

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ PHYSICS. MATHEMATICAL MODELING

УДК 539.23

MSC 74N05, 82D25, 82D37

Оригинальное исследование

DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-4-354-360

Прыжковая проводимость в монокристаллах эвтектического композита (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8}

Борисенко А. В. 

(Статья представлена членом редакционной коллегии С. В. Блажевичем)

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
1491654@bsu.edu.ru

Аннотация. Получен эвтектический композитный материал (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8}, состоящий из монокристаллической матрицы полупроводника InSb и ориентированных игл NiSb. Методом рентгеновской дифракции установлено, что матрица полупроводника InSb имела структуру цинковой обманки $F\bar{4}3m$ с параметром кристаллической решетки равным $a = 6.49(1) \text{ \AA}$. Иглы NiSb имели гексагональную структуру типа арсенида никеля $P63/mmc$, параметры элементарной ячейки игл NiSb составили $a = 3.94(1) \text{ \AA}$, $c = 5.14(1) \text{ \AA}$. Проведено исследование электропроводности эвтектического композитного материала (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8}. Определены механизмы электропроводности монокристаллического композитного образца. В отсутствии магнитного поля установлен диапазон реализации механизма прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа Шкловского – Эфроса. Рассчитана температура начала прыжковой проводимости, которая составила $T_v = 126.1 \text{ K}$. Вычислены микроскопические параметры образца (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8} при ориентации игл NiSb параллельно направлению магнитного поля и перпендикулярно направлению тока через образец: ширина мягкой параболической щели $\Delta = 6.3 \text{ мэВ}$, диэлектрическая проницаемость $\kappa = 11$, плотность локализованных состояний $g_0 = 1.66 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ мэВ}^{-1}$ и радиус локализации носителей заряда $a = 245.8 \text{ \AA}$.

Ключевые слова: антимонид индия, антимонид никеля, эвтектический композит, эффект Холла, прыжковая проводимость

Для цитирования: Борисенко А. В. 2023. Прыжковая проводимость в монокристаллах эвтектического композита (InSb)_{98,2}–(NiSb)_{1,8}. Прикладная математика & Физика, 55(4): 354–360. DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-4-354-360

Original Research

Hopping Conductivity in Single Crystals of Eutectic Composite (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8}

Alexander V. Borisenko 

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

Belgorod National Research University,
85 Pobedy st., Belgorod, 308015, Russia
1491654@bsu.edu.ru

Abstract. The eutectic composite material (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8} was obtained. The material consists of a single crystal InSb semiconductor matrix and oriented NiSb needles. By X-ray diffraction, it was found that the InSb semiconductor matrix had a zinc blende structure $F\bar{4}3m$ with a crystal lattice parameter equal to $a = 6.49(1) \text{ \AA}$. The NiSb needles had a hexagonal structure of the nickel arsenide type $P63/mmc$, the unit cell parameters of the NiSb needles were $a = 3.94(1) \text{ \AA}$, $c = 5.14(1) \text{ \AA}$. The electrical conductivity of eutectic composite material (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8} was measured. The mechanisms of electrical conductivity were determined for a single-crystal composite sample. The region of realization of the variable range hopping mechanism of Shklovsky-Efros was established in the absence of a magnetic field. The temperature of the beginning of the hopping conductivity was calculated $T_v = 126.1 \text{ K}$. Microscopic parameters were calculated for the sample (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8} when the NiSb needles were oriented parallel to the direction of the magnetic field and perpendicular to the direction of the current through the sample. Was determined the width of the Coulomb gap $\Delta = 6.3 \text{ meV}$, the dielectric permittivity $\kappa = 11$, the density of the localized states $g_0 = 1.66 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ meV}^{-1}$ and the localization radius $a = 245.8 \text{ \AA}$.

Keywords: Indium Antimonide, Nickel Antimonide, Eutectic Composite, Hall Effect, Hopping Conductivity

For citation: Borisenko A. V. 2023. Hopping Conductivity in Single Crystals of Eutectic Composite (InSb)_{98,2} – (NiSb)_{1,8}. Applied Mathematics & Physics, 55(4): 354–360. (in Russian) DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-4-354-360

1. Введение. Антимонид индия (InSb) является одним из наиболее широко применяемых бинарных полупроводников [1, 2, 3]. Его получают путем сплавления высокочистых индия и сурьмы с последующей очисткой методом зонной плавки и получением монокристаллов выращиванием из расплава. При добавлении антимонида никеля (NiSb) к InSb в матрице InSb образуются иглы NiSb согласно квазибинарной эвтектической фазовой диаграмме [4, 5]. Эти игольчатые элементы равномерно распределены и ориентированны в полупроводниковой матрице согласно исследованиям на электронном микроскопе. Однонаправленное положение этих игл придает сплаву InSb-NiSb анизотропные электрические свойства [6]. Сочетание полупроводниковых и металлических характеристик в одном материале создает предпосылки к применению данного состава в микроэлектронике, датчиках Холла и датчиках инфракрасного излучения, в фотодетекторах высокой чувствительности и других гальваномагнитных устройствах [7, 8, 9, 10]. Возникающее взаимодействие между спиновой подсистемой электронов проводимости и магнитными моментами никеля предопределяет появление отрицательного магнитосопротивления. Система игольчатого типа InSb-NiSb относится к классу полупроводник-металл. Высокая подвижность электронов в эвтектическом составе говорит о значительном влиянии матрицы композита – чистого InSb.

2. Материалы и методика эксперимента. Монокристалл эвтектического композитного материала $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$ был синтезирован из In, Sb и Ni в графитизированной кварцевой ампуле при температуре $T = 1000^\circ\text{C}$. Монокристалл выращен модифицированным методом Бриджмена, медленным охлаждением в градиенте печи. Хорошо известно, что эвтектическая система с низкой объемной долей второй фазы обычно образует волокнистую или стержнеобразную структуру при любой скорости роста [11].

Дифракция рентгеновского излучения от кристалла InSb-NiSb исследовалась на установке GBC ЕММА с излучением $\text{CuK}\alpha$ ($\alpha = 1.5401 \text{ \AA}$). На полученных картинах четко наблюдались дифракции от плоскостей семейства (110), как для InSb – структура цинковой обманки $F\bar{4}3m$ (п.г. 216) [12], так и для игл NiSb – гексагональная структура типа арсенида никеля $P63/mmc$ (п.г. 194). Наблюдаются также слабые отражения от других семейств плоскостей, что свидетельствует о присутствии небольшого числа разориентированных блоков. Параметр кристаллической решетки InSb оказался равным $a = 6.49(1) \text{ \AA}$, что хорошо согласовывается со значением для монокристалла из порошковой базы данных PDF-2 ($a = 6.469(1) \text{ \AA}$), а параметры решетки игл NiSb ($a = 3.94(1) \text{ \AA}$, $c = 5.14(1) \text{ \AA}$) оказались близки к табличным значениям $a = 3.9360(1) \text{ \AA}$, $c = 5.1382(1) \text{ \AA}$.

После ориентации в электронном микроскопе был вырезан образец с расположением иголок NiSb относительно большей поверхности параллелепипеда, параллельно магнитному полю и перпендикулярно току через образец (смотри рисунок 1). Исследуемый образец был подготовлен в форме параллелепипеда со сторонами $3.7 \times 1.9 \times 0.4 \text{ мм}$. Измерения электрических свойств проводились по пятизондовой схеме на установке, в состав которой входят следующие блоки: криостат со сверхпроводящим соленоидом CFSG-510-2K-SCM10T-VTI29 и установленным криокулером, работающим по замкнутому циклу Гиффорда-МакМагона; гелиевый компрессор и блок терморегуляции, обеспечивающий возможность изменения и поддержания заданной температуры шахты криостата. Ориентация однонаправленных игл направлена перпендикулярно протекающему току.

3. Результаты и обсуждение. Параллельно расположенные относительно друг друга волокна никеля оказывают существенное влияние на электрические свойства постоянного тока в эвтектическом сплаве InSb-NiSb (рис. 1).

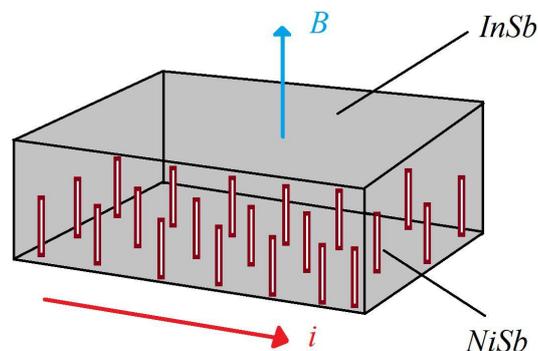


Рис. 1. Схематическая иллюстрация полупроводниковой матрицы InSb с равномерно распределенными иголками NiSb
Fig. 1. Schematic illustration of InSb semiconductor matrix with uniformly distributed NiSb needles

Для анализа гальваномагнитных свойств были проведены измерения удельного сопротивления в отсутствие магнитного поля в диапазоне температур – от 320 К до температур жидкого гелия 1.5 К.

На графике температурной зависимости логарифма удельного сопротивления $\ln \rho$ от T (рис. 2) можно выделить участки температурного диапазона (от 320 – 250 К; от 180 – 25 К), на которых поведение удельного сопротивления принимает полупроводниковый характер зависимости и участки (от 250 – 180 К; от 25 – 1.5 К), где преобладает металлический характер поведения удельного сопротивления. При температурах близких к абсолютному нулю удельное сопротивление резко падает, однако сверхпроводящей фазы с нулевым сопротивлением, которая отмечена в [13], не наблюдается. Для анализа проводимости на других участках рассматриваемого температурного диапазона необходимо построить график зависимости $\ln \rho$ от T^{-1} , представленный на рис. 2 (вставка).

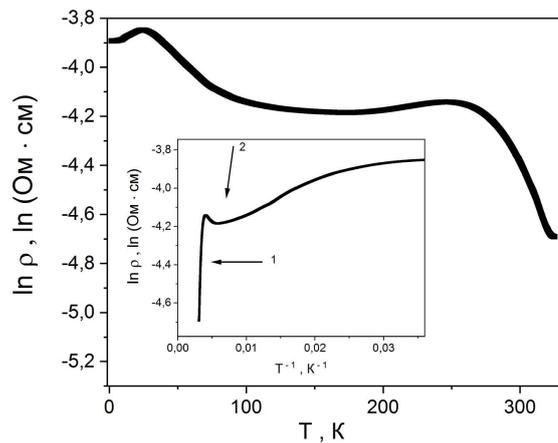


Рис. 2. Температурная зависимость логарифма удельного сопротивления ρ образца InSb-NiSb (направление тока перпендикулярно по отношению к направлению игл). Вставка: зависимость $\ln \rho$ от T^{-1}

Fig. 2. The temperature dependence of the resistivity ρ of InSb-NiSb (the direction of the current is perpendicular to the direction of the needles). Insert: dependency $\ln \rho$ от T^{-1}

Изучив зависимость логарифма удельного сопротивления от обратной температуры, представленной на вставке к рисунку 2, можно выделить несколько температурных диапазонов с разными типами проводимости. Участок 1 (от 320 до 250 К) соответствует собственной проводимости. Затем начинается участок номер 2, характеризующийся примесной проводимостью: убывание удельного сопротивления с понижением температуры может быть связано с истощением примеси и уменьшением рассеяния на фононах. При дальнейшем понижении температуры удельное сопротивление растет, а изменение наклона линейного участка зависимости $\ln \rho$ от T^{-1} может говорить о наличии прыжковой проводимости.

