 © Авторы статьи / Authors of the article

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛОВ И ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ/TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF MATERIALS AND ELECTRONIC DEVICES

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.14 EDN: GJPLHL

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АНТИМОНИДА ИНДИЯ ПО ПОЛЕВОЙ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ХОЛЛА

Научная статья

Белов А.Г.[1], Козлов Р.Ю.[2], Молодцова Е.В.[3], Комаровский Н.Ю.[4], Журавлев Е.О.[5,] *, Нестюркин М.С.[6]
[3] ORCID : 0000-0002-2699-9524;
[4] ORCID : 0000-0002-7869-7886;
[6] ORCID : 0000-0001-6735-5058;
[1, 2, 3, 4, 5, 6] АО «Гиредмет», Москва, Российская Федерация
[4, 5] Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Российская Федерация
[4] Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (eozhuravlev[at]yandex.ru)

Предложена: 20.07.2026; Принята: 21.08.2026; Опубликована: 17.09.2026

Аннотация

На образцах антимонида индия p-типа проводимости, легированных германием, вырезанных из одного слитка, выполнены измерения удельного электрического сопротивления и коэффициента Холла при разных значениях индукции магнитного поля. Измерения проводились по методу Ван-дер-Пау при комнатной температуре и при температуре жидкого азота.

Показано, что зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля при T = 295K описываются линейными функциями. Впервые предложен метод определения значений концентрации и подвижности электронов и тяжелых дырок в p-InSb при T = 295K по полевой зависимости коэффициента Холла вблизи точки инверсии. Вклад легких дырок в коэффициент Холла и удельное электрическое сопротивление не учитывается. Оценены возникающие при этом погрешности.

Ключевые слова: p-InSb, удельное электрическое сопротивление, зависимость коэффициента Холла от индукции магнитного поля, концентрация и подвижность свободных носителей заряда.

DETERMINATION OF THE VALUES OF THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF INDIUM ANTIMONIDE BASED ON THE FIELD DEPENDENCE OF THE HALL COEFFICIENT

Research article

Belov A.G.[1], Kozlov R.Y.[2], Molodtsova E.V.[3], Komarovsky N.Y.[4], Zhuravlev Y.O.[5,] *, Nestyurkin M.S.[6]
[3] ORCID : 0000-0002-2699-9524;
[4] ORCID : 0000-0002-7869-7886;
[6] ORCID : 0000-0001-6735-5058;
[1, 2, 3, 4, 5, 6] JSC Giredmet, Moscow, Russian Federation
[4, 5] National University of Science and Technology, Moscow, Russian Federation
[4] P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (eozhuravlev[at]yandex.ru)

Suggested: 20.07.2026; Accepted: 21.08.2026; Published: 17.09.2026

Abstract

Measurements of the specific electrical resistance and the Hall coefficient were carried out on samples of p-type indium antimonide doped with germanium, cut from a single ingot, at various magnetic field strengths. The measurements were carried out using the Van der Pauw method at room temperature and at the temperature of liquid nitrogen.

It has been shown that the dependence of the Hall coefficient on the magnetic field induction at T = 295 K is described by linear functions. A method is suggested for the first time for determining the concentrations and mobilities of electrons and heavy holes in p-InSb at T = 295 K from the field dependence of the Hall coefficient near the inversion point. The contribution of light holes to the Hall coefficient and the specific electrical resistance is not taken into account. The resulting errors have been evaluated.

Keywords: p-InSb, specific electrical resistance, dependence of the Hall coefficient on magnetic field induction, concentration and mobility of free charge carriers.

Введение

Эффект Холла является одним из основных инструментов исследования электрических свойств различных полупроводниковых материалов. Метод предполагает нанесение на исследуемый образец омических контактов и наличие магнитного поля. Используются две модификации: шестиконтактная геометрия, когда исследуемый образец

 © Авторы статьи / Authors of the article

представляет собой брусок в виде параллелепипеда, либо четырехконтактная геометрия (метод Ван дер Пау). Последний имеет то преимущество, что при проведении измерений можно использовать образец произвольной формы.

Применительно к материалу InSb эффект Холла используется давно и весьма успешно. Исследованиям электрофизических свойств InSb посвящено большое количество работ. Из ранних можно отметить работы [1], [2], [4], [6], к числу из более поздних относятся работы [7], [12], [17], [20]. Наиболее полно свойства антимонида индия описаны в обзоре [7], [8]. В работах [21], [22], [23], [24] исследуются свойства приборов на основе InSb. Анализ полученных данных позволяет получить важную информацию о параметрах зонной структуры материала, а также о зависимостях электрофизических параметров от температуры, индукции магнитного поля, давления и других внешних факторов. Тип электропроводности исследуемого образца обычно определяется по знаку коэффициента Холла: «минус» соответствует материалу n-типа, а «плюс» — материалу p-типа.

Следует отметить, однако, что это условие выполняется далеко не всегда. Известно (см., например [25], [26], [27]), что для образцов полупроводниковых материалов со значениями концентрации свободных носителей заряда (КСНЗ), близких к собственной, коэффициент Холла имеет знак «минус». Более того, за счет большой разницы в подвижностях электронов и дырок коэффициент Холла будет отрицательным даже тогда, когда концентрация дырок превышает электронную на порядок. Иначе говоря, по значению коэффициента Холла тип проводимости и значения КСНЗ определить не удается. Такой случай реализуется, например, для InSb при комнатной и более высоких температурах, когда в материале присутствуют носители заряда трех типов: электроны, легкие и тяжелые дырки, концентрации которых не могут быть определены традиционными холловскими методами.

На помощь здесь может прийти исследование зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля, *R(B)*, которая имеет характерный вид. В слабых полях коэффициент Холла отрицателен; при увеличении индукции магнитного поля *R(B)*, оставаясь отрицательным, уменьшается по модулю, затем проходит через нуль и принимает положительные значения. Именно точка инверсии знака *R(B)* представляет наибольший интерес:

В настоящей работе впервые предложен алгоритм, в соответствии с которым, опираясь на точку инверсии, можно определить значения концентраций и подвижностей электронов и тяжелых дырок в антимониде индия при комнатной температуре. Этот результат крайне важен с прикладной точки зрения, поскольку упомянутые величины — важнейшие характеристики любого полупроводникового материала [28], [29].

Методика эксперимента

Для проведения исследований методом Чохральского был выращен монокристалл антимонида индия, легированный германием (подробнее — см [30]). Монокристалл был разрезан на пластины в направлении, перпендикулярном оси роста; диаметр пластин был близок к 50 мм. После резки пластины были обработаны в полирующем травителе для снятия нарушенного слоя. Итоговая толщина пластин, d, составляла (1,41–2,09) мм (см. Таблицу 1).

Таблица 1 - Параметры исследованных образцов

DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.14.1

№, п/п	d, мм	ρ, Ом×см	R, см³/Кл						R_0, см³/Кл	B_0, Тл	p_h, $см^{-3}$ (77K)	n, $см^{-3}$	μ_n, $см^2$ / (В × с)	μ_h, $см^2$ / (В × с)
			B, Тл											
			0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6						
1	2,09	0,0330	-55,4	-49,5	-40,6	-31,6	-23,3	-16,8	-64,3	0,802	$3,19\times10^{17}$	$1,40\times10^{15}$	$1,9\times10^4$	510
2	1,46	0,0292	-19,7	-17,0	-13,2	-9,06	-5,11	-1,82	-23,9	0,647	$3,95\times10^{17}$	$1,14\times10^{15}$	$1,7\times10^4$	510
3	1,41	0,0264	-12,2	-11,1	-9,63	-7,05	-2,94	-0,335	-17,5	0,620	$4,71\times10^{17}$	$9,46\times10^{14}$	$1,8\times10^4$	470
4	1,41	0,0254	-11,5	-9,92	-6,15	-4,19	-1,33	+0,890	-14,3	0,559	$4,92\times10^{17}$	$7,52\times10^{14}$	$1,9\times10^4$	470
5	1,41	0,0243	-6,17	-5,11	-3,11	-1,23	+1,06	+2,64	-8,50	0,450	$5,39\times10^{17}$	$8,21\times10^{14}$	$1,7\times10^4$	460
6	1,46	0,0238	-4,38	-3,10	-1,22	+0,776	+2,66	+4,04	-6,34	0,362	$5,57\times10^{17}$	$7,98\times10^{14}$	$1,8\times10^4$	450
7	1,41	0,0218	-2,13	-0,872	+0,382	+1,95	+3,33	+4,52	-3,55	0,262	$6,16\times10^{17}$	$7,21\times10^{14}$	$1,9\times10^4$	440
8	1,46	0,0212	-1,06	+0,374	+1,72	+2,89	+4,18	+4,84	-2,05	0,171	$6,65\times10^{17}$	$6,68\times10^{14}$	$2,0\times10^4$	420

Холловские измерения проводились с использованием стандартной четырехконтактной геометрии (метод Ван дер Пау). Контакты припаивались индием на плоскую поверхность пластины приблизительно по концам взаимно перпендикулярных диаметров. На держатель закреплялись два образца (по одному на каждую сторону); контактные

 © Авторы статьи / Authors of the article

проволочки припаивались к соответствующим площадкам держателя. Держатель в пенопластовом криостате, в который заливался жидкий азот, располагался в зазоре между полюсами электромагнита перпендикулярно направлению вектора индукции магнитного поля. Измерения проводились при комнатной температуре и температуре жидкого азота.

Удельное электрическое сопротивление измерялось в отсутствие магнитного поля; для определения коэффициента Холла использовались магнитные поля с индукцией B = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; и 0,6 Тл.

Поскольку коэффициент распределения германия в антимониде индия $\approx$ 0,012 [30], в процессе роста монокристалла большая часть легирующей примеси сосредоточилась внизу. Соответственно, для пластин, вырезанных из нижней части монокристалла, коэффициент Холла во всем диапазоне магнитных полей имел знак «плюс» и при комнатной температуре, и при температуре жидкого азота (электропроводность p-типа).

Наоборот, для пластин, вырезанных из верхней части монокристалла, коэффициент Холла при T=295K имел знак «минус», причем наблюдалась сильная полевая зависимость *R(B)*. При T=77K коэффициент Холла имел знак «плюс» и практически не зависел от индукции магнитного поля.

Особый интерес представляли образцы, вырезанные из средней части монокристалла, для которых наблюдалась инверсия знака коэффициента Холла при комнатной температуре. Результаты измерений электрофизических параметров исследованных образцов представлены в Таблице 1.

2.1. Алгоритм расчета

Известно (см., например, [25]), что в случае наличия в образце свободных носителей заряда трех типов для зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля, *R(B)*, и удельного электрического сопротивления, r, справедливы следующие соотношения.

$$\mathrm{R} = \frac{1}{e} \times \frac{A}{E^2 + A^2 B^2} \tag{1}$$

где

$$\mathrm{A} = \frac{p_I \mu_I^2}{1+\mu_I^2 B^2} + \frac{p_h \mu_h^2}{1+\mu_h^2 B^2} - \frac{n \mu_n^2}{1+\mu_n^2 B^2}, \tag{2}$$

$$\mathrm{E} = \frac{p_i \mu_I}{1+\mu_I^2 B^2} + \frac{p_h \mu_h}{1+\mu_h^2 B^2} + \frac{n \mu_n}{1+\mu_n^2 B^2}, \tag{3}$$

$$\frac{1}{\rho} = e\left(p_I \mu_I + p_h \mu_h + n \mu_n\right). \tag{4}$$

Здесь $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд электрона; p_l, p_h, n — соответственно, концентрации легких дырок, тяжелых дырок и электронов; μ_1, μ_h, μ_n — соответственно, их подвижности. Первое слагаемое характеризует вклад легких дырок, второе — вклад тяжелых дырок, третье – вклад электронов.

Из формулы (2) видно, что коэффициент A при определенном соотношении входящих в него величин может обратиться в нуль.

Введем следующие упрощающие предположения.

Будем считать, что в интервале интересующих нас магнитных полей знаменатели у двух первых слагаемых в формуле (2) не зависят от магнитного поля, то есть выполняются условия слабых полей:

$$\mu_I^2 B^2 \ll 1, \tag{5}$$

$$\mu_h^2 B^2 \ll 1. \tag{6}$$

Эти предположения означают, что вклады в коэффициент Холла от легких и тяжелых дырок не зависят от магнитного поля (в дальнейшем необходимо будет проверить справедливость этого предположения).

Предположим, что нам известно значение коэффициента Холла, R_0, то есть значение коэффициента Холла при $B \to 0$ (может быть получено экстраполяцией зависимости *R(B)* к оси ординат). Тогда R_0 может быть выражено в виде:

$$\mathrm{R}_0 = \frac{1}{e} \times \frac{\left(p_h \mu_h^2 + p_I \mu_I^2 - n \mu_n^2\right)}{\left(p_h \mu_h + p_I \mu_I + n \mu_n\right)^2}. \tag{7}$$

Пусть B_0 — значение индукции магнитного поля, при котором коэффициент A обращается в нуль — см. формулу (2). Тогда, учитывая соотношение (4), формулу (7) можно преобразовать к виду (только в том случае, если выполняется условие (5)):

$$\mathrm{R}_0 = e \rho^2 n \mu_n^2 \times \left(\frac{1}{1+\mu_n^2 B_0^2} - 1\right), \tag{8}$$

или:

$$\mathrm{R}_0 = -\frac{e \rho^2 n \mu_n^4 B_0^2}{1+\mu_n^2 B_o^2} \tag{9}$$

(видно, что $R_0 < 0$).

 © Авторы статьи / Authors of the article

Такая форма записи удобна тем, что в формулу (9) входят только параметры электронов и не входят параметры легких и тяжелых дырок.

В результате получаем биквадратное уравнение относительно μ_n :

$$\mu_n^4 - C B_0^2 \mu_n^2 - C = 0 \tag{10}$$

где

$$C = \frac{10^{-8} |R_0|}{en\rho^2 B_0^2}. \tag{11}$$

Видно, что коэффициент С имеет размерность четвертой степени подвижности. В формуле (11) R_0 берется в см^3/Кл, n — в см$^{-3}$, ρ — в Ом·см, B_0 — в Тл.

Решением уравнения (10) будет выражение:

$$\mu_n^2 = \frac{C B_0^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{C B_0^2}{2}\right)^2 + C} \tag{12}$$

Ответ для μ получается в единицах м^2/В·с

Таким образом, чтобы решить уравнение (10), необходимо определить значение n; значения R_0, B_0 и ρ определяются непосредственно из эксперимента.

Значение n можно вычислить следующим образом. Определим сначала концентрацию тяжелых дрок при температуре жидкого азота, $p_{h_{77}}$.При этой температуре коэффициент Холла положителен во всем интервале доступных нам магнитных полей ($B \le 0{,}6$ Тл), причем полевая зависимость практически отсутствует. В таком случае удобно использовать максимальное значение индукции магнитного поля $B_{макс}$ = 0,6 Тл, так как при этом и значение холловского сигнала будет максимальным.

В работе [31] отмечено, что при Т = 77К вклад в коэффициент Холла от легких дырок не превышает 8%. Учитывая это, для вычисления концентрации тяжелых дырок воспользуемся традиционной формулой:

$$p_{h_{77}} = \frac{1}{R_{77} e}. \tag{13}$$

Далее сделаем следующее упрощающее предположение. Будем считать, что концентрация тяжелых дырок не зависит от температуры, то есть $p_{h_{77}} = p_{h_{295}}$ (справедливость этого допущения проверим в дальнейшем). Тогда, зная p_h, легко найти значение приведенного уровня Ферми, $\eta = \frac{E_F}{kT}$, а по известному значению η можно вычислить значение концентрации электронов, n (подробнее см. [32]).

Для удобства расчетов введем безразмерные параметры: $U_1 = \frac{n}{p_h}$, $U_2 = \frac{p_I}{p_h}$ и параметр, имеющий размерность подвижности, $\mu = \frac{1}{\rho e p_h}$. Тогда соотношение (4) примет вид:

$$\mu = \mu_h + U_2 \mu_1 + U_1 \mu_n \tag{14}$$

Кроме того, поскольку уровень Ферми лежит в запрещенной зоне, будем считать, что интегралы Ферми близки между собой, а отношение $\frac{p_I}{p_h}$ определяется только коэффициентами, стоящими перед интегралами, то есть $U_2 = \frac{2{,}676}{518{,}5} = 5,16 \times 10^{-3}$, и это значение одинаково для всех исследованных образцов (подробнее – см. [32]).

Предположим, что $\mu_1 = 20\mu_h$ (оценка с завышением); тогда второе слагаемое будет равно 10% от первого, и вкладом в проводимость от легких дырок мы в дальнейшем будем пренебрегать. Теперь, зная $U_1\mu_n$, легко вычислить значение μ_h .

Алгоритм определения значений подвижностей электронов и тяжелых дырок состоит в следующем.

1. Определяется значение удельного электрического сопротивления, ρ, Ом х см , при комнатной температуре.
2. Определяются значения коэффициента Холла в магнитных полях с индукцией B = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 Тл при комнатной температуре.
3. Строится график зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля, *R(B)*, для Т = 295К.
4. Находится точка инверсии знака коэффициента Холла (R_0 = 0) и отвечающее ей значение индукции магнитного поля, B_0, Тл. Если значение B_0 оказывается большим, чем $B_{макс}$ = 0,6 Тл, то B_0 определяется экстраполяцией зависимости *R(B)* к оси абсцисс.
5. Определяется значение коэффициента Холла при температуре жидкого азота для B = 0,6 Тл, и вычисляется значение $p_{h_{77}}$, см$^{-3}$, (см. формулу (13)).
6. Находится отвечающее этому значению p_h значение n, см$^{-3}$, для Т = 295К (см. выше) и вычисляется значение параметра U_1.
7. Путем экстраполяции зависимости *R(B)* к оси ординат определяется значение R_0, и с помощью формулы (11) вычисляется значение параметра С.
8. Решается биквадратное уравнение (12) и определяется значение μ_n .
9. С помощью соотношения (14) вычисляется значение μ_h .

Результаты эксперимента и их обсуждение

Все полученные зависимости коэффициента Холла от индукци магнитного поля, *R(B)*, описываются линейными функциями. На рисунке в качестве примера представлены зависимости *R(B)* для образцов №№ 1,3,5 (см. Таблицу 1).

 © Авторы статьи / Authors of the article

Видно, что угол наклона прямых к оси абсцисс уменьшается по мере роста значений p_h (уменьшения значений n). По этим графикам легко найти значения B_0 и R_0 (см. Таблицу 1). В Таблице 1 представлены также результаты измерений ρ и *R(B)*, и вычисленные по описанному выше алгоритму значения p_h, n, μ_n, μ_h. Образцы расположены в порядке возрастания значений p_h.

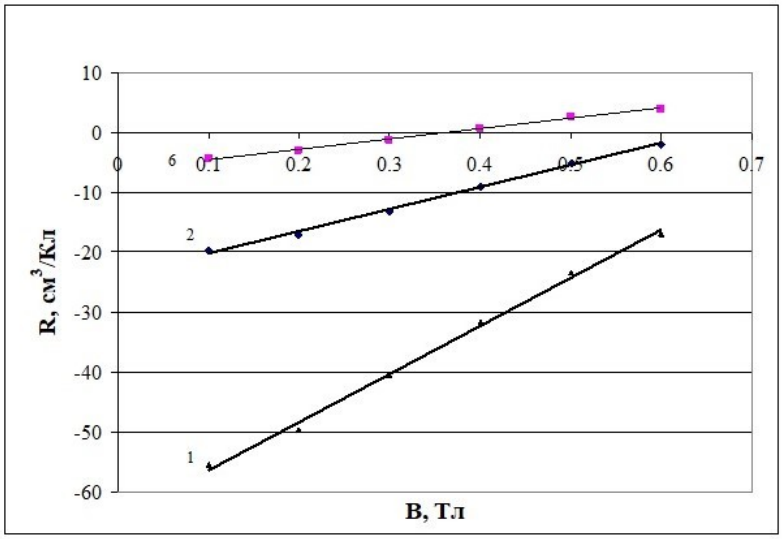

Рисунок 1 - Зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля
DOI: https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.171.14.2

Примечание: цифры у графиков соответствуют номерам образцов в таблице

Из Таблицы 1 видно, что значения r монотонно убывают с увеличением порядкового номера образца; то же самое относится и к значениям B_0 и $|R_0|$.

Как видно из Таблицы 1, для разных образцов значения подвижностей электронов лежат в диапазоне (1,7 ÷ 2,0)·10⁴ $\frac{см^2}{B \times c}$ а тяжелых дырок — в диапазоне (420 - 510) $\frac{см^2}{B \times c}$, причем наблюдается уменьшение подвижности тяжелых дырок с ростом их концентрации. Полученные результаты согласуются с данными , приводимыми в работах [33] (электроны) и [34] (тяжелые дырки).

Оценим теперь погрешности, с которыми определены значения параметров, указанных в Таблице 1. Случайная относительная погрешность определения значения $\rho, \delta_\rho = \pm 3\%$; значений *R(B)*, p_h, n, $\delta_{\mathbb{R}} = \delta_{p_h} = \delta_n = \pm 6\%$. (данные метрологических исследований, предшествующих аттестации методики выполнения измерений). Значения параметров R_0 и B_o определяются из графиков с гораздо большей точностью: $\delta_{R_0} \approx \delta_{B_0} \leq 0,5\%$ (оценка с завышением). Что касается случайной относительной погрешности определения значения подвижности электронов, δ_{μ_n}, то её можно оценить следующим образом. Будем считать параметр C функцией нескольких независимых переменных: n, ρ, R_0 *и* B_0 (см. формулу (11)). Поскольку $\mu_n \sim C^{\frac{1}{4}}$,то $\delta_{\mu_n} = \frac{1}{4}\delta_C$, где значение δ_C можно определить, вычислив полный дифференциал C как функции перечисленных независимых переменных. В результате получим:

$$\delta_{\mu_n} = \frac{1}{4}\delta_C = \frac{1}{4}\left(\delta_n + 2\delta_p + \delta_{R_0} + \delta_{B_0}\right) \quad (15)$$

Подставив в (15) значения погрешностей δ_I, получим:

$$\delta_{\mu_n} = \frac{1}{4}(0,06 + 2 \times 0,03 + 0,005 + 0,005) = 0,0325 = 3,25\%; \quad (16)$$

с округлением в сторону увеличения: $\delta_{\mu_n} \leq \pm 4\%$.

Из соотношения (14) следует:

$$\mu_h \approx \mu - U_1 \mu_n, \quad (17)$$

или

$$\delta_{\mu_h} = \frac{\Delta\mu_h}{\mu_h} = \frac{\Delta\mu + U_1\Delta\mu_n + \mu_n\Delta U_1}{\mu_p}. \quad (18)$$

Здесь Δ_i — абсолютные случайные погрешности определения соответствующих параметров. Из формулы (18) видно, что для оценки δ_{μ_h} необходимо выбирать максимальные значения параметров, входящих в числитель и минимальные — в знаменатель. Соответствующие расчеты по данным Таблицы 1 дают значение $\delta_{\mu_h} \approx \pm 15\%$. Далее учтем возможный вклад в проводимость от легких дырок как систематическую составляющую относительной

 © Авторы статьи / Authors of the article

погрешности: $\left(\delta_{\mu_h}\right)_{сист} = 10\%$ (см. выше). Тогда, считая случайную и систематическую составляющие погрешности независимыми, для суммарной погрешности $\left(\delta_{\mu_h}\right)_{\text{сум}}$ получим:

$$\left(\delta_{\mu_h}\right)_{\text{сум}} = \sqrt{\left(\delta_{\mu_h}\right)^2 + \left(\delta_{\mu_h}\right)^2_{сист}} = \sqrt{0,15^2 + 0,10^2} = 0,18 = 18\% \quad (19)$$

При округлении с завышением получаем $\left(\delta_{\mu_h}\right)_{\text{сум}}$ <20 %. Проверим теперь справедливость предположения о равенстве концентраций тяжелых дырок при разных температурах. Как видно из Таблицы 1, минимальное значение $p_{h_{77}} = 3,19 \times 10^{17} \text{см}^{-3}$, что более, чем на порядок превышает значение собственной концентрации при T = 295K: $n_{i_{295}} = 2,14 \times 10^{16} \text{см}^{-3}$ [32]. Это подтверждает правомерность использованного приближения. Из Таблицы 1 видно также, что условие слабого магнитного поля (6) заведомо выполняется для тяжелых дырок: $(0,8 \times 0,05)^2 = 0,0016 \ll 1$. Отметим, что для электронов $\mu_n^2 B^2 \sim 1$. Про легкие дырки ничего сказать нельзя, поскольку не известно значение μ_1.

Заключение

1. По методу Ван дер Пау выполнены измерения удельного электрического сопротивления и полевых зависимостей коэффициента Холла на образцах p-InSb, легированных германием. Измерения проводились при комнатной температуре и при температуре жидкого азота. Показано, что зависимости коэффициента Холла от индукции магнитного поля при T = 295K описываются линейными функциями.

2. Впервые предложен алгоритм, который позволяет по точке инверсии знака коэффициента Холла при комнатной температуре определять значения концентраций и подвижностей электронов и тяжелых дырок (важно с прикладной точки зрения). Оценены возникающие при этом погрешности.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Baranskii P.I. Concentration Dependence of the Hall factor in n-InSb and p-InSb / P.I. Baranskii, O.P. Gorodnichii // Phys. Stat, Sol. — 1969. — Vol. 35. — P. 123–126.

2. Rode D.L. Electron Transport in InSb, InAs and InP / D.L. Rode // Phys. Rev. B. — 1971. — № 3 (10). — P. 3287–3299. — DOI: 10.1103/PhysRevB.3.3287.

3. Filipchenko A.S. Mobility of holes in p-InSb Crystals / A.S. Filipchenko, L.P. Bolshakov // Phys. Stat. Sol. (b). — 1976. — № 77. — P. 53–58.

4. Wu C.-C. Hall effect of nonparabolicity in a nondegenerate indium antimonide / C.-C. Wu, J. Tsai, C.-J. Lin // J. Appl. Phys. — 1987. — № 62 (6). — P. 2364–2369.

5. Брандт Н.Б. Гальваномагнитные эффекты в антимониде индия, легированном германием, при глубоком облучении быстрыми электронами / Н.Б. Брандт, Е.П. Скипетров, В.В. Дмитриев [и др.] // Вестн. Моск. Ун-Та. Сер.3, Физика. Астрономия. — 1988. — № 29 (6). — С. 95–97.

6. Zimpel M. Mobility of holes in InSb / M. Zimpel, M. Oszwaldowski, J. Goc // Acta physica Polonica. A. — 1989. — № 75 (2). — P. 297–300.

7. New semiconductor materials. Biology systems. Characteristic and properties. Band structure and carrier concentration of indium antimonide (InSb). — URL: https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InSb/bandstr.html (accessed: 17.05.2026).

8. Yucheng Li. Advances in indium antimonide (InSb): A comprehensive review of properties, preparation methods, and photodetection / Li Yucheng, Jia Bowen, Li Wenxin [et al.] // Materials Today Electronics. — 2026. — № 16. — Art. 100210. — DOI: 10.1016/j.mtelec.2026.100210.

9. Devki Talwar N. Structural morphology, dynamical and optical properties of InAs, InSb and $InAs_{1-x}Sb_x$ Epilayers / N. Devki Talwar, Hao-Hsiung Lin // Materials of Science and Engineering: B. — 2026. — Art. 119221. — DOI: 10.1016/j.mseb.2026.119221.

10. Орлов В.Г. Численное моделирование кинетических свойств антимонида индия / В.Г. Орлов, Г.С. Сергеев // Физика твердого тела. — 2013. — № 55 (11). — С. 2105–2111.

11. Kuzmina K. Magnetotransport of indium antimonide doped with manganese / K. Kuzmina, B.A. Aronzon, A.V. Kochura [et al.] // EPJ Web of Conferences. — 2014. — № 75. — Art. 05014. — DOI: 10.1051/epjconf/20147505014.

12. Гуляев А.М. Влияние избытка компоненгов на электрические свойства пленок антимонида индия / А.М. Гуляев, А.С. Шнитников // Физика и техника полупроводников. — 2015. — № 49 (2). — С. 214–218.

 © Авторы статьи / Authors of the article

13. Углов В.В. Магнитные и электрические свойства, структура пленок антимонида индия (InSb), полученных методом взрывного термического испарения / В.В. Углов, А.П. Драпезо, Е.А. Колесникова [и др.] // 11-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2018». — С. 294–297.

14. Колесникова Е.А. Исследование электрических свойств пленок антимонида индия (InSb), облученных гамма-квантами / Е.А. Колесникова, В.В. Углов, Е.В. Тетеруков // 14-я Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2021». — С. 288–289.

15. Банов В.Ф. Исследование электрофизических свойств квантовых точек антимонида индия: значение формы / В.Ф. Банов, А.И. Михайлов, М.В. Гавриков // Физика и техника полупроводников. — 2021. — № 55 (2). — С. 237–240.

16. Никулин Ю.В. Отрицательное магнитосопротивление в структуре n-InSb/ЖИГ / Ю.В. Никулин, А.В. Кожевников, Ю.В. Хивинцев [и др.] // Физика твердого тела. — 2021. — № 63 (9). — С. 1253–1257. — DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51248.06H.

17. Kanghui Wang. Lattice-matched heteroepitaxial preparation of InSb/CdTe on Si(111) substrate by magnetron sputtering / Kanghui Wang, Min Zhang, Tixian Zeng [et al.] // Vacuum. — 2023. — Art. 112010. — DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112010.

18. Abaker M. Thermoelectric properties of Ga-doped InSb / M. Abaker, N. Elamin Ahmed, A. Saad [et al.] // Vacuum. — 2024. — № 219. — Art. 112761. — DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112761.

19. Ковшов В.С. Определение концентрации носителей заряда в сильнолегированных подложках антимонида индия по спектрам пропускания с учетом влияния низкотемпературных эффектов / В.С. Ковшов // Успехи прикладной физики. — 2025. — № 13 (6). — С. 514–527. — DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-6-514-527.

20. Katuziac P. Material-based uniqueness in InSb thin films: Flash Evaporation Epitaxy as a tool for secure device engingeering / P. Katuziac, J. Raczynski, S. El-Ahmar [et al.] // Vacuum. — 2026. — № 247. — Art. 115166. — DOI: 10/1016/j.vacuum.2026.115166.

21. Болтарь К.О. Мезаструктуры и фотоприемные устройства на основе эпитаксиальных слоев InSb / К.О. Болтарь А.А. Лопухин, П.В. Власов [и др.] // Успехи прикладной физики. — 2021. — № 9 (6). — С. 513–522. — DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-513-522.

22. Ковшов В.С. Аналитическая модель квантовой эффективности фотодиодов на основе антимонида индия / В.С. Ковшов, Н.И. Яковлева, А.В. Никонов // Успехи прикладной физики. — 2022. — № 10 (3). — С. 277–288. — DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-277-288.

23. Астахов В.П. Исследование вольт-фарадных характеристик МДП-структур на основе антимонида индия / В.П. Астахов, К.С. Андрейчиков, И.А. Дубенская [и др.] // Успехи прикладной физики. — 2023. — № 11 (2). — С. 146–154. — DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-146-154.

24. Ковшов В.С. Исследование спектральной характеристики чувствительности nBn-фотодиодов на основе InAsSb / В.С. Ковшов // Applied Physics. Photoelectronics. — 2023. — № 2. — С. 64–76. — DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-64-76.

25. Киреев П.С. Физика полупроводников / П.С. Киреев. — Москва: Высшая школа, 1975.

26. Аскеров Б.М. Кинетические эффекты в полупроводниках / Б.М. Аскеров. — Москва: Наука, 1970. — 304 с.

27. Бонч-Бруевич В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. — Москва: Наука, 1977. — 674 с.

28. Комаровский Н.Ю. Исследование монокристаллов антимонида индия, полученных модернизированным методом Чохральского в различных кристаллографических направлениях / Н.Ю. Комаровский, Е.В. Молодцова, А.Г. Белов [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Главная. — 2023. — № 89 (8). — С. 38–46. — DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-38-46.

29. Козлов Р.Ю. Разработка основ комплексной опытно-промышленной технологии получения полированных пластин антимонида индия диаметром до 100 мм для фотоприемных устройств средневолнового ИК диапазона: дис. ... канд. техн. наук / Козлов Роман Юрьевич. — Москва, 2026. — 167 с.

30. Hulme K.F. Indium antimonide — a review of its preparation, properties and device applications / K.F. Hulme, J.B. Mullin // Solid State Electronics. — Pergamon Press, 1962. — № 5. — P. 211–247.

31. Угрин Ю.О. О вкладе различных типов носителей тока в явления переноса в p-InSb / Ю.О. Угрин, Е.М. Шерегий // Физика и техника полупроводников. — 1988. — № 22 (8). — С. 1375–1380.

32. Белов А.Г. Сравнение расчетных и экспериментальных значений собственной концентрации свободных носителей заряда в антимониде индия / А.Г. Беглов, Р.Ю. Козлов, Е.О. Журавлев [и др.] // Прикладная физика. — 2025. — № 5. — С. 43–50.

33. Litwin-Staszewska E. The Electron Mobility and thermoelectric power in inSb at Atmospheric and Hydrostatic Pressures / E. Litwin-Staszewska, W. Szymanska, R. Piotrzkowski // Phys. Stat. Sol. (b). — 1981. — № 106. — P. 551–559.

34. Wiley J.D. Mobility of Holes in III–V Compounds. Semiconductors and Semimetals, R. K. Willardson and A. C. Beer, eds. / J.D. Wiley. — New York: Academic Press, 1975. — № 10. — P. 91–174.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Baranskii P.I. Concentration Dependence of the Hall factor in n-InSb and p-InSb / P.I. Baranskii, O.P. Gorodnichii // Phys. Stat, Sol. — 1969. — Vol. 35. — P. 123–126.

2. Rode D.L. Electron Transport in InSb, InAs and InP / D.L. Rode // Phys. Rev. B. — 1971. — № 3 (10). — P. 3287–3299. — DOI: 10.1103/PhysRevB.3.3287.

3. Filipchenko A.S. Mobility of holes in p-InSb Crystals / A.S. Filipchenko, L.P. Bolshakov // Phys. Stat. Sol. (b). — 1976. — № 77. — P. 53–58.

 © Авторы статьи / Authors of the article

4. Wu C.-C. Hall effect of nonparabolicity in a nondegenerate indium antimonide / C.-C. Wu, J. Tsai, C.-J. Lin // J. Appl. Phys. — 1987. — № 62 (6). — P. 2364–2369.

5. Brandt N.B. Galvanomagnitnie effekti v antimonide indiya, legirovannom germaniem, pri glubokom obluchenii bistrimi elektronami [Galvanomagnetic effects in germanium-doped indium antimonide under deep irradiation with fast electrons] / N.B. Brandt, E.P. Skipetrov, V.V. Dmitriev [et al.] // Vestn. Mosk. Un-Ta. Ser.3, Fizika. Astronomiya [Bulletin Of Moscow University. Series 3, Physics. Astronomy]. — 1988. — № 29 (6). — P. 95–97. [in Russian]

6. Zimpel M. Mobility of holes in InSb / M. Zimpel, M. Oszwaldowski, J. Goc // Acta physica Polonica. A. — 1989. — № 75 (2). — P. 297–300.

7. New semiconductor materials. Biology systems. Characteristic and properties. Band structure and carrier concentration of indium antimonide (InSb). — URL: https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InSb/bandstr.html (accessed: 17.05.2026).

8. Yucheng Li. Advances in indium antimonide (InSb): A comprehensive review of properties, preparation methods, and photodetection / Li Yucheng, Jia Bowen, Li Wenxin [et al.] // Materials Today Electronics. — 2026. — № 16. — Art. 100210. — DOI: 10.1016/j.mtelec.2026.100210.

9. Devki Talwar N. Structural morphology, dynamical and optical properties of InAs, InSb and $InAs_{1-x}Sb_x$ Epilayers / N. Devki Talwar, Hao-Hsiung Lin // Materials of Science and Engineering: B. — 2026. — Art. 119221. — DOI: 10.1016/j.mseb.2026.119221.

10. Orlov V.G. Chislennoe modelirovanie kineticheskikh svoistv antimonida indiya [Numerical modelling of the kinetic properties of indium antimonide] / V.G. Orlov, G.S. Sergeev // Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]. — 2013. — № 55 (11). — P. 2105–2111. [in Russian]

11. Kuzmina K. Magnetotransport of indium antimonide doped with manganese / K. Kuzmina, B.A. Aronzon, A.V. Kochura [et al.] // EPJ Web of Conferences. — 2014. — № 75. — Art. 05014. — DOI: 10.1051/epjconf/20147505014.

12. Gulyaev A.M. Vliyanie izbitka komponengov na elektricheskie svoistva plenok antimonida indiya [The effect of excess components on the electrical properties of indium antimonide films] / A.M. Gulyaev, A.S. Shnitnikov // Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and Technology of Semiconductors]. — 2015. — № 49 (2). — P. 214–218. [in Russian]

13. Uglov V.V. Magnitnie i elektricheskie svoistva, struktura plenok antimonida indiya (InSb), poluchennikh metodom vzrivnogo termicheskogo ispareniya [Magnetic and electrical properties and structure of indium antimonide (InSb) films deposited by explosive thermal evaporation] / V.V. Uglov, A.P. Drapezo, Ye.A. Kolesnikova [et al.] // 11-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Priborostroenie-2018» [11th International Scientific and Technical Conference "Instrument Engineering 2018"]. — P. 294–297. [in Russian]

14. Kolesnikova E.A. Issledovanie elektricheskikh svoistv plenok antimonida indiya (InSb), obluchennikh gamma-kvantami [A study of the electrical properties of indium antimonide (InSb) films irradiated with gamma rays] / E.A. Kolesnikova, V.V. Uglov, E.V. Teterukov // 14-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Priborostroenie-2021» [14th International Scientific and Technical Conference "Instrument Engineering 2021"]. — P. 288–289. [in Russian]

15. Banov V.F. Issledovanie elektrofizicheskikh svoistv kvantovikh tochek antimonida indiya: znachenie formi [A study of the electrophysical properties of indium antimonide quantum dots: the significance of shape] / V.F. Banov, A.I. Mikhailov, M.V. Gavrikov // Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and Technology of Semiconductors]. — 2021. — № 55 (2). — P. 237–240. [in Russian]

16. Nikulin Yu.V. Otritsatelnoe magnitosoprotivlenie v strukture n-InSb/ZhIG [Negative magnetoresistance in an n-InSb/JIG structure] / Yu.V. Nikulin, A.V. Kozhevnikov, Yu.V. Khivintsev [et al.] // Fizika tverdogo tela [Solid State Physics]. — 2021. — № 63 (9). — P. 1253–1257. — DOI: 10.21883/FTT.2021.09.51248.06H. [in Russian]

17. Kanghui Wang. Lattice-matched heteroepitaxial preparation of InSb/CdTe on Si(111) substrate by magnetron sputtering / Kanghui Wang, Min Zhang, Tixian Zeng [et al.] // Vacuum. — 2023. — Art. 112010. — DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112010.

18. Abaker M. Thermoelectric properties of Ga-doped InSb / M. Abaker, N. Elamin Ahmed, A. Saad [et al.] // Vacuum. — 2024. — № 219. — Art. 112761. — DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.112761.

19. Kovshov V.S. Opredelenie kontsentratsii nositelei zaryada v silnolegirovannikh podlozhkakh antimonida indiya po spektram propuskaniya s uchetom vliyaniya nizkotemperaturnikh effektov [Determination of the concentration of charge carriers in heavily doped indium antimonide substrates using transmission spectra, taking into account the influence of low-temperature effects] / V.S. Kovshov // Uspekhi prikladnoi fiziki [Advances in Applied Physics]. — 2025. — № 13 (6). — P. 514–527. — DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-6-514-527. [in Russian]

20. Katuziac P. Material-based uniqueness in InSb thin films: Flash Evaporation Epitaxy as a tool for secure device engingeering / P. Katuziac, J. Raczynski, S. El-Ahmar [et al.] // Vacuum. — 2026. — № 247. — Art. 115166. — DOI: 10/1016/j.vacuum.2026.115166.

21. Boltar K.O. Mezastrukturi i fotopriemnie ustroistva na osnove epitaksialnikh sloev InSb [Mesostructures and photodetectors based on epitaxial InSb layers] / K.O. Boltar A.A. Lopukhin, P.V. Vlasov [et al.] // Uspekhi prikladnoi fiziki [Advances in Applied Physics]. — 2021. — № 9 (6). — P. 513–522. — DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-6-513-522. [in Russian]

22. Kovshov V.S. Analiticheskaya model kvantovoi effektivnosti fotodiodov na osnove antimonida indiya [An analytical model of the quantum efficiency of indium antimonide-based photodiodes] / V.S. Kovshov, N.I. Yakovleva, A.V. Nikonov // Uspekhi prikladnoi fiziki [Advances in Applied Physics]. — 2022. — № 10 (3). — P. 277–288. — DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-3-277-288. [in Russian]

23. Astakhov V.P. Issledovanie volt-faradnikh kharakteristik MDP-struktur na osnove antimonida indiya [A study of the volt-farad characteristics of indium antimonide-based MDP structures] / V.P. Astakhov, K.S. Andreichikov, I.A. Dubenskaya [et al.] // Uspekhi prikladnoi fiziki [Advances in Applied Physics]. — 2023. — № 11 (2). — P. 146–154. — DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-146-154. [in Russian]

 © Авторы статьи / Authors of the article

24. Kovshov V.S. Issledovanie spektralnoi kharakteristiki chuvstvitelnosti nBn-fotodiodov na osnove InAsSb [A study of the spectral sensitivity characteristics of InAsSb-based nBn photodiodes] / V.S. Kovshov // Applied Physics. Photoelectronics. — 2023. — № 2. — P. 64–76. — DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-64-76. [in Russian]

25. Kireev P.S. Fizika poluprovodnikov [Physics of Semiconductors] / P.S. Kireev. — Moscow: Visshaya shkola, 1975. [in Russian]

26. Askerov B.M. Kineticheskie effekti v poluprovodnikakh [Kinetic effects in semiconductors] / B.M. Askerov. — Moscow: Nauka, 1970. — 304 p. [in Russian]

27. Bonch-Bruevich V.L. Fizika poluprovodnikov [Physics of Semiconductors] / V.L. Bonch-Bruevich, S.G. Kalashnikov. — Moscow: Nauka, 1977. — 674 p. [in Russian]

28. Komarovskii N.Yu. Issledovanie monokristallov antimonida indiya, poluchennikh modernizirovannim metodom Chokhralskogo v razlichnikh kristallograficheskikh napravleniyakh [A study of indium antimonide single crystals produced using a modified Czochralski method in various crystallographic orientations] / N.Yu. Komarovskii, Ye.V. Molodtsova, A.G. Belov [et al.] // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. Glavnaya [Plant Laboratory. Materials Diagnostics. Head]. — 2023. — № 89 (8). — P. 38–46. — DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-38-46. [in Russian]

29. Kozlov R.Yu. Razrabotka osnov kompleksnoi opitno-promishlennoi tekhnologii polucheniya polirovannikh plastin antimonida indiya diametrom do 100 mm dlya fotopriemnikh ustroistv srednevolnovogo IK diapazona [Development of the fundamentals of a comprehensive pilot-scale process for the production of polished indium antimonide plates with a diameter of up to 100 mm for photodetectors in the mid-infrared range]: dis. ... of PhD in Technical Sciences / Kozlov Roman Yurevich. — Moscow, 2026. — 167 p. [in Russian]

30. Hulme K.F. Indium antimonide — a review of its preparation, properties and device applications / K.F. Hulme, J.B. Mullin // Solid State Electronics. — Pergamon Press, 1962. — № 5. — P. 211–247.

31. Ugrin Yu.O. O vklade razlichnikh tipov nositelei toka v yavleniya perenosa v p-InSb [On the contribution of various types of charge carriers to transport phenomena in p-InSb] / Yu.O. Ugrin, E.M. Sheregii // Fizika i tekhnika poluprovodnikov [Physics and Technology of Semiconductors]. — 1988. — № 22 (8). — P. 1375–1380. [in Russian]

32. Belov A.G. Sravnenie raschetnikh i eksperimentalnikh znachenii sobstvennoi kontsentratsii svobodnikh nositelei zaryada v antimonide indiya [Comparison of calculated and experimental values of the intrinsic concentration of free charge carriers in indium antimonide] / A.G. Beglov, R.Yu. Kozlov, Ye.O. Zhuravlev [et al.] // Prikladnaya fizika [Applied Physics]. — 2025. — № 5. — P. 43–50. [in Russian]

33. Litwin-Staszewska E. The Electron Mobility and thermoelectric power in inSb at Atmospheric and Hydrostatic Pressures / E. Litwin-Staszewska, W. Szymanska, R. Piotrzkowski // Phys. Stat. Sol. (b). — 1981. — № 106. — P. 551–559.

34. Wiley J.D. Mobility of Holes in III–V Compounds. Semiconductors and Semimetals, R. K. Willardson and A. C. Beer, eds. / J.D. Wiley. — New York: Academic Press, 1975. — № 10. — P. 91–174.