

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ PHYSICS. MATHEMATICAL MODELING

УДК 539.21
MSC 74N05; 82D25 ; 82D37
Оригинальное исследование

DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-4-314-319

Влияние ориентации монокристаллических игл NiSb на электропроводность монокристаллов композита $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$

Захвалинский В. С.¹, Борисенко А. В.¹, Маширов А. В.², Кочура А. В.³, Пилюк Е. А.¹,
Соболев В. В.⁴

(Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым)

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
zakhvalinskii@bsuedu.ru, 1491654@bsuedu.ru, pilyuk@bsuedu.ru

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук,
Россия, 125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7
a.v.mashirov@mail.ru

³ Юго-Западный государственный университет,
Россия, 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94
akochura@mail.ru

⁴ Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,
Россия, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7
soboleff.val@yandex.ru

Аннотация. Целью работы является проведение исследования электропроводности композитных монокристаллов $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Модифицированным методом Бриджмена были получены монокристаллы композита эвтектической системы $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Используя сканирующий электронный микроскоп JSM-6610LV (Jeol), был определен состав и однородности распределения элементов методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Определены интервалы прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа Эфроса – Шкловского (60 К – 126.1 К) и прыжковой проводимости по ближайшим соседям (88 К – 115 К) у образцов с разной ориентацией игольчатых включений NiSb.

Ключевые слова: InSb-NiSb, монокристалл, прыжковая проводимость, электрические свойства

Для цитирования: Захвалинский В. С., Борисенко А. В., Маширов А. В., Кочура А. В., Пилюк Е. А., Соболев В. В. 2024. Влияние ориентации монокристаллических игл NiSb на электропроводность монокристаллов композита $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. *Прикладная математика & Физика*, 56(4): 314–319. DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-4-314-319

Original Research

The Effect of the Orientation of NiSb Single Crystal Needles on the Electrical Conductivity of Composite Single Crystals $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$

Vasily S. Zakhvalinskii¹, Alexander V. Borisenko¹, Alexey V. Mashirov², Alexey V. Kochura³,
Evgeniy A. Pilyuk³, Valentin V. Sobolev³

(Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov)

¹ Belgorod National Research University,
85 Pobedy St., Belgorod 308015, Russia
zakhvalinskii@bsuedu.ru, 1491654@bsuedu.ru, pilyuk@bsuedu.ru

² V. A. Kotelnikov IRE of the Russian Academy of Sciences,
11/7 Makhovaya St., Moscow 125009, Russia
a.v.mashirov@mail.ru

³ Southwestern State University,
94 50 years of October St., Kursk 305040, Russia
akochura@mail.ru

⁴ Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov,
7 Studencheskaya St., Izhevsk 426069, Россия
soboleff.val@yandex.ru

Abstract. The aim of the work is to study the electrical conductivity of composite single crystals $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Single crystals of the composite eutectic system $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$ were obtained using the modified Bridgman method.

The composition and distribution homogeneity of elements were determined by the energy-dispersive X-ray spectroscopy method using a JSM-6610LV (Jeol) scanning electron microscope. The intervals of hopping conductivity with a variable jump length of the Shklovsky-Efros type and by the nearest neighbors were determined for samples with different orientations of needle-shaped inclusions of NiSb single crystals.

Keywords: InSb-NiSb, Single Crystal, Electrical Properties, Hopping Conductivity

For citation: Zakhvalinskii V. S., Borisenko A. V., Mashirov A. V., Kochura A. V., Pilyuk E. A., Sobolev V. V. 2024. The Effect of the Orientation of NiSb Single Crystal Needles on the Electrical Conductivity of Composite Single Crystals $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. *Applied Mathematics & Physics*, 56(4): 314–319. (in Russian) DOI 10.52575/2687-0959-2024-56-4-314-319

1. Введение. Исследование свойств полупроводниковых соединений, относящихся к классу $A^{III}B^V$ [1, 2], важно с точки зрения создания новых электронных и оптоэлектронных устройств. InSb представляет собой полупроводник с узкой запрещенной зоной и малой эффективной массой электронов, который обладает высоким потенциалом для применения в инфракрасной оптике, благодаря самой высокой подвижности носителей среди полупроводников $A^{III}B^V$ [3, 4, 5]. Эти отличительные свойства делают InSb особенно интересным для высокоскоростной электроники [6, 7] и в спинтронике [8, 9].

Целью работы является проведение исследования электропроводности композитных монокристаллов $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Для достижения поставленной цели были получены монокристаллы $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$ модифицированным методом Бриджмена, представляющие собой матрицу InSb, в которую введены строго ориентированные монокристаллические иглы NiSb [10]. Иглы NiSb расположены параллельно друг другу, равномерно распределены во всем объеме матрицы и ориентированы вертикально (рис. 1, а) и горизонтально (рис. 1, б) относительно большой поверхности образца.

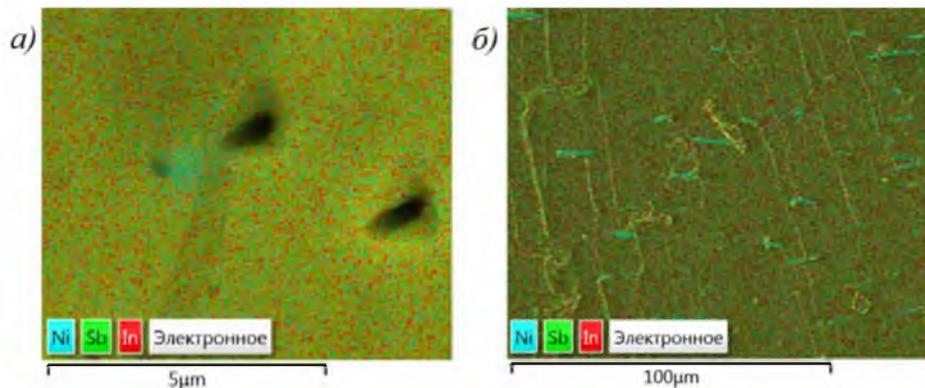


Рис. 1. а – поверхность образца № 1 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$; б – поверхность образца № 2 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$
Fig. 1. а – surface of sample No.1 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$; б – surface of sample No.2 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$

Исходные материалы измельчали и загружали в ростовые ампулы. Содержание InSb выдерживалось в 6.5 % моль, что соответствует эвтектической области на фазовой диаграмме системы InSb-NiSb.

2. Материалы и методика эксперимента. Использование установки GBC EMMA с излучением $\text{CuK}\alpha$ ($\alpha = 1.5401 \text{ \AA}$) позволило изучить дифракцию рентгеновского излучения при отражении от кристалла $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Были получены дифракционные картины от плоскостей семейства (110) для иголок NiSb (гексагональная структура типа арсенида никеля P63/mmc (п.г. 194)) и InSb (структура цинковой обманки F43m (п.г. 216)). Параметр кристаллической решетки InSb оказался равными $a = 6.469(1) \text{ \AA}$, в свою очередь, параметры решетки игл NiSb ($a = 3.94(1) \text{ \AA}$, $c = 5.14(1) \text{ \AA}$) схожи с табличными значениями: $a = 3.9360(1) \text{ \AA}$, $c = 5.1382(1) \text{ \AA}$.

Были подготовлены два образца: образец № 1 с перпендикулярной ориентацией иголок NiSb относительно большей поверхности параллелепипеда и направления протекающего тока (рис. 2, а) и образец № 2 с параллельной ориентацией иголок NiSb относительно большей поверхности параллелепипеда и направления протекающего тока (рис. 2, б) согласно исследованиям на электронном микроскопе.

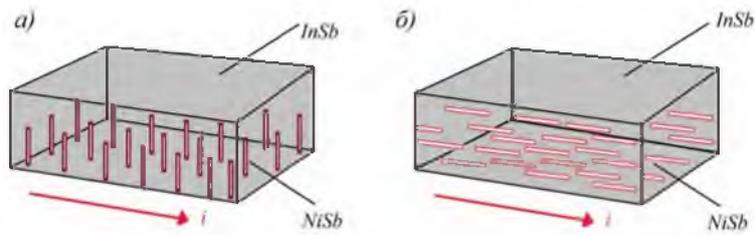


Рис. 2. Схематичная иллюстрация полупроводниковой матрицы InSb с равномерно распределенными иголками NiSb
 Fig. 2. Schematic illustration of InSb semiconductor matrix with uniformly distributed NiSb needles

Состав образцов и их однородность контролировались с помощью порошковой рентгеновской дифрактометрии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). После ориентации в электронном микроскопе были подготовлены образец № 1, имеющий форму параллелепипеда со сторонами $3.7 \times 1.9 \times 0.4$ мм, и образец № 2 со сторонами $3.34 \times 1.52 \times 0.54$ мм. Для изучения распределения химических элементов, используя сканирующий электронный микроскоп JSM-6610LV (Jeol), был получен спектр EDX исследуемого материала (рис. 3.)

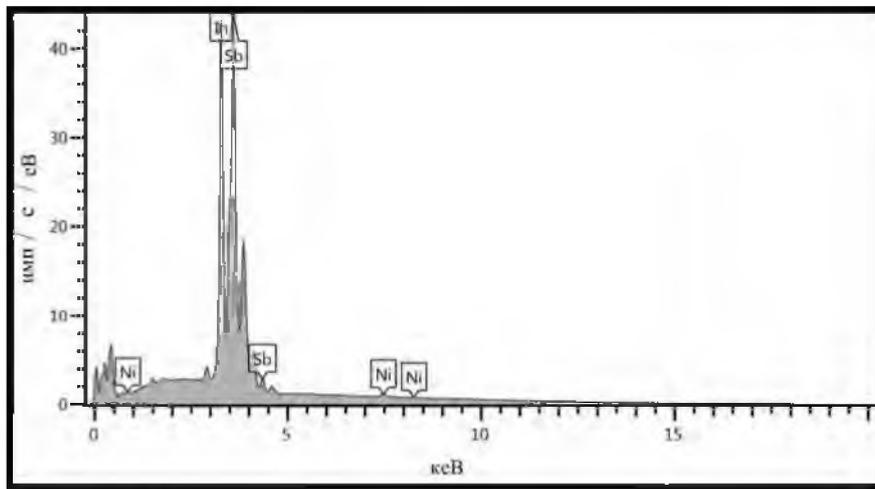


Рис. 3. Спектр EDX с поверхности образца №1 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$
 Fig. 3. EDX spectrum from the surface of sample No. 1 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$

3. Результаты и обсуждение. Проведены измерения электрических свойств удельного сопротивления в интервале температур от 320 К до температур 1.5 К. Поведение удельного сопротивления образцов № 1 (рис. 4, вставка) и № 2 (рис. 5, вставка) имеет схожий вид, однако значения ρ для разных направлений игольчатых включений NiSb отличны: так, при температуре 2 К для образца №1 $\rho = 0.02 \cdot \text{см}$; для образца №2 $\rho = 0.037 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Переход в сверхпроводящую фазу в области гелиевых температур, аналогичный наблюдавшемуся в композитном монокристалле системы CdSb-NiSb в [11], не обнаружен. Максимальное значение удельное сопротивление принимает при 22 К: для образца №1 $\rho = 0.021 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, для образца №2 $\rho = 0.043 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Для определения наличия механизмов прыжковой проводимости в образцах был использован универсальный закон [12], характеризующий сопоставление механизмов прыжковой проводимости и температурной зависимости удельного сопротивления (1):

$$\rho(T) = DT^m(T_0/T)^p, \quad (1)$$

где T_0 – это характеристическая температура, p и m параметры, которые зависят от типа прыжковой проводимости, параметр D – это постоянная величина.

Для нахождения интервалов прыжковой проводимости необходимо переписать уравнение (1) в виде:

$$\ln\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T} + m\right) = \ln \rho + p \cdot \ln T_0 + p \cdot \ln \frac{1}{T}, \quad (2)$$

где E_A – это локальная энергия активации.

Для образца № 1, если в уравнении (2) задать значение подгоночному параметру $m = 1/2$, угол наклона линейной зависимости p примет значение также $1/2$, что указывает на возможное наличие прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа Эфроса – Шкловского (ЭШ) [13]. По

графику, приведенному на рис. 4, рассматриваемый линейный участок начинается при $T = 60$ К и заканчивается при $T_0 = 126.1$ К. Такая высокая температура начала прыжковой проводимости нетипична для полупроводников с мелкими примесными состояниями, например, такими как германий и др. [14]. Напротив, в твердых растворах индия примесные состояния сильно локализованы, поэтому прыжковая проводимость наблюдается при значительно более высоких температурах [15]. Из экспериментальной кривой, представленной на рис. 4, следует, что участок температурной зависимости с прыжковой проводимостью при понижении температуры обрывается и сопротивление образцов опять начинает уменьшаться.

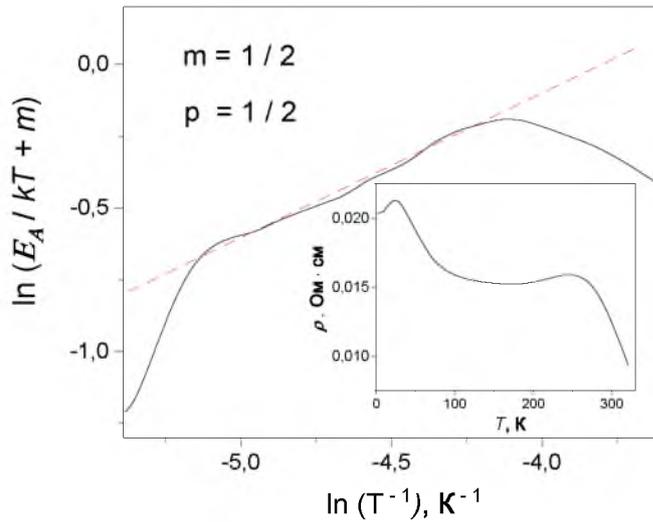


Рис. 4. Зависимость $\ln(E_A / k_B \cdot T + m)$ от $\ln(1/T)$ образца № 1 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Вставка: зависимость $\rho(T)$ образца № 1

Fig. 4. Dependency $\ln(E_A / k_B \cdot T + m)$ от $\ln(1/T)$ of sample No. 1 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Insert: dependency $\rho(T)$ of sample No. 1

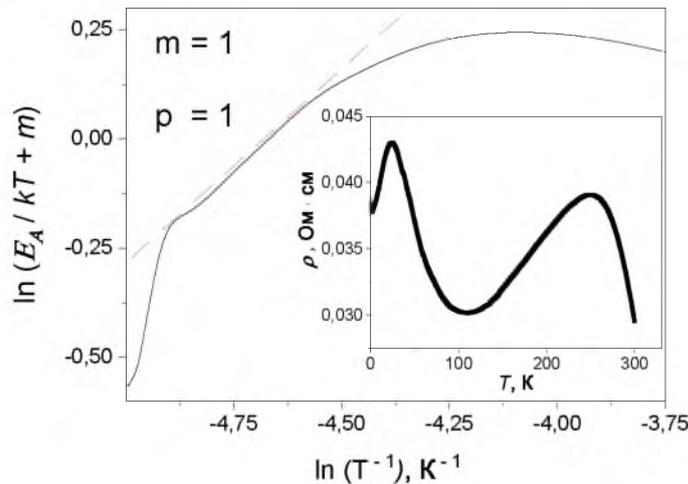


Рис. 5. Зависимость $\ln(E_A / k_B \cdot T + m)$ от $\ln(1/T)$ образца № 2 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Вставка: зависимость $\rho(T)$ образца № 2

Fig. 5. Dependency $\ln(E_A / k_B \cdot T + m)$ от $\ln(1/T)$ of sample No. 2 $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Insert: dependency $\rho(T)$ of sample No. 2

Такое поведение $\rho(T)$ представлено в ряде работ, посвященных композитам с игольчатыми включениями магнитных монокристаллов, где наблюдалось резкое падение сопротивления в области низких температур после участка прыжковой проводимости. Например, в работе, посвященной исследованию композитного монокристалла CdSb-NiSb [11], наблюдалось резкое снижение удельного сопротивления при низких температурах после участка с прыжковой проводимостью, с дальнейшим переходом в сверхпроводящее состояние.

Для образца №2, принимаем значение параметра $m = 1$, параметр $p = 1$ (рис. 5), что указывает на наличие прыжковой проводимости по ближайшим соседям [13]. Тогда интервал прыжковой проводимости начинается с $T = 88$ К, а заканчивается при $T_b = 115$ К. Локальная энергия активации механизма прыжковой проводимости по ближайшим соседям E_N равна 9.3 мэВ.

4. Заключение. Таким образом, исследованы композитные монокристаллические образцы эвтектического состава игольчатого типа $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$ с перпендикулярной и параллельной ориентацией протекающему току монокристаллических игольчатых включений NiSb. Проведено исследование характеристик удельного сопротивления в диапазоне температур от 300 К до 1.5 К. В образце № 1 наблюдалась прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка типа Эфроса – Шкловского. Определен интервал прыжковой проводимости: 60 К – 126.1 К. Для образца № 2 обнаружен участок прыжковой проводимости по ближайшим соседям, определен температурный диапазон прыжковой проводимости 88 К – 115 К. Локальная энергия активации проводимости прыжков по ближайшим соседям E_N равна 9.3 мэВ.

References

1. Razeghi M. Overview of antimonide based III-V semiconductor epitaxial layers and their applications at the center for quantum devices. *The European Physical Journal-Applied Physics*. 2003;23(3):149-205. DOI:10.1051/epjap:2003056
2. Weiss H. Structure and Application of Galvanomagnetic Devices: International Series of Monographs on Semiconductors. New York; 2014. 362 p.
3. Su M, Li J, He K, Fu K. NiSb/nitrogen-doped carbon derived from Ni-based framework as advanced anode for lithium-ion batteries. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023;629(48):83-91.
4. Zhao J, Li N, Cheng Y. All-dielectric InSb metasurface for broadband and high-efficient thermal tunable terahertz reflective linear-polarization conversion. *Optics Communications*. 2023;536:129372.
5. Luo F, Wang J, Zhu C, He X, Zhang S, Wang J, Liu H, Sun Z. 18-Electron half-Heusler compound $\text{Ti}_{0.75}\text{NiSb}$ with intrinsic Ti vacancies as a promising thermoelectric material. *Journal of Materials Chemistry A*. 2022;10(17):9655-9669. DOI: 10.1039/d2ta00461e
6. Zheng XM, You JH, Fan JJ, Tu GP, Rong WQ, Li WJ, Wang YX, Tao S, Zhang PY, Zhang SY, Shen SY, Li JT, Huang L, Su S. Electrodeposited binder-free Sb/NiSb anode of sodium-ion batteries with excellent cycle stability and rate capability and new insights into its reaction mechanism by operando XRD analysis. *Nano Energy*. 2020;77(5):105123. DOI:10.1016/j.nanoen.2020.105123
7. Friedrich J, Muller G. Erlangen - An Important Center of Crystal Growth and Epitaxy: Major Scientific Results and Technological Solutions of the Last Four Decades. *Crystal Research and Technology*. 2020;55(2): 1900053. DOI:10.1002/crat.201900053
8. Pendharkar M, Zhang B, Wu H, Zarassi A, Zhang P, Dempsey C, Lee J, Harrington S, Badawy G, Gazibegovic S, Veld R, Rossi M, Jung J, Chen A, Verheijen M, Hocoavar M, Bakkers E, Palmstrom CJ, Frolov SM. Parity-preserving and magnetic field-resilient superconductivity in InSb nanowires with Sn shells. *Science*. 2021;372(6541):508-511. DOI:10.1126/science.aba5211
9. Jesenovec J, Zawilski KT, Alison P, Meschter S, Saha SK, Sepelak AJ, Schunemann PG. Controlling Morphology of NiSb Needles in InSb through Low Temperature Gradient Horizontal Gradient Freeze. *Journal of Crystal Growth*. 2023;626:127440. DOI:10.1016/j.jcrysgro.2023.127440
10. Mamedov IKh, Arasly D, Khalilova A, Rahimov RN. Anisotropic electrical properties of a eutectic InSb + MnSb composite. *Inorganic Materials*. 2016;52(4):423-428. DOI:10.1134/S0020168516040105
11. Ivanov O, Zakhvalinskii V, Pilyuk E, Kochura A, Kuzmenko A, Ril A. Resistivity superconducting transition in single-crystalline $\text{Cd}_{0.95}\text{Ni}_{0.05}\text{Sb}$ system consisting of non-superconducting CdSb and NiSb phases. *Chinese Journal of Physics*. 2021;72(2):223-228. DOI:10.1016/j.cjph.2021.05.004
12. Zakhvalinskii VS, Borisenko AV, Nikulicheva TB, Kochura AV, Htet AZ, Pilyuk EA. Properties of solid solution $(\text{Cd}_{0.69}\text{Zn}_{0.31})_3\text{As}_2$. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*. 2022;15(3.1): 22. DOI 10.18721/JPM.153.103
13. Laiho R, Lashkul AV, Lisunov KG, Lahderanta E, Shakhov MA, Zakhvalinskii VS. Hopping conductivity of ni-doped p-CdSb. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008;20(29):295204-295214. DOI:10.1088/0953-8984/20/29/295204
14. Tran TT, Wong-Leung J, Smillie LA, Hallen A. High hole mobility and non-localized states in amorphous germanium. *APL Materials*. 2023;11(4):041115. DOI:10.1063/5.0146424
15. Ravich YuI, Nemov SA. Hopping conduction via strongly localized impurity states of indium in PbTe and its solid solutions. *Semiconductors*. 2002;36(1):3-23.

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 10.09.2024

Received September 10, 2024

Поступила после рецензирования 24.10.2024

Revised October 24, 2024

Принята к публикации 07.11.2024

Accepted November 7, 2024

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Захвалинский Василий Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Борисенко Александр Васильевич – аспирант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Маширов Алексей Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитных явлений, Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

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

Пиллюк Евгений Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории перспективных материалов и технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Соболев Валентин Валентинович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasiliy S. Zakhvalinskii – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Alexander V. Borisenko – Graduate Student, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Alexey V. Mashirov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Magnetic Phenomena, V. A. Kotelnikov IRE of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Alexey V. Kochura – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Deputy Director of the Regional Center for Nanotechnology, Southwestern State University, Kursk, Russia

Evgeniy A. Pilyuk – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Advanced Materials and Technologies, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Valentin V. Sobolev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Physics, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov, Izhevsk, Russia

[К содержанию](#)