Полученные температурные зависимости удельного сопротивления могут быть сопоставлены с общим выражением для определения механизма прыжковой проводимости следующим экспоненциальным универсальным законом: $\rho(T) = DT^m e^{(T_0/T)^p}$, в котором параметр D – это постоянный коэффициент, T_0 определяется как характеристическая температура, p и m – параметры, определяющие тип прыжковой проводимости [14]. В случае прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа Мотта $T_0 = T_M = \beta_M / k_B \cdot g_0 \cdot a^3$ параметр p принимает значение равное 1/4. В свою очередь, теория Шкловского – Эфроса (ШЭ) говорит о следующей зависимости удельного сопротивления от температуры для всех измерений $T_0 = T_{SE} = \beta_{SE} \cdot e^2 / k_B \cdot \kappa \cdot a$, при $p = 1/2$. Здесь $\beta_M = 2.1$ и $\beta_{SE} = 2.8$ – численные коэффициенты, g_0 – плотность локализованных состояний, a – радиус локализации. Локальная энергия активации E_A может быть представлена в виде: $E_A = d \ln \rho / d (k_B T)^{-1}$. Для вычисления значения параметров m и p необходимо записать уравнение универсального закона удельного сопротивления в виде:

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

Задав значение подгоночному параметру m в формуле (1), можно наблюдать как левая часть уравнения становится линейно зависима от функции $\ln(1/T)$, а значение параметра p характеризуется углом наклона этой зависимости (рис. 3).

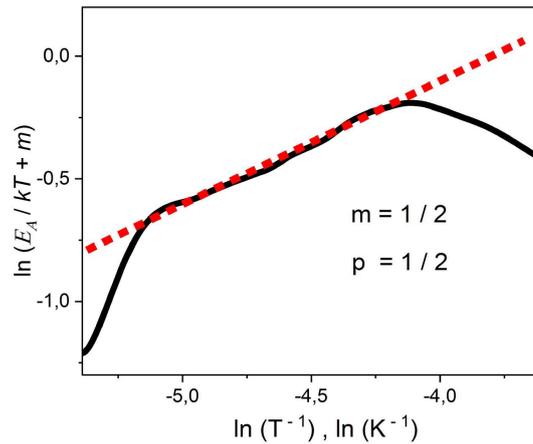


Рис. 3. Зависимость $\ln(E_A / k_B \cdot T + m)$ от $\ln(1/T)$ образца $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$
 Fig. 3. Plots of $\ln(E_A / k_B \cdot T + m)$ versus $\ln(1/T)$ of $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$

Принимая значение параметра $m = 1/2$ в рассматриваемом уравнении, угол наклона линейной зависимости, т. е. параметр p , также равен $1/2$, что может свидетельствовать о наличии прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа Шкловского – Эфроса. По графику, приведенному на рис. 3, рассматриваемый линейный участок начинается при $T_v = 126.1$ К (T_v – температура начала прыжковой проводимости со стороны высоких температур) и заканчивается при $T = 60$ К. Такая высокая температура начала прыжковой проводимости нетипична для полупроводников с мелкими примесными состояниями, таких как германий и др. [15]. Напротив, в твердых растворах индия примесные состояния сильно локализованы, поэтому прыжковая проводимость наблюдается при значительно более высоких температурах [16]. Построив зависимость $\ln(\rho / T^{1/2})$ от $T^{-1/2}$, можно увидеть линейный участок (рис. 4), что подтверждает предположение о механизме проводимости.

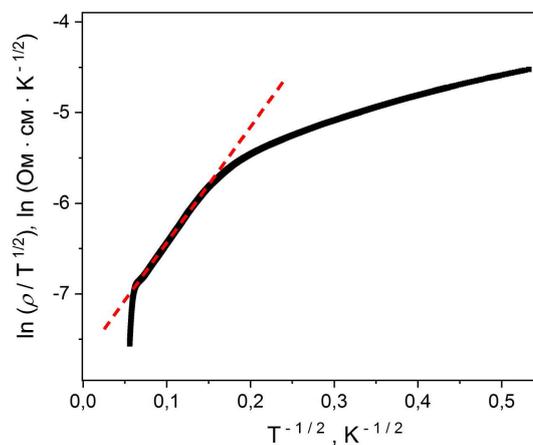


Рис. 4. Зависимость $\ln(\rho / T^{1/2})$ от $T^{-1/2}$ твердого состава $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$
 Fig. 4. Plots of $\ln(\rho / T^{1/2})$ versus $T^{-1/2}$ of $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$

Параметры D и T_0 определяются из графика на рис. 4 как коэффициенты в уравнении прямой, где угол наклона равен $T_0^{1/2}$, а $\ln D$ – точка пересечения этой прямой с осью ординат; тогда коэффициент $D = 4.24 \cdot 10^{-4}$ Ом · см · К^{-1/2}, а характеристическая температура составляет $T_0 = 174$ К.

Для режима прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа Шкловского – Эфроса ширина мягкой параболической щели определяется из выражения $\Delta = 0.5 \cdot k_B \cdot (T_v \cdot T_0)^{-1/2} = 6.3$ мэВ. Ширина мягкой параболической щели Δ соответствует энергии кулоновского отталкивания между дырками $U = e^2 / \kappa R_h$, где κ – диэлектрическая проницаемость, а R_h – среднее расстояние между дырками. При температуре $T = 77$ К рассчитана холловская концентрация $p_{77} = 2.14 \cdot 10^{17}$ см⁻³ в полях меньше 0.1 Тл, что позволило найти по формуле $R_h = 2 \cdot (4\pi \cdot p_{77} / 3)^{-1/3}$ среднее расстояние между дырками 207 Å. Используя полученные значения, можно найти диэлектрическую проницаемость среды $\kappa = 11$. Тогда плотность локализованных состояний составляет $g_0 = 3 \cdot \kappa^3 \cdot \Delta^2 / (\pi e^6) = 1.66 \cdot 10^{16}$ см⁻³ мэВ⁻¹. Подставляя полученные

параметры в уравнение определения прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа Шкловского – Эфроса $T_{SE} = \beta_{SE} \cdot e^2 / k_B \cdot \kappa \cdot a$, можно найти значение радиуса локализованных состояний $a = 245.8 \text{ \AA}$.

В случае включения магнитного поля волновые функции примесных электронов сужаются в поперечном направлении. Это приводит к возрастанию сопротивления по экспоненциальной зависимости, что может свидетельствовать о наличии прыжковой проводимости в магнитном поле. На рис. 5 приведена полевая зависимость удельного сопротивления исследуемого образца InSb-NiSb от напряженности магнитного поля при температуре 98 К (значение подобрано из найденного температурного диапазона в области прыжковой проводимости с переменной длиной прыжка типа ШЭ).

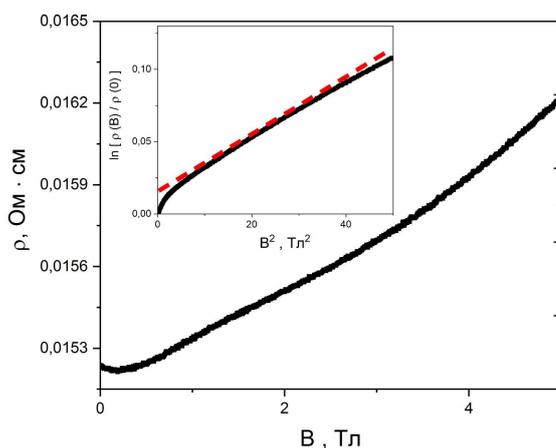


Рис. 5. Зависимость ρ от B образца InSb-NiSb при $T = 98 \text{ K}$. Вставка: Зависимость $\ln(\rho(B) / \rho(0))$ от B^2
 Fig. 5. Plots of ρ versus B of $(\text{InSb})_{98.2} - 98 \text{ K}$. Insert: plots $\ln(\rho(B) / \rho(0))$ versus B^2

В магнитном поле основная часть прыжков происходит под малыми углами к магнитному полю на расстояния много большие среднего расстояния между примесями. Удельное сопротивление в малом магнитном поле уменьшается на непродолжительном участке, затем следует экспоненциальный рост при увеличении магнитного поля до 5 Тл. Относительное магнитосопротивление $\rho(B) / \rho(0)$ связано с магнитным полем выражением: $\rho(B) / \rho(0) = \exp(AB^2)$, где A – постоянная величина. График зависимости относительного сопротивления от квадрата напряженности магнитного поля представлен на вставке рис. 5. Значение параметра A рассчитывается как коэффициент в уравнении прямой и численно равно $A = 1.910 \cdot 10^{-3}$ для температуры $T = 98 \text{ K}$. Таким образом, магнитное поле оказывает сильное влияние на волновые функции электронов, что в свою очередь приводит к появлению прыжковой проводимости в магнитном поле.

4. Заключение. Исследован эвтектический состав игольчатого типа $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$. Композитный монокристалл был получен модифицированным методом Бриджмена. После чего был подготовлен образец в форме параллелепипеда и произведены исследования гальваномагнитных свойств. Проведено измерение характеристик удельного сопротивления в диапазоне температур от 300 К до температур жидкого гелия 1.5 К. В отсутствие магнитного поля определена прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка типа Шкловского – Эфроса. Рассчитана температура начала прыжковой проводимости, которая составила $T_v = 126.1 \text{ K}$. Рассчитаны микроскопические параметры исследуемого образца монокристалла композита $(\text{InSb})_{98.2} - (\text{NiSb})_{1.8}$: ширина мягкой параболической щели $\Delta = 6.3 \text{ мэВ}$, диэлектрическая проницаемость $\kappa = 11$, плотность локализованных состояний $g_0 = 1.66 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3} \text{ мэВ}^{-1}$ и радиус локализации носителей заряда $a = 245.8 \text{ \AA}$.

Список литературы

1. Du Z, He J, Chen X, et al. Point defect engineering in thermoelectric study of InSb. *Intermetallics*. 2019;112:106528.
2. Luo F, Wang J, Zhu C, et al. 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.
3. 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.
4. Брюквин Д.В., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Влияние различных условий конвективного перемешивания расплавов на структуру и магнитосопротивление направленно закристаллизованных эвтектических сплавов InSb-NiSb. *Кристаллография*. 2004;49(2):350-355.

5. Mamedov IKh, Arasly DH, Khalilova AA, et al. Anisotropic electrical properties of a eutectic InSb + MnSb composite. *Inorganic Materials*. 2016;52:423-428.
6. 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.
7. Pendharkar M, Zhang B, Wu H, et al. Parity-preserving and magnetic field-resilient superconductivity in InSb nanowires with Sn shells. *Science*. 2021;372(6541):508-511.
8. Su M, Li J, He K, et al. NiSb/nitrogen-doped carbon derived from Ni-based framework as advanced anode for lithium-ion batteries. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023;629:83-91.
9. Weiss H. Structure and Application of Galvanomagnetic Devices: International Series of Monographs on Semiconductors. *Elsevier*. 2014.
10. Zheng XM, You JH, Fan JJ, et al. 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;77:105123.
11. 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.
12. Jesenovec J, Zawilski KT, Alison P, et al. Controlling Morphology of NiSb Needles in InSb through Low Temperature Gradient Horizontal Gradient Freeze. *Journal of Crystal Growth*. 2023;127440.
13. Ivanov O, Zakhvalinskii V, Pilyuk E, et al. Resistivity superconducting transition in single-crystalline Cd_{0.95}Ni_{0.05}Sb system consisting of non-superconducting CdSb and NiSb phases. *Chinese Journal of Physics*. 2021;72:223-228.
14. Laiho R, Lashkul A, Lisunov K, et al. Hopping conductivity of ni-doped p-CdSb. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008;20(29):295204-295214.
15. Tran T, Wong-Leung J, Smillie L, et al. High hole mobility and non-localized states in amorphous germanium. *APL Materials*. 2023;11(4).
16. Немов С.А., Равич Ю.И. Прыжковая проводимость по сильно локализованным примесным состояниям индия в РbТе и твердых растворах на его основе. *Физика и техника полупроводников*. 2002;36(1):3-23.

References

1. Du Z, He J, Chen X, et al. Point defect engineering in thermoelectric study of InSb. *Intermetallics*. 2019;112:106528.
2. Luo F, Wang J, Zhu C, et al. 18-Electron half-Heusler compound Ti_{0.75}NiSb with intrinsic Ti vacancies as a promising thermoelectric material. *Journal of Materials Chemistry A*. 2022;10(17):9655-9669.
3. 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.
4. Bryukvin DV, Raukhman MR, Shalimov VP. Influence of various conditions of convective mixing of melt on the structure and magnetoresistance of eutectic InSb-NiSb alloys obtained by directional crystallization. *Crystallography Reports*. 2004;49:294-298. (In Russian)
5. Mamedov IKh, Arasly DH, Khalilova AA, et al. Anisotropic electrical properties of a eutectic InSb + MnSb composite. *Inorganic Materials*. 2016;52:423-428.
6. 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.
7. Pendharkar M, Zhang B, Wu H, et al. Parity-preserving and magnetic field-resilient superconductivity in InSb nanowires with Sn shells. *Science*. 2021;372(6541):508-511.
8. Su M, Li J, He K, et al. NiSb/nitrogen-doped carbon derived from Ni-based framework as advanced anode for lithium-ion batteries. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2023;629:83-91.
9. Weiss H. Structure and Application of Galvanomagnetic Devices: International Series of Monographs on Semiconductors. *Elsevier*. 2014.
10. Zheng XM, You JH, Fan JJ, et al. 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;77:105123.
11. 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.
12. Jesenovec J, Zawilski KT, Alison P, et al. Controlling Morphology of NiSb Needles in InSb through Low Temperature Gradient Horizontal Gradient Freeze. *Journal of Crystal Growth*. 2023;127440.
13. Ivanov O, Zakhvalinskii V, Pilyuk E, et al. Resistivity superconducting transition in single-crystalline Cd_{0.95}Ni_{0.05}Sb system consisting of non-superconducting CdSb and NiSb phases. *Chinese Journal of Physics*. 2021;72:223-228.
14. Laiho R, Lashkul A, Lisunov K, et al. Hopping conductivity of ni-doped p-CdSb. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2008;20(29):295204-295214.
15. Tran T, Wong-Leung J, Smillie L, et al. High hole mobility and non-localized states in amorphous germanium. *APL Materials*. 2023;11(4).

16. Nемов SA, Ravich YuI. Hopping conductivity by highly localized impurity states of indium in PbTe and solid solutions based on it. *Physics and Technology of Semiconductors*. 2002;36(1):3-23.(In Russian)

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 10.10.2023

Received October 10, 2023

Поступила после рецензирования 26.11.2023

Revised November 26, 2023

Принята к публикации 02.12.2023

Accepted December 2, 2023

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Борисенко Александр Васильевич – аспирант Белгородского государственного национального исследовательского университета, г. Белгород, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexander V. Borisenko – graduate students of Belgorod National Research University, Belgorod, Russia