and microstructure of a semiconducting ferromagnetic $(GaSb)_1 - x(MnSb)_x$ alloy. *Belstein Journal of Nanotechnology*. 2018;9:2457-2465.
11. Zhang H., et. al. Synthesis and magnetic properties of MnSb nanoparticles on Si-based substrates. *Applied Physics Letters*. 2007;90:202503 p.
12. Han GC., et. al. Magnetic and magneto-optical properties of MnSb films on various substrates. *J. Magn. Magn. Mat.* 1999;192(2):233-237.
13. Yavorskiy D., et. al. Indium antimonide detector for spectral characterization of terahertz sources. *Journal of Applied Physics*. 2018;123:064502 p.
14. Novotortsev VM., et. al. Synthesis and magnetic properties of the InSb-MnSb eutectic. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2011;56(12):1951-1956.
15. Shon Y., et. al. Ferromagnetic formation of two phases due to MnP and InMn3 from InMnP:Zn implanted with Mn. *Appl. Phys. Lett.* 2006;88:232511 p.
16. Reimers W, et. al. Magnetic phase diagram of the system $Mn_{1-x}Cr_xSb$. *J. Phys. C: Solid State Phys.* 1982;15:3597 p.
17. Chen T., et. al. Growth of MnSb single crystals by pulling with a seed from nonstoichiometric molten solution. *J. Cryst. Growth*. 1977;37:29-36.

18. Okita T, et. al. Crystal Magnetic Anisotropy and Magnetization of MnSb. *J. Phys. Soc. Jap.* 1968;25(1):120-124.
19. Kochura AV., et. al. The effect of high pressure on the electrical and transport properties of the InSb-MnSb magnetic eutectic composition. *AIP Advances*. 2022;12(035330):1-5.
20. Teramoto I., Van Run A. The existence region and the magnetic and electrical properties of MnSb. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1968;29(2):347-352.
21. Ganesan K., Bhat HL. Growth, magnetotransport, and magnetic properties of ferromagnetic (In, Mn) Sb crystals. *Journal of Applied Physics*. 2008;103(4):043701 p.
22. Ganesan K., et. al. Influence of magnetic clusters on electrical and magnetic properties of $\text{In}_1 - x\text{Mn}_x\text{Sb}/\text{GaAs}$ dilute magnetic semiconductor grown by liquid phase epitaxy. *Sol. St. Comm.* 2007;143(4-5):272-275.
23. Yakovleva EI., et. al. Anomalous Hall Effect in the $\text{In}_1 - x\text{Mn}_x\text{Sb}$ Dilute Magnetic Semiconductor with MnSb Inclusions. *JETP Letters*. 2015;101(2):130-135.
24. Oveshnikov LN., et. al. Magnetic and magnetotransport properties of MnSb polycrystals near equatomic composition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2022;563(169873):1-7.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 20.12.2023

Received December 20, 2023

Поступила после рецензирования 03.02.2024

Revised February 3, 2024

Принята к публикации 06.02.2024

Accepted February 6, 2024

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кочура Алексей Вячеславович – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Родионов Владимир Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Кочура Евгения Павловна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры программной инженерии, Юго-Западный государственный университет, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Маренкин Сергей Федорович – доктор химических наук, профессор, Институт Общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова РАН, Юго-Западный государственный университет, г. Москва, Россия

Аронзон Борис Аронович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики твердотельных структур для космических приложений, Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Kochura – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head, Regional Centre of Nanotechnology, SouthWest State University, Kursk, Russia

Vladimir V. Rodionov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Regional Centre of Nanotechnology, SouthWest State University, Kursk, Russia

Evgenia P. Kochura – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Software Engineering, SouthWest State University, Kursk, Russia

Sergey F. Marenkin – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Chief Researcher, N. S. Kurnakov Institute of General and Nonorganic Chemistry of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia

Boris A. Aronzon – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia