

# ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 1. С.36—45.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2023-1-36-45

УДК 621.315.592

### К вопросу о корректном определении концентрации электронов в $n$ -GaSb по данным электрофизических измерений

© 2023 г. Ю. Н. Пархоменко<sup>1,2</sup>, А. Г. Белов<sup>1</sup>, Е. В. Молодцова<sup>1</sup>,  
Р. Ю. Козлов<sup>1,2</sup>, С. С. Кормилицина<sup>1,2,✉</sup>, Е. О. Журавлев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет»,  
Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,  
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

✉ Авторы для переписки: [kormilicina\\_0796@mail.ru](mailto:kormilicina_0796@mail.ru); [ADenisov@rosatom.ru](mailto:ADenisov@rosatom.ru)

**Аннотация.** Проведены расчеты концентраций электронов проводимости в  $n$ -GaSb при температуре 295 и 77 К с учетом непараболичности зоны проводимости. Показано, что при температуре  $T = 295$  К концентрация «тяжелых» электронов в  $L$ -долине зоны проводимости превосходит концентрацию «легких» электронов в  $\Gamma$ -долине. Наоборот, при  $T = 77$  К электроны проводимости сосредоточены, в основном, в  $\Gamma$ -долине. Представлены результаты холловских измерений на легированных теллуром образцах  $n$ -GaSb, полученных методом Чохральского. Показано, что при анализе этих данных, полученных при  $T = 295$  К, необходимо учитывать наличие двух типов электронов (легких и тяжелых), причем концентрации их определить невозможно. Кажущееся увеличение концентрации электронов при переходе от 295 к 77 К на самом деле отсутствует. Концентрации электронов проводимости при  $T = 77$  К из холловских данных определяется корректно.

**Ключевые слова:** концентрация электронов проводимости, антимонид галлия, «легкие» и «тяжелые электроны»

**Для цитирования:** Пархоменко Ю.Н., Белов А.Г., Молодцова Е.В., Козлов Р.Ю., Кормилицина С.С., Журавлев Е.О. К вопросу о корректном определении концентрации электронов в  $n$ -GaSb по данным электрофизических измерений. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(1): 36—45. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-36-45>

## Correct determination of electron concentration in $n$ -GaSb from Hall data

Yu. N. Parkhomenko<sup>1,2</sup>, A. G. Belov<sup>1</sup>, E. V. Molodtsova<sup>1</sup>, R. Yu. Kozlov<sup>1,2</sup>,  
S. S. Kormilitsina<sup>1,2,✉</sup>, E. O. Zhuravlev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC),  
2-1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation*

<sup>2</sup> *National University of Science and Technology MISIS,  
4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

✉ *Corresponding authors: kormilitsina\_0796@mail.ru; IADenisov@rosatom.ru*

**Abstract.** The calculation of conductivity electron concentrations in  $n$ -GaSb at  $T = 295$  K and  $T = 77$  K have been made. The concentration of “heavy” electrons in the  $L$ -valley of conduction band at  $T = 295$  K has been shown to exceed “light” electron one in the  $\Gamma$ -valley. On the contrary, at  $T = 77$  K the conductivity electrons are gathered in the  $\Gamma$ -valley.

The results of Hall measurements made on tellurium-doped samples of  $n$ -GaSb obtained by the Czochralski method have been represented. It has been shown that upon analysing Hall data at  $T = 295$  K, it is necessary to take into account the presence of two types of electrons (“light” and “heavy”); their concentrations are not possible to be determined. Seeming increase in electron concentration upon transition from  $T = 295$  K to 77 K really does not take place. The electron concentration at  $T = 77$  K may be determined correctly from the Hall data.

**Key words:** conductivity electron concentration, gallium antimonide, “light” and “heavy electrons”

**For citation:** Parkhomenko Yu.N., Belov A.G., Molodtsova E.V., Kozlov R.Yu., Kormilitsina S.S., Zhuravlev E.O. Correct determination of electron concentration in  $n$ -GaSb from Hall data. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(1): 36–45. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-1-36-45>

### Введение

В АО «Гиредмет» в течение ряда лет ведутся работы по созданию бесконтактных неразрушающих методов контроля концентрации свободных носителей заряда (**КЧЗ**) в сильнолегированных полупроводниковых материалах при комнатной температуре. Записывается спектр отражения исследуемого образца в дальней инфракрасной (**ДИК**) области, после чего путем математической обработки полученного спектра отражения определяют характеристические частоты и вычисляют значения КЧЗ. Такие исследования были выполнены для  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$  [1],  $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$  [2],  $n$ -GaAs [3],  $n$ -InAs [4]. Значения КЧЗ, полученные оптическим методом, обычно сопоставляются с данными электрофизических измерений.

Настоящая работа является продолжением упомянутого выше цикла работ, но не затрагивает непосредственно оптические измерения (это задача самостоятельного исследования). В отличие от перечисленных выше полупроводниковых соединений, применительно к  $n$ -GaSb интерпретация данных электрофизических измерений при

комнатной температуре — это достаточно сложная задача, требующая отдельного рассмотрения. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы при расчетах значений оптических параметров  $n$ -GaSb.

Цель работы — проведение расчетов концентраций и эффективных масс электронов проводимости в  $n$ -GaSb при температуре  $T = 295$  и 77 К. Насколько известно авторам, статистика электронов проводимости при этих температурах отсутствует.

Зонная структура и электрические свойства  $n$ -GaSb давно и хорошо изучены (см, например, работы [5—17] и обзоры [18, 19]). Вместе с тем, остается ряд не выясненных вопросов, относящихся к интерпретации данных электрофизических измерений. Например, нуждается в объяснении тот факт, что значение концентрации электронов проводимости при понижении температуры образца от комнатной до температуры жидкого азота, согласно мнению авторов работ [20, 21], возрастает.

Отметим, что значения концентрации и подвижности электронов рассчитываются из данных холловских измерений по простым формулам,

предполагающим, что в образцах  $n$ -GaSb существуют электроны только одного типа. Ниже будет показано, что такой подход не вполне правомерен и нуждается в корректировке.

