

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$

©2019 Е. А. Михайлюк<sup>1</sup>, Т. В. Прокопова<sup>2</sup>, Д. А. Жукалин\*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Старооскольский технологический институт имени А.А. Угарова (филиал)

Национального исследовательского технологического университета МИСиС

м-н Макаренко, 42, 309500 Старый Оскол, Белгородская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия  
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

ул. Старых Большевиков, 54 «А», 394064 Воронеж, Российская Федерация

<sup>3</sup>Воронежский государственный университет Университетская пл., 1, 394018 Воронеж, Российская Федерация

**Аннотация.** Методом вольт-фарадных характеристик исследованы тонкие (~ 1 мкм) преднамеренно нелегированные слои  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ , выращенные методом МВЕ на полуизолирующей подложке InP. Показано, что исследованные при комнатной температуре слои  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  имеют  $n$  – тип проводимости. При экспериментальном исследовании температурных зависимостей дифференциальной проводимости обнаружен центр локализации заряда, эффективное значение энергии которого находится в запрещенной зоне твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  ( $x \approx 0.5$ ,  $E_g = 1.5$  эВ) и составляет ~ 0.49 эВ до верха зоны проводимости твердого раствора.

**Ключевые слова:** твердые растворы, центр локализации заряда, дифференциальная проводимость, емкость.

### ВВЕДЕНИЕ

Модулированно-легированные гетероструктуры на основе твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  широко применяются в микро- и оптоэлектронике сверхвысокочастотного диапазона [1, 2] для широкополосной беспроводной связи (спутниковой, мобильной, специальной), а также в вычислительных логических схемах [3, 4]. Благодаря прогрессу технологии эпитаксиального роста активно появляются новые типы полупроводниковых гетероструктур и проводятся модификации существующих конструкций. Целью настоящей работы является изучение электронных процессов на границе раздела в структурах с тонкими слоями полупроводников со стехиометрическими вакансиями.

### ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОЙ СТРУКТУРЫ

В работе исследуется одиночный слой  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  толщиной около 1  $\mu\text{m}$  (удалено при проведении технологических процедур изготовления контактов – 0.08  $\mu\text{m}$ ), выращенный в Новосибирском Институте физики полупроводников СО РАН методом моле-

кулярно-лучевой эпитаксии на полуизолирующей подложке InP. Средний состав твердого раствора образцов  $x$  по данным рентгеновской дифракции порядка 0.490 и 0.5235, что должно обеспечивать хорошее соответствие постоянных кристаллических решеток в гетероструктуре  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  и возможность формирования гетероперехода с качественной границей раздела.

Так как InAs и AlAs относятся к полупроводникам с кристаллической структурой типа сфалерит [5], то с помощью модельного расчета методом интерполяционных схем рассчитывается ширина запрещенной зоны твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  (табл. 1). В работе [6] доказано, что для параметра решетки твердых растворов  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  выполняется эмпирическое правило Vegarda, т. е. при заданной температуре существует линейная зависимость между  $\alpha_0$  постоянной кристаллической решетки твердого раствора  $A_xB_{1-x}$  и составом  $x$ . Лучшее соответствие твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  с параметром решетки InP ( $\alpha_0 = 5.8690 \text{ \AA}$ ) возникает при  $x \approx 0.5$  [5, 7].

В табл. 1 приведены значения ширины запрещенной зоны для бинарных соединений AlAs и InAs из работ [5, 7] и цитированной в них литера-

✉ Жукалин Дмитрий Алексеевич\*,  
e-mail: d.zhukalin@mail.ru

**Таблица 1.** Параметры зонной структуры для расчета методом интерполяционных схем  
 [Table 1. Parameters of the band structure for the calculation by the method of interpolation schemes]

	InAs	AlAs	$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$		InP
			$x \approx 0.5235$	$x \approx 0.490$	
$\alpha_0, \text{Å}$	6.0583	5.6614	5.8610		5.8690
$E_g(T=0 \text{ K}), \text{эВ}$ [ $E_g(T=0 \text{ K}), \text{eV}$ ]	0.417	3.010	1.535		1.424
$E_g(T=300 \text{ K}), \text{эВ}$ [ $E_g(T=300 \text{ K}), \text{eV}$ ]	0.360	2.914	1.395	1.452	1.353
$\alpha, \text{мэВ/К}$ [ $\alpha, \text{meV/K}$ ]	0.276	0.885	–	–	0.363
$\beta, \text{К}$	93	530	–	–	162