### Теоретическая часть

Известно, что зона проводимости GaSb характеризуется наличием нескольких долин (см., например, работы [12–18]. На рис. 1 представлена схема зонной структуры GaSb, приведенная в обзоре [22].

В работе [22] также приведены формулы, описывающие температурные зависимости энергетических зазоров  $E_g$  и  $E_L$ :

$$E_g = 0,813 - \frac{3,78 \cdot 10^{-4} T^2}{T + 94}; \quad (1)$$

$$E_L = 0,902 - \frac{3,97 \cdot 10^{-4} T^2}{T + 94}, \quad (2)$$

где  $T$  — абсолютная температура.

Из формул (1) и (2) можно рассчитать значения энергетических зазоров при температурах 295 и 77 К, соответственно:

– для  $T = 295$  К:

$$E_{g295} = 0,728 \text{ эВ}; E_{L295} = 0,813 \text{ эВ};$$

$$\Delta E_{295} = E_{L295} - E_{g295} = 0,085 \text{ эВ} = 85 \text{ мэВ};$$

– для  $T = 77$  К:

$$E_{g77} = 0,800 \text{ эВ}; E_{L77} = 0,888 \text{ эВ};$$

$$\Delta E_{77} = E_{L77} - E_{g77} = 0,088 \text{ эВ} = 88 \text{ мэВ}.$$

Таким образом, зазор  $\Delta E$  практически не зависит от температуры.

Учитывая, что для  $T = 295$  К  $kT = 25,4$  мэВ ( $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/К — постоянная Больцмана), а для  $T = 77$  К  $kT = 6,63$  мэВ, получаем, что  $\Delta E_{295}/kT = 3,35$  и  $\Delta E_{77}/kT = 13,3$ . Следовательно, можно ожидать, что при температуре жидкого азота все электроны проводимости будут сосредоточены в  $\Gamma$ -долине, а при комнатной температуре — распределены по  $\Gamma$ - и  $L$ -долинам. Расчеты, приведенные ниже, подтверждают это предположение.

Рассмотрим статистику электронов проводимости в  $n$ -GaSb сначала при комнатной температуре ( $T = 295$  К).  $\Gamma$ -долина зоны проводимости описывается кейновским законом дисперсии [23]; при этом справедливы следующие соотношения [24; см. Приложение А]:

$$n_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}\pi^2} \frac{(kTE_g)^{3/2}}{P_{cv}^3} {}^0L_0^{3/2}(\eta, \beta); \quad (3)$$

$$\frac{m_1}{m_0} = \frac{3\hbar^2 E_g}{4P_{cv}^2} \frac{{}^0L_0^{3/2}(\eta, \beta)}{{}^0L_{-1}^{3/2}(\eta, \beta)} \frac{1}{m_0}. \quad (4)$$

Здесь  $n_1$ ,  $m_1$  — концентрация и эффективная масса электронов в  $\Gamma$ -долине соответственно;  $m_0$  — масса свободного электрона,  $m_0 = 9,11 \cdot 10^{-28}$  г;  $P_{cv}$  — матричный элемент взаимодействия зоны проводимости и зоны легких дырок (в точке  $\Gamma$  зоны Бриллюэна),  $P_{cv} = 8,7 \cdot 10^{-8}$  эВ · см [25];  $\hbar = h/2\pi$ , где  $h = 6,62 \cdot 10^{-27}$  эрг · с — постоянная Планка. Предполагается, что значение параметра  $P_{cv}$  не зависит от энергии и температуры [25]; такая форма записи существенно упрощает процедуру расчета.

В формулах (3) и (4) используются двухпараметрические интегралы Ферми:

$$mL_k^n(\eta, \beta) = \int_0^\infty \left( -\frac{\partial f_0}{\partial x} \right) \frac{x^m (x + \beta x^2)^n}{(1 + 2\beta x)^k} dx, \quad (5)$$

где

$$f_0 = [1 + \exp(x - \eta)]^{-1}, \quad (6)$$

где  $\eta = E_F/kT$  — приведенный уровень Ферми (отсчитывается вверх от дна зоны проводимости в точке  $\Gamma$ );  $\beta = kT/E_g$  — параметр характеризующий непараболичность  $\Gamma$ -долины зоны проводимости.

В отличие от  $\Gamma$ -долины,  $L$ -долину зоны проводимости можно считать параболической. Она состоит из четырех эллипсоидов вращения. Продольная эффективная масса  $m_{2l} = 0,95m_0$ , а поперечная  $m_{2t} = 0,11m_0$  [22], т. е. коэффициент анизотропии  $K_1 = m_{2l}/m_{2t} = 8,64$ . Соответственно, эффективная масса плотности состояний (в расчете на один эллипсоид) составляет

$$m_d^{(1)} = \sqrt[3]{m_t^2 m_l} = m_t K_1^{1/3} = 0,2257 m_0. \quad (7)$$

Концентрация электронов в  $L$ -зоне  $n_2$ , описывается соотношением

$$n_2 = M \frac{8\pi}{3h^3} \left( 2m_d^{(1)} kT \right)^{3/2} F_{3/2}(\eta - 3,35). \quad (8)$$

Здесь  $M = 4$  — число эллипсоидов в  $L$ -долине;  $F_{3/2}(\eta)$  — однопараметрический интеграл Ферми.

Интеграл  ${}^0L_{3/2}(\eta, \beta)$  переходит в интеграл  $F_{3/2}(\eta)$  при  $\beta \rightarrow 0$ , т. е. в том случае, когда непараболичностью зоны можно пренебречь. В формуле (8) в аргументе интеграла  $F_{3/2}$  стоит  $(\eta - 3,35)$ , так как  $L$ -долина расположена выше  $\Gamma$ -долины по энергии на  $3,35kT$ .

В результате для  $T = 295$  К формулы (3), (4) и (8) преобразуются к следующему виду:

$$n_1 = 2,376 \cdot 10^{17} \cdot {}^0L_0^{3/2}(\eta, 0,0349); \quad (9)$$

$$\frac{m_1}{m_0} = 0,0550 \frac{{}^0L_0^{3/2}(\eta, 0,0349)}{{}^0L_{-1}^{3/2}(\eta, 0,0349)}; \quad (10)$$

$$n_2 = 7,900 \cdot 10^{18} \cdot F_{3/2}(\eta - 3,35). \quad (11)$$

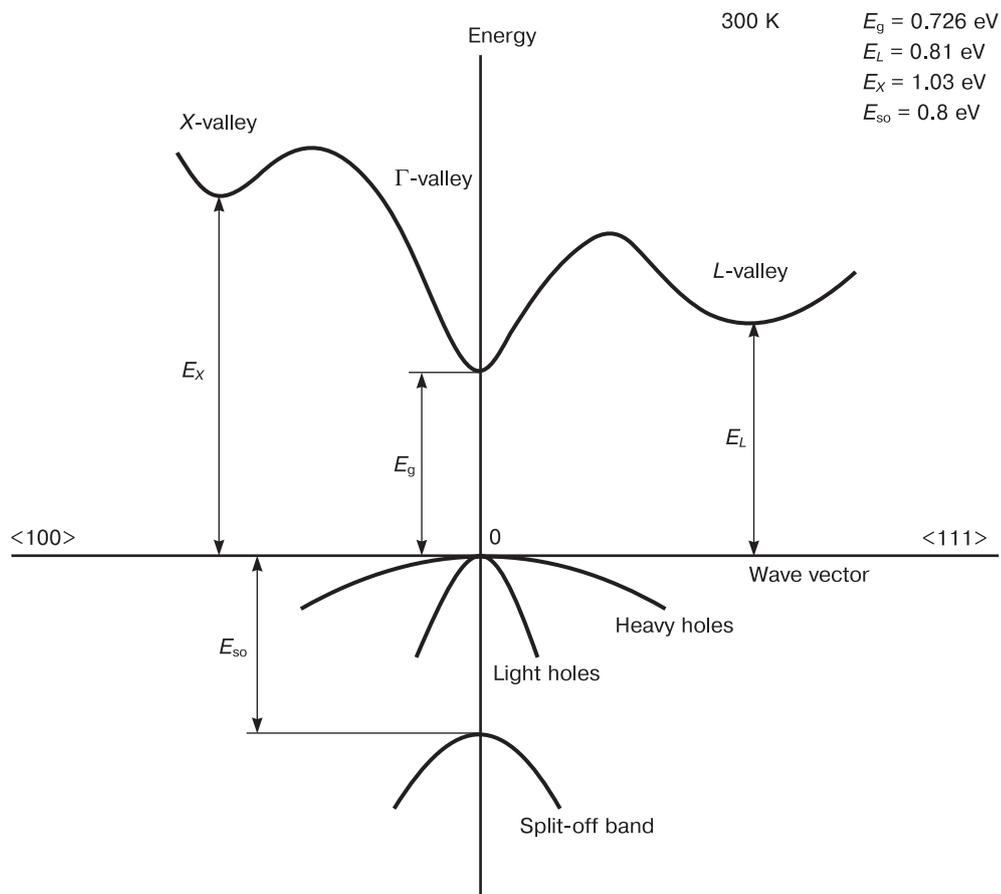


Рис. 1. Зонная структура GaSb [22]  
 Fig. 1. Band structure of GaSb [22]

Таблица 1 / Table 1

**Расчетные значения параметров для  $T = 295$  K**  
 Calculated parameters for  $T = 295$  K

$\eta$	${}^0L_0^{3/2}(\eta, 0,0349)$	${}^0L_{-1}^{3/2}(\eta, 0,0349)$	$n_1, \text{см}^{-3}$	$m_1/m_0$	$F_{3/2}(\eta - 3,35)$	$n_2, \text{см}^{-3}$
-4	0,02746	0,02341	$6,525 \cdot 10^{15}$	0,0645	$8,540 \cdot 10^{-4}$	$6,747 \cdot 10^{15}$
-3,5	0,04510	0,03843	$1,072 \cdot 10^{16}$	0,0646	$1,408 \cdot 10^{-3}$	$1,112 \cdot 10^{16}$
-3	0,07389	0,06293	$1,756 \cdot 10^{16}$	0,0646	$2,321 \cdot 10^{-3}$	$1,833 \cdot 10^{16}$
-2,5	0,1206	0,1026	$2,865 \cdot 10^{16}$	0,0646	$3,825 \cdot 10^{-3}$	$3,021 \cdot 10^{16}$
-2	0,1956	0,1662	$4,647 \cdot 10^{16}$	0,0647	$6,301 \cdot 10^{-3}$	$4,978 \cdot 10^{16}$
-1,5	0,3143	0,2665	$7,468 \cdot 10^{16}$	0,0649	$1,037 \cdot 10^{-2}$	$8,192 \cdot 10^{16}$
-1	0,4879	0,4209	$1,188 \cdot 10^{17}$	0,0651	$1,708 \cdot 10^{-2}$	$1,349 \cdot 10^{17}$
-0,5	0,7738	0,6512	$1,839 \cdot 10^{17}$	0,0654	$2,808 \cdot 10^{-2}$	$2,218 \cdot 10^{17}$
0	1,173	0,9805	$2,787 \cdot 10^{17}$	0,0658	$4,607 \cdot 10^{-2}$	$3,640 \cdot 10^{17}$
0,5	1,725	1,430	$4,098 \cdot 10^{17}$	0,0664	$7,537 \cdot 10^{-2}$	$5,954 \cdot 10^{17}$
1	2,455	2,012	$5,833 \cdot 10^{17}$	0,0671	0,1227	$9,693 \cdot 10^{17}$
1,5	3,379	2,732	$8,028 \cdot 10^{17}$	0,0680	0,1983	$1,566 \cdot 10^{18}$
2	4,506	3,588	$1,071 \cdot 10^{18}$	0,0691	0,3169	$2,504 \cdot 10^{18}$
3	7,378	5,669	$1,753 \cdot 10^{18}$	0,0716	0,7655	$6,047 \cdot 10^{18}$
4	11,07	8,178	$2,631 \cdot 10^{18}$	0,0745	1,653	$1,306 \cdot 10^{19}$

Далее, выполнив подстановку в формулы (9)—(11) значения  $\eta$  в диапазоне  $(-4,0 \div +4,0)$  можно вычислить перечисленные выше параметры (табл. 1).

Как видно из табл. 1, значения  $n_2$  всегда больше, чем  $n_1$ , причем эта разница возрастает по мере увеличения значений приведенного уровня Ферми. Так, для  $\eta = -4$ ,  $n_1 \approx n_2$ , тогда как для  $\eta = 2$ ,  $n_2/n_1 = 2,34$  (см. табл. 1). Иначе говоря, при  $n_1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  большинство электронов проводимости сосредоточено в  $L$ -зоне.

Перейдем теперь к статистике электронов при температуре жидкого азота ( $T = 77 \text{ К}$ ). Учитывая, что  $\beta = kT/E_g = 0,00829$  и  $\Delta E/kT = 13,3$ , формулы (3), (4) и (8) можно преобразовать как

$$n_1 = 3,649 \cdot 10^{16} \cdot {}^0L_0^{3/2}(\eta, 0,00829); \quad (12)$$

$$\frac{m_1}{m_0} = 0,064 \frac{{}^0L_0^{3/2}(\eta, 0,00829)}{{}^0L_{-1}^{3/2}(\eta, 0,00829)}; \quad (13)$$

$$n_2 = 1,053 \cdot 10^{18} \cdot F_{3/2}(\eta - 13,3); \quad (14)$$

Результаты расчетов по формулам (12)—(14) представлены в табл. 2.

Значение  $\eta = 13,3$  соответствует положению уровня Ферми у дна  $L$ -долины зоны проводимости.

Из табл. 2 видно, что, в отличие от  $T = 295 \text{ К}$ ,  $n_1$  всегда больше  $n_2$  (электроны проводимости сосредоточены в основном в  $\Gamma$ -долине). И только для  $n_1 \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  значения  $n_1$  и  $n_2$  оказываются одного порядка величины.

Обычно при расчетах значений концентрации и подвижности в  $n$ -GaSb используются следующие формулы (предполагается, что присутствуют электроны только одного типа):

$$\rho = (en\mu)^{-1}; \quad (15)$$

$$|R| = \frac{1}{ne}; \quad (16)$$

$$\mu = \frac{|R|}{\rho}. \quad (17)$$

Здесь  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление, Ом · см;  $R$  — коэффициент Холла,  $\text{см}^3/\text{Кл}$ ;  $\mu$  — под-

вижность электронов,  $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона (берется по абсолютной величине).

Такой подход справедлив в случае низких температур ( $T = 77 \text{ К}$ ) и абсолютно неприменим для  $T = 295 \text{ К}$ , когда электроны проводимости сосредоточены в основном в  $L$ -долине (см. табл. 1). В этом случае (два типа электронов проводимости) вместо формулы (16) для коэффициента Холла должна быть использована более сложная формула:

$$|R| = \frac{1}{e} \frac{n_1\mu_1^2 + n_2\mu_2^2}{(n_1\mu_1 + n_2\mu_2)^2}, \quad (18)$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — подвижности электронов в  $\Gamma$ - и  $L$ -долинах соответственно.

Введя безразмерный параметр  $b = \mu_1/\mu_2$ , характеризующий отношение подвижностей электронов в  $\Gamma$ - и  $L$ -долинах зоны проводимости, формулу (18) можно преобразовать к виду

$$|R| = \frac{1}{e} \frac{n_1b^2 + n_2}{(n_1b + n_2)^2}. \quad (19)$$

Значения  $n_1$  и  $n_2$  связаны между собой (см. формулы (3) и (8)), но значение параметра  $b$  неизвестно. Иначе говоря, используя при расчетах для  $T = 295 \text{ К}$  формулу (16) вместо правильной формулы (19), мы определяем некую «эффективную» концентрацию электронов, значение которой только по порядку величины совпадает с  $n_1$  и  $n_2$ .

### Образцы и методы исследования

Исследовали образцы  $n$ -GaSb, вырезанные из слитков, полученных модернизированным методом Чохральского. Исходные компоненты Ga и Sb (чистотой 6N) вместе с легирующей примесью (Te) помещали в кварцевый фильтрующий тигель, который устанавливали в рабочий тигель ростовой камеры. Синтез соединения GaSb проводили в фильтрующем тигле в атмосфере протока водорода при температуре  $\sim 800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Затем осуществляли фильтрацию расплава в рабочий тигель, после чего температуру снижали до  $714 \text{ }^\circ\text{C}$ . Монокристалл выращивали на затравку, ориентированную в кристаллографическом направлении [100], после чего

Таблица 2 / Table 2

Расчетные значения параметров  $n$ -GaSb при  $T = 77 \text{ К}$   
Calculated parameters for  $n$ -GaSb at  $T = 77 \text{ К}$

$\eta$	${}^0L_0^{3/2}(\eta, 0,00829)$	${}^0L_{-1}^{3/2}(\eta, 0,00829)$	$n_1, \text{ см}^{-3}$	$m_1/m_0$	$F_{3/2}(\eta - 13,3)$	$n_2, \text{ см}^{-3}$
2	3,927	3,702	$1,433 \cdot 10^{17}$	0,0648	$1,645 \cdot 10^{-5}$	$1,732 \cdot 10^{13}$
5	12,63	11,51	$4,609 \cdot 10^{17}$	0,0663	$3,303 \cdot 10^{-4}$	$3,478 \cdot 10^{14}$
8	25,58	22,39	$9,335 \cdot 10^{17}$	0,0690	$6,624 \cdot 10^{-3}$	$6,975 \cdot 10^{15}$
10	36,28	30,91	$1,324 \cdot 10^{18}$	0,0709	0,04840	$5,097 \cdot 10^{16}$
13,3	57,38	46,78	$2,094 \cdot 10^{18}$	0,0741	1,017	$1,071 \cdot 10^{18}$

Таблица 3 / Table 3

**Результаты электрофизических измерений**  
Results of electrical measurements

№ п/п	d, мм	$\rho, 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$		$ R , \text{ см}^3/\text{Кл}$		$N = 1/ R e, 10^{17} \text{ см}^{-3}$		$\mu =  R /\rho, 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		$n_{77}/n_{295}$
		295 К	77 К	295 К	77 К	295 К	77 К	295 К	77 К	
1	0,55	6,20	2,02	18,1	10,4	3,45	6,01	2,9	5,2	1,74
2	1,99	5,26	1,72	14,9	8,66	4,19	7,23	2,8	5,0	1,65
3	0,45	4,56	1,36	13,9	8,41	4,50	7,43	3,1	6,2	1,65
4	2,12	4,75	1,51	13,6	8,07	4,60	7,74	2,9	5,3	1,68
5	0,50	3,04	0,913	8,10	5,89	7,72	10,6	2,7	6,5	1,37
6	0,94	3,16	0,953	7,47	5,11	8,37	12,2	2,4	5,4	1,46
7	1,36	2,32	0,717	6,09	4,83	10,3	12,9	2,6	6,7	1,25
8	2,04	1,71	0,568	4,46	4,07	14,0	15,4	2,6	7,2	1,10

отжигали в зоне нагревателя. Режим отжига подбирали экспериментально.

Для проведения электрофизических измерений от верха и низа цилиндрической части монокристалла отрезали контрольные пластины, которые затем шлифовали на порошке М14 и подвергали обработке в полирующем травителе для удаления нарушенного слоя. После этого из пластин вырезали образцы с линейными размерами 10—15 мм. Толщина образцов изменялась в пределах  $d = 0,55 \div 2,04$  мм (см. табл. 3). Контакты припаивали с помощью флюса на плоскую поверхность образца; в качестве контактного материала использовали индий.

Два исследуемых образца размещали на противоположных сторонах двустороннего держателя; соединительные проволочки припаивали к соответствующим контактным площадкам держателя. Пенопластовый криостат, в который помещали держатель с образцами, располагался в зазоре между полюсами электромагнита. При заливке жидкого азота в криостат исследуемые образцы находились непосредственно в жидком азоте. Измерения проводили по стандартной четырехконтактной схеме (метод Ван-дер-Пау).

Значение удельного электрического сопротивления измеряли в отсутствие магнитного поля; при измерении эффекта Холла значение индукции магнитного поля составляло  $B = 0,5$  Тл, а значение силы тока через образец —  $I_{\text{обp}} = 200$  мА.

**Результаты и их обсуждение**

Результаты электрофизических измерений образцов  $n\text{-GaSb}$  при температуре  $T = 295$  и  $77$  К представлены в табл. 3. Образцы расположены в порядке возрастания значений концентрации электронов при  $T = 77$  К.

Как видно из табл. 3, значения  $1/|R|e$ , относящиеся к  $T = 77$  К, всегда больше, чем аналогичные при  $T = 295$  К, причем отношение  $n_{77}/n_{295}$  имеет тенденцию к убыванию при увеличении значений  $n_{77}$ . Выше уже упоминалось о том, что достоверными можно считать только данные, относящиеся к  $T = 77$  К; корректно интерпретировать результаты при  $T = 295$  К не представляется возможным.

Используя данные табл. 1 и 3, можно приблизительно оценить значения  $n_1$  и  $n_2$  при  $T = 295$  К, если известно значение  $n_1$  при  $T = 77$  К. Так, для образца 7 (см. табл. 3) значение  $n_{77} = 1,29 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а значение  $n = 1/|R|e$  при  $T = 295$  К составляет  $1,03 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Если считать, что и при  $T = 295$  К значение  $n_1$  останется таким же, то как видно из табл. 1, для  $E_F/kT = +2$   $n_1 \approx 1,07 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а  $n_2 \approx 2,50 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Следовательно,  $(n_1+n_2)_{295} \approx 3,57 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что заведомо больше  $n = 1/(Re)_{295} = 1,29 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Таким образом, кажущееся увеличение концентрации электронов при охлаждении образца на самом деле не имеет места.

В работах [6, 7] анализировали зависимости проводимости и коэффициента Холла от температуры и давления. Экспериментальные данные обрабатывали исходя из теоретической модели, включающей ряд упрощений, которые вряд ли можно считать приемлемыми. Например, не учитывалась кейновская непараболичность  $\Gamma$ -зоны; эффективная масса электронов в этой зоне считалась не зависящей ни от температуры, ни от энергии и принималась равной  $m_1 = 0,047m_0$ , что заметно меньше расчетных значений, приведенных в табл. 1 и 2.

Кроме того, суммарную концентрацию электронов в  $\Gamma$ - и  $L$ -зонах также считали не зависящей от температуры и принимали равной концентрации введенной в образец донорной примеси  $N_D$ , которую полагали полностью ионизованной во всем рассма-

триваемом интервале температур [6, 7]. Даже если принять этот сомнительный тезис за основу, все равно остается не ясным, откуда же взять значение  $N_D$ . В работе [26] показано, что концентрация легирующего элемента в GaSb растет по мере содержания его в шихте лишь до определенного предела, после чего остается неизменной. Следовательно, для корректной интерпретации холловских данных необходимо знать концентрацию теллура в данном конкретном образце, чего авторы работ [6, 7] не делали. Отметим, что в работе [27] показано, что суммарная концентрация электронов не является постоянной величиной и зависит от температуры.

В итоге для отношения подвижностей было получено значение  $b = 6$  для всего температурного интервала 77—300 К [6, 7]. Этот результат вряд ли можно считать достоверным, учитывая изложенные выше соображения. Наоборот, в работе [27] утверждается, что значение параметра  $b$  зависит от температуры и изменяется в пределах 5—21; в работе [28] приводится значение  $b = 16,7$ .

Отметим, что впервые значение  $m_1 = 0,047m_0$ , было получено авторами работы [5] для температур 1,5 и 4,2 К. В дальнейшем это или близкие к нему значения использовали многие авторы: от  $0,039m_0$  [9] до  $0,052m_0$  [8, 28]. При этом не принималась во внимание зависимость эффективной массы электронов в  $\Gamma$ -зоне от энергии и температуры. Расчеты по модели Кейна [23] (см. выше) дают совсем другие значения. Как видно из табл. 1 и 2, минимальное значение параметра  $m_1$  составляет  $0,0645m_0$  при  $T = 295$  К и  $0,0648m_0$  при  $T = 77$  К, т. е. расчетные значения  $m_1$  существенно превышают приведенные выше значения, полученные экспериментальным путем. Следовательно, изменяется и вся статистика свободных носителей заряда. Этот вопрос требует отдельного исследования.

В работе [29] для энергетического параметра

$$C = \frac{2m_0 P_{cv}^2}{3\hbar^2},$$

фигурирующего в теории Кейна [23],

приводится значение  $C = 20/3$  эВ, что соответствует значению  $P_{cv} = 8,73 \cdot 10^{-8}$  эВ · см, которое близко

к значению  $P_{cv} = 8,7 \cdot 10^{-8}$  эВ · см [25], выбранному нами для расчетов по формулам (3) и (4). Выше уже упоминалось, что значение параметра  $P_{cv}$  предполагается не зависящим ни от энергии, ни от температуры. С этим не согласны авторы работы [30], которые утверждают, что энергетический параметр  $C$  не является константой и для энергий 0,70—0,813 эВ изменяется в пределах 5,999—6,109, что в пересчете на параметр  $P_{cv}$  дает значения  $(8,28—8,35) \cdot 10^{-8}$  эВ · см.

В дальнейшем мы планируем провести специальное исследование для определения значения параметра  $b$  для каждого конкретного образца при комнатной температуре путем сопоставления данных оптических и электрических измерений. Для этого будут использованы представленные в настоящей работе расчеты.

### Заключение

Выполнены расчеты статистики электронов проводимости в  $\Gamma$ - ( $n_1$ ) и  $L$ -долинах ( $n_2$ ) зоны проводимости GaSb при 295 и 77 К.

Показано, что при  $T = 295$  К концентрация электронов в  $L$ -долине превосходит аналогичную величину в  $\Gamma$ -долине. Следовательно, при анализе данных электрофизических измерений необходимо учитывать наличие электронов двух типов. Корректное определение значений  $n_1$  и  $n_2$  при этом невозможно.

Показано также, что при  $T = 77$  К практически все электроны сосредоточены в  $\Gamma$ -зоне. Анализ холловских данных позволяет однозначно определить значения концентрации и подвижности электронов.

На серии образцов  $n$ -GaSb выполнены электрофизические измерения при комнатной температуре и температуре жидкого азота. Проведена оценка значений концентрации электронов в  $\Gamma$ - и  $L$ -зонах при  $T = 295$  К и показано, что кажущееся увеличение концентрации электронов при понижении температуры образца на самом деле не имеет места.

### Библиографический список

1. Белогорохов А.И., Белов А.Г., Петрович П.Л., Рашевская Е.П. Определение концентрации свободных носителей заряда в  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  с учетом затухания плазменных колебаний. *Оптика и спектроскопия*. 1987; 63(6): 1293—1296.
2. Белогорохов А.И., Белогорохова Л.И., Белов А.Г., Рашевская Е.П. Плазменный резонанс свободных носителей заряда и оценка некоторых параметров зонной структуры материала  $Cd_xHg_{1-x}Te$ . *Физика и техника полупроводников*. 1991; 25(7): 1196—1203. <https://journals.ioffe.ru/articles/23491>
3. Югова Т.Г., Белов А.Г., Каневский В.Е., Кладова Е.И., Князев С.Н. Сравнение результатов оптических и

электрофизических измерений концентрации свободных электронов в образцах  $n$ -GaAs, легированных теллуром *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2021; 24(1): 27—33. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-1-27-33>

4. Yugova T.G., Belov A.G., Kanevskii V.E., Kládova E.I., Knyasev S.N., Parfent'eva I.B. Comparison between results of optical and electrical measurements of free electron concentration in  $n$ -InAs specimens. *Modern Electronic Materials*. 2021; 7(3): 79—84. <https://doi.org/10.3897/jmoem.7.3.76700>

5. Zwerdling S., Lax B., Button K.J., Roth L.M. Oscillatory magneto-absorption in gallium antimonide JA-1149.

- Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1959; 9(3–4): 320—324.
6. Sagar A. Experimental investigation of conduction band of GaSb. *Physical Review Journals Archive*. 1960; 117(1): 93—100. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.117.93>
  7. Strauss A.J. Electrical properties of  $n$ -type GaSb. *Physical Review Journals Archive*. 1961; 121(4): 1087—1090. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.121.1087>
  8. Sun R.-Y., Becker W.M. Band inversion and transport properties of L minima in  $n$ -GaSb(Te). *Physical Review B*. 1974; 10: 3436—3450. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.3436>
  9. Kourkoutas C.D., Bekris P.D., Papaioannou G.J., Euthymiou P.C. Transport parameters of  $n$ -type GaSb. *Solid State Communications*. 1984; 49(11): 1071—1075. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(84\)90426-5](https://doi.org/10.1016/0038-1098(84)90426-5)
  10. Johnson G.R., Cavenett B.C., Kerr T.M., Kirby P.B., Wood C.E.C. Optical, Hall and cyclotron resonance measurements of GaSb grown by molecular beam epitaxy. *Semiconductor Science and Technology*. 1988; 3(12): 1157—1165. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/3/12/002>
  11. Lee M.E., Poole I., Truscott W.S., Cleverly I.R., Rohlfing D.M. A detailed Hall-effect analysis of sulfur-doped gallium antimonide grown by molecular-beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*. 1990; 68(1): 131—137. <https://doi.org/10.1063/1.347098>
  12. Chin V.W.L. Electron mobility in GaSb. *Solid-State Electronics*. 1995; 38(1): 59—67. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(94\)E0063-K](https://doi.org/10.1016/0038-1101(94)E0063-K)
  13. Dmitriev A.P., Mikhailova M.P., Yassievich I.N. Impact ionization in  $A^{III}B^V$  semiconductors in high electric fields. *Physica Status Solidi (b)*. 1987; 140: 9—37. <https://doi.org/10.1002/PSSB.2221400102>
  14. Горелик С.С., Дашевский М.Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. М.: МИСиС; 2003. 480 с.
  15. Maslar J.E., Hurst W.S., Wang C.A. Spectroscopic determination of electron concentration in  $n$ -type GaAs. *Journal of Applied Physics*. 2008; 104(10): 103521—103527. <https://doi.org/10.1063/1.3021159>
  16. Mitchel W.C., Elhamri S., Haugan H.J., Berney R., Shin Mou, Brown G.J. Electrical properties of  $n$ -type GaSb substrates and  $p$ -type GaSb buffer layers for InAs/InGaSb superlattice infrared detectors. *AIP Advances*. 2015; 5(9): 097219. <https://doi.org/10.1063/1.4932208>
  17. Curran A., Gity F., Gocalinska A., Mura E., Nagle R.E., Schmidt M., Sheehan B., Pelucchi E., O'Dwyer C., Hurley P.K. High hole mobility polycrystalline GaSb thin films. *Crystals*. 2021; 11(11): 1348—1357. <https://doi.org/10.3390/cryst11111348>
  18. Dutta P.S., Bhat H.L., Kumar V. The physics and technology of gallium antimonide: An emerging optoelectronic material. *Journal of Applied Physics*. 1997; 81(9): 5821—5870. <https://doi.org/10.1063/1.36535610.1063/1.365356>
  19. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*. 2001; 89(11): 5815—5875. <https://doi.org/10.1063/1.1368156>
  20. Куницын А.Е., Мильвидская А.Г., Мильвидский М.Г., Чалдышев В.В. Свойства легированных теллуридом монокристаллов антимонида галлия, выращенных из нестехиометрического расплава. *Физика и техника полупроводников*. 1997; 31(8): 947—949.
  21. Хвостиков В.П., Сорокина С.В., Потапович Н.С., Хвостикова О.А., Власов А.С., Ракова Е.П., Андреев В.М. *Физика и техника полупроводников*. 2008; 42(10): 1198—1205.
  22. New semiconductor materials. Biology systems. Characteristics and properties. Band structure and carrier concentration of gallium antimonide (GaSb). <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaSb/bandstr.html> (дата обращения: 20.03.2022).
  23. Kane E.O. Band structure of indium antimonide. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1957; 1(4): 249—261. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(57\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0022-3697(57)90013-6)
  24. Равич Ю.И., Ефимова Б.А., Смирнов И.А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS; под ред. Л.С. Стильбанса. М.: Наука; 1968. 384 с.
  25. Маделунг О. Физика полупроводниковых соединений элементов III-V групп; пер. с англ. М.: Мир; 1967. 480 с.
  26. Глазов В.М., Глаголева Н.Н., Грязева Н.Л. Концентрационная зависимость числа носителей заряда при простом и сложном легировании антимонида галлия и ее взаимосвязь с пределом растворимости. *Физика и техника полупроводников*. 1976; 10(5): 882—888.
  27. Harland H.B., Woolley J.C. Conduction band of GaSb. *Canadian Journal of Physics*. 1966; 44(11): 2715—2728. <https://doi.org/10.1139/p66-221>
  28. Becker W.M., Ramdas A.K., Fan H.Y. Energy band structure of gallium antimonide. *Journal of Applied Physics*. 1961; 32(10): 2094—2102. <https://doi.org/10.1063/1.1777023>
  29. Wolf H.F. *Semiconductors*. NY, USA: Wiley-Interscience; 1971. 552 p.
  30. Sharma A.C., Ravindra N.M., Auluck S., Srivastava V.K. Temperature-dependent effective masses in III-V compound semiconductors. *Physica Status Solidi (b)*. 1983; 120(2): 715—721. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221200231>

### References

1. Belogorokhov A.I., Belov A.G., Petrovitch P.L., Rashevskaya E.P. Determination of the concentration of free charge carriers in  $Pb_{1-x}Sn_xTe$  taking into account the damping of plasma oscillations. *Optics and Spectroscopy*, 1987; 63(6): 1293—1296. (In Russ.)
2. Belogorokhov A.I., Belogorokhova L.I., Belov A.G., Rashevskaya E.P. Plasma resonance of free charge carriers and estimation of some parameters of the band structure of the material  $Cd_xHg_{1-x}Te$ . *Semiconductors*. 1991; 25(7): 1196—1203. (In Russ.)
3. Yugova T.G., Belov A.G., Kanevskii V.E., Kladova E.I., Knyazev S.N. Comparison of the results of optical and electrophysical measurements of free electron density in  $n$ -GaAs samples doped with tellurium. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(1): 27—33. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-1-27-33>
4. Yugova T.G., Belov A.G., Kanevskii V.E., Kladova E.I., Knyazev S.N., Parfent'eva I.B. Comparison between results of optical and electrical measurements of free electron concentration in  $n$ -InAs specimens. *Modern Electronic Materials*. 2021; 7(3): 79—84. <https://doi.org/10.3897/jmoem.7.3.76700>

5. Zwerdling S., Lax B., Button K.J., Roth L.M. Oscillatory magneto-absorption in gallium antimonide JA-1149. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1959; 9(3-4): 320—324.
6. Sagar A. Experimental investigation of conduction band of GaSb. *Physical Review Journals Archive*. 1960; 117(1): 93—100. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.117.93>
7. Strauss A.J. Electrical properties of *n*-type GaSb. *Physical Review Journals Archive*. 1961; 121(4): 1087—1090. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.121.1087>
8. Sun R.-Y., Becker W.M. Band inversion and transport properties of L minima in *n*-GaSb(Te). *Physical Review B*. 1974; 10: 3436—3450. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.10.3436>
9. Kourkoutas C.D., Bekris P.D., Papaioannou G.J., Euthymiou P.C. Transport parameters of *n*-type GaSb. *Solid State Communications*. 1984; 49(11): 1071—1075. [https://doi.org/10.1016/0038-1098\(84\)90426-5](https://doi.org/10.1016/0038-1098(84)90426-5)
10. Johnson G.R., Cavenett B.C., Kerr T.M., Kirby P.B., Wood C.E.C. Optical, Hall and cyclotron resonance measurements of GaSb grown by molecular beam epitaxy. *Semiconductor Science and Technology*. 1988; 3(12): 1157—1165. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/3/12/002>
11. Lee M.E., Poole I., Truscott W.S., Cleverly I.R., Rohlfing D.M. A detailed Hall-effect analysis of sulfur-doped gallium antimonide grown by molecular-beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*. 1990; 68(1): 131—137. <https://doi.org/10.1063/1.347098>
12. Chin V.W.L. Electron mobility in GaSb. *Solid-State Electronics*. 1995; 38(1): 59—67. [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(94\)E0063-K](https://doi.org/10.1016/0038-1101(94)E0063-K)
13. Dmitriev A.P., Mikhailova M.P., Yassievich I.N. Impact ionization in  $A^{III}B^V$  semiconductors in high electric fields. *Physica Status Solidi (b)*. 1987; 140: 9—37. <https://doi.org/10.1002/PSSB.2221400102>
14. Gorelik S.S., Dashevskii M.Ya. Materials science of semiconductors and dielectrics. Moscow: MISiS; 2003. 480 p. (In Russ.)
15. Maslar J.E., Hurst W.S., Wang C.A. Spectroscopic determination of electron concentration in *n*-type GaAs. *Journal of Applied Physics*. 2008; 104(10): 103521—103527. <https://doi.org/10.1063/1.3021159>
16. Mitchel W.C., Elhamri S., Haugan H.J., Berney R., Shin Mou, Brown G.J. Electrical properties of *n*-type GaSb substrates and *p*-type GaSb buffer layers for InAs/InGaSb superlattice infrared detectors. *AIP Advances*. 2015; 5(9): 097219. <https://doi.org/10.1063/1.4932208>
17. Curran A., Gity F., Gocalinska A., Mura E., Nagle R.E., Schmidt M., Sheehan B., Pelucchi E., O'Dwyer C., Hurley P.K. High hole mobility polycrystalline GaSb thin films. *Crystals*. 2021; 11(11): 1348—1357. <https://doi.org/10.3390/cryst11111348>
18. Dutta P.S., Bhat H.L., Kumar V. The physics and technology of gallium antimonide: An emerging optoelectronic material. *Journal of Applied Physics*. 1997; 81(9): 5821—5870. <https://doi.org/10.1063/1.36535610.1063/1.365356>
19. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*. 2001; 89(11): 5815—5875. <https://doi.org/10.1063/1.1368156>
20. Kunitsyn A.E., Chaldyshev V.V., Mil'vidskaya A.G., Mil'vidskii M.G. Properties of tellurium-doped gallium antimonide single crystals grown from nonstoichiometric melt. *Semiconductors*. 1997; 31(8): 806—808. (In Russ.)
21. Khvostikov V.P., Sorokina S.V., Potapovich N.S., Khvostikova O.A., Vlasov A.S., Rakova E.P., Andreev V.M. Examination of properties of epitaxial and bulk gallium antimonide. *Semiconductors*. 2008; 42(10): 1179—1186. (In Russ.)
22. New semiconductor materials. Biology systems. Characteristics and properties. Band structure and carrier concentration of gallium antimonide (GaSb). <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaSb/bandstr.html> (accessed on 20.03.2022).
23. Kane E.O. Band structure of indium antimonide. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1957; 1(4): 249—261. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(57\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0022-3697(57)90013-6)
24. Stil'bans L.S., ed. Ravich Yu.I., Efimova B.A., Smirnov I.A. Methods for studying semiconductors as applied to lead chalcogenides PbTe, PbSe, PbS. Moscow: Nauka; 1968. 384 p. (In Russ.)
25. Madelung O. Physics of III-V compounds. J. Wiley; 1964. 409 p. (Russ. transl.: Madelung O. Fizika poluprovodnikovykh soedinenii elementov III-V grupp. Moscow: Mir; 1967. 480 p.)
26. Glazov V.M., Glagoleva N.N., Gryazeva N.L. Concentration dependence of the number of charge carriers with simple and complex doping of gallium antimonide and its relationship with the solubility limit. *Semiconductors*. 1976; 10(5): 882—888. (In Russ.)
27. Harland H.B., Woolley J.C. Conduction band of GaSb. *Canadian Journal of Physics*. 1966; 44(11): 2715—2728. <https://doi.org/10.1139/p66-221>
28. Becker W.M., Ramdas A.K., Fan H.Y. Energy band structure of gallium antimonide. *Journal of Applied Physics*. 1961; 32(10): 2094—2102. <https://doi.org/10.1063/1.1777023>
29. Wolf H.F. Semiconductors. NY, USA: Wiley-Interscience; 1971. 552 p.
30. Sharma A.C., Ravindra N.M., Auluck S., Srivastava V.K. Temperature-dependent effective masses in III-V compound semiconductors. *Physica Status Solidi (b)*. 1983; 120(2): 715—721. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221200231>

### Информация об авторах / Information about the authors

**Пархоменко Юрий Николаевич** — доктор физ.-мат. наук, научный руководитель; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9867>; e-mail: parkh@rambler.ru

**Yuri N. Parkhomenko** — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Scientific Consultant; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2-1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; National University of Science and Technology MISiS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-9867>; e-mail: parkh@rambler.ru

**Белов Александр Георгиевич** — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», ул. Электродная, д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; e-mail: IADenisov@rosatom.ru

**Молодцова Елена Владимировна** — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-9524>; e-mail: evmol@bk.ru

**Козлов Роман Юрьевич** — начальник лаборатории; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; e-mail: RYKozlov@rosatom.ru

**Кормилицина Светлана Сергеевна** — младший научный сотрудник; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2741-556X>; e-mail: kormilicina\_0796@mail.ru

**Журавлев Евгений Олегович** — студент-практикант; АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация

**Aleksandr G. Belov** — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Leading Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2-1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; e-mail: IADenisov@rosatom.ru

**Elena V. Molodtsova** — Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2-1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-9524>; e-mail: evmol@bk.ru

**Roman Yu. Kozlov** — Head of the Laboratory; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2-1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; e-mail: RYKozlov@rosatom.ru

**Svetlana S. Kormilitsina** — Junior Researcher; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2-1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2741-556X>, e-mail: kormilicina\_0796@mail.ru

**Evgeny O. Zhuravlev** — Trainee Student; Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2-1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; National University of Science and Technology MISIS, 4-1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation

*Поступила в редакцию 17.11.2022; поступила после доработки 12.12.2022; принята к публикации 18.01.2023  
Received 17 November 2022; Revised 12 December 2022; Accepted 18 January 2023*