туре. Ширина запрещенной зоны твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  может быть рассчитана с учетом квадратичных членов по параметру  $x$ :

$$E_{gAB}(x) = x \cdot E_{gA} + (1-x) \cdot E_{gB} - c \cdot x \cdot (1-x), \quad (1)$$

где  $E_{gA}$  и  $E_{gB}$  – ширина запрещенной зоны соединений А и В при температуре ( $T = 300 \text{ K}$ ),  $c = 0.72$  – параметр изгиба зон.

Температурная зависимость ширины запрещенной зоны описывается эмпирическим выражением Варшни:

$$E_g(T=300) = E_g(T=0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (2)$$

где  $E_g(T=0)$  – ширина запрещенной зоны при  $T \rightarrow 0 \text{ K}$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры бинарных соединений, определяющие ширину запрещенной зоны [5, 7].

### ЭКСПЕРИМЕНТ

На образцы со стороны эпитаксиального слоя нанесены контакты Ge/Au/Ni/Au к объему слоя, прошедшие отжиг для формирования омического контакта, и барьерные контакты Ti/Au. Измерения ВФХ гетероструктур  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  проводились на частотах тестового сигнала в диапазоне от  $10^3$  до  $10^6 \text{ Hz}$  при комнатной температуре. Результаты измерений демонстрируют выраженную модуляцию зарядовой области при частотах тестового сигнала  $10^4$ – $10^5 \text{ Hz}$ . На меньших значениях частоты прояв-

ляются сквозные токи утечки. Экспериментальные данные, регистрируемые самописцем, были обработаны и переведены в цифровые значения.

На рис. 1 представлены  $C$ – $V$  кривые, полученные при частоте тестового сигнала  $10^4 \text{ Hz}$ . Их дальнейшее исследование проводилось в формате  $1/C^2(V)$ . Следует отметить, что наклон на всех зависимостях  $1/C^2(V)$  является постоянным, то есть в области обеднения график представляет прямую линию, что свидетельствует о постоянстве концентрации носителей заряда.

Известная методика по наклону линейного участка зависимостей  $1/C^2(V)$  [8] позволяет оценить значение концентрации примеси на границе области объемного заряда (табл. 2):

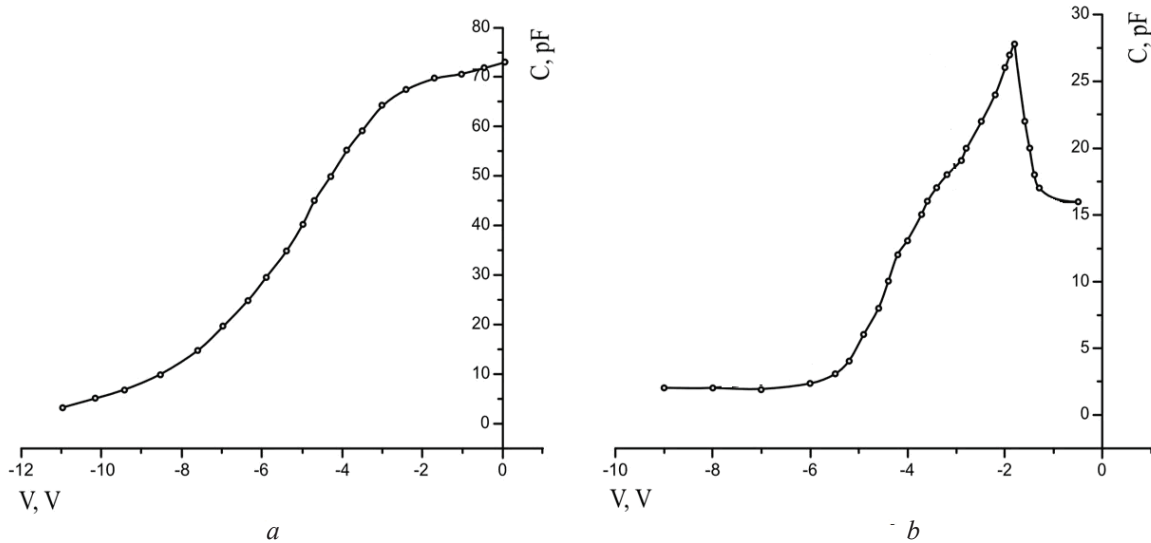
$$N = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[ -\frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right]. \quad (4)$$

При расчете используется диэлектрическая проницаемость среды, соответствующая значению для InP, так как дебаевская длина экранирования в данных структурах превышает толщину слоя твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ .

Для образца  $x \approx 0.490$  значения концентрации носителей заряда оказываются близкими, а для образца  $x \approx 0.5235$  не соответствуют определенной ранее методом Холла (в лаборатории РАН). Можно предположить, что данный факт объясняется зна-

**Таблица 2.** Оценка концентрации примеси исследуемых образцов  
 [Table 2. Estimation of the impurity concentration of the studied samples]

$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$	$N, \text{см}^{-3}$		проводимость [conductivity]
	[ $N, \text{cm}^{-3}$ ]		
образец $x \approx 0.5$ [sample]	ВФХ [ $C$ – $V$ ]	метод Холла [Hall method]	$n$ -тип [ $n$ -type]
0.5235	$1.85 \cdot 10^{15}$	$5.20 \cdot 10^{16}$	
0.490	$8.21 \cdot 10^{15}$	$6.01 \cdot 10^{15}$	



**Рис. 1.** Вольт-фарадные характеристики гетероструктур  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ , измеренные на частоте  $10^4$  Гц: образец  $x \approx 0.490$  (a), образец  $x \approx 0.5235$  (b)

[**Fig. 1.** Volt-farad characteristics of  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  heterostructures measured at a frequency of  $10^4$  Hz: sample  $x \approx 0.490$  (a), sample  $x \approx 0.5235$  (b)]

чительными токами утечки и сопутствующим искажением низкочастотной  $C$ - $V$  характеристики, для которой производился расчет концентрации.

Эффективный центр энергетического распределения плотности поверхностного состояния (ПС) оценивается по экспериментальным температурным зависимостям дифференциальной проводимости [9, 10], измеренным на различных частотах тестового сигнала ( $f = 10^3$ - $10^4$ ) Hz по формуле:

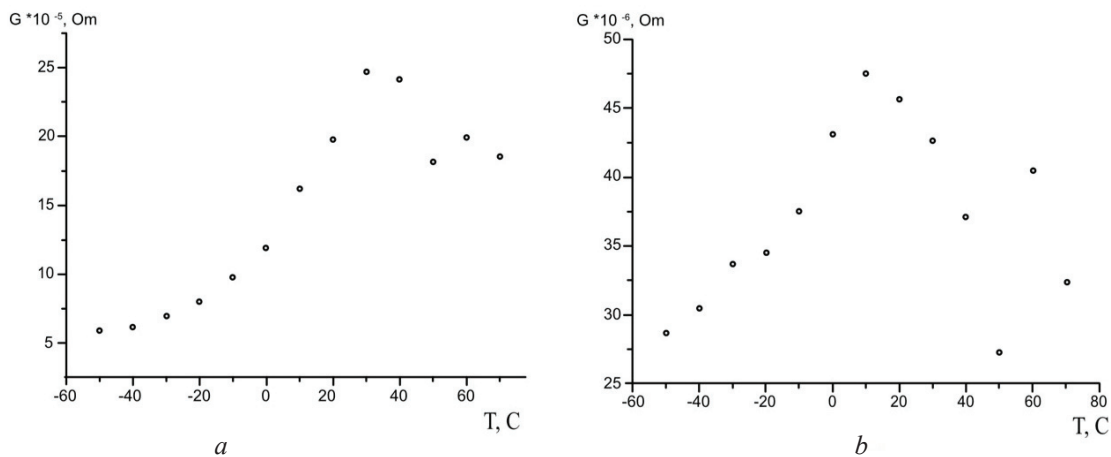
$$\Delta E = \frac{kT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{f_1}{f_2}, \quad (5)$$

где  $\Delta E$  энергия, соответствующая максимуму в распределении ПС по энергии,  $T_i$  ( $T_1, T_2$ ) – темпе-

ратура максимума зависимости  $G(T)$  при частоте  $f_i$  ( $f_1, f_2$ ).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что на зависимостях  $G(T)$  наблюдается максимум кривой, оценка параметров ( $T_p, f_p$ ) которого по формуле (5) соответствует значению энергии  $\approx 0.49$  eV. При увеличении частоты тестового сигнала максимум смещается в область более высоких температур, а при значениях  $10^6$  Hz совсем пропадает, предположительно из-за наложения сквозного тока дифференциальной проводимости. В связи с этим делается заключение, что наличие характерного максимума кривой связано



**Рис. 2.** Температурные зависимости дифференциальной проводимости  $G(T)$  при различных частотах ( $f$ ): (a)  $2.47 \cdot 10^4$  Гц, (b)  $4.59 \cdot 10^3$  Гц

[**Fig. 2.** Temperature dependences of the differential conductivity  $G(T)$  at various frequencies ( $f$ ): (a)  $2.47 \cdot 10^4$  Hz, (b)  $4.59 \cdot 10^3$  Hz]

с параметром центра донорного типа, обуславливающего явление токопрохождения в слое и при положительном, и при отрицательном потенциале на контакте.

Таким образом, проведенные электрофизические исследования показывают, что в исследованной гетероструктуре  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  наблюдается модуляция пространственного заряда, а процессы токопрохождения связаны с наличием в запрещенной зоне твердого раствора  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  глубокого центра, эффективная энергия которого  $\approx 0.49$  eV.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность всему коллективу Новосибирского Института физики полупроводников СО РАН, лично Гилинскому Александру Михайловичу за предоставленные образцы и Воронежскому государственному университету инженерных технологий за плодотворное обсуждение полученных экспериментальных результатов.

UDC 53.082.72

<https://doi.org>

For citation:

Received 31.01.2019

Accepted 15.02.2019

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yamashita Y., Endoh A., Shinohara K., Hikosaka K., Matsui T., Hiyamizu S., Mimura T. *IEEE Electron Device Letters*, 2002, vol. 23, iss. 10, p. 573. DOI: 10.1109/led.2002.802667
2. Chang E.-Y., Kuo C.-I., Hsu H.-T., Chiang C.-Y., Miyamoto Y. // *Applied Physics Express*, 2013, vol. 6, iss. 3, p. 34001. DOI: 10.7567/apex.6.034001
3. del Alamo J. A. // *Nature*, 2011, vol. 479, pp. 317–323. DOI: 10.1038/nature10677
4. Stillman W. J., Shur. M. S. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2007, vol. 2, № 3, pp. 209–221. DOI: 10.1166/jno.2007.301
5. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. Wiley, 2009, p. 422.
6. Denton A. R., Ashcroft N. W. // *Phys. Rev. A.*, 1991, vol. 43, iss. 6, pp. 3161–3164. DOI: 10.1103/physreva.43.3161
7. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. // *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 89, iss. 11, pp. 5815–5875. DOI: 10.1063/1.1368156
8. Зи С. *Физика полупроводниковых приборов*. Т. 1. М: Мир, 1984, с.453.
9. Casey H. C., Cho A. Y., Lang D. V., Nicollian E. H., Foy P. W. // *J. Appl. Phys.*, 1979, vol. 50, iss. 5, pp. 3484–3491. DOI: 10.1063/1.326343
10. Forrest S. R., Kim O. K. // *J. Appl. Phys.*, 1982, vol. 53, iss. 8, pp. 5738. DOI: 10.1063/1.331462

## ELECTROPHYSICAL MEASUREMENTS SOLID SOLUTIONS OF $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$

© 2019 E. A. Mikhailiuk<sup>1</sup>, T. V. Prokopova<sup>2</sup>, D. A. Zhukalin<sup>\*3</sup>

<sup>1</sup>*Stary Oskol Technological Institute named after A. A. Ugarov (branch) of National research technological University MISIS 42, district them. Makarenko, 309500 Stary Oskol, Belgorod region, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Military Training and Research Center Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin” 54a, Starykh Bol’shevikov str., 394064 Voronezh, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Voronezh State University 1, Universitetskaya pl., 394018 Voronezh, Russian Federation*

### Abstract

**Purpose.** Layers of  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ , grown at the Novosibirsk Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science that are deliberately unalloyed by means of the MBE method on a semi-insulating substrate InP are widely used in micro- and optoelectronics of the microwave range [1, 2] for broadband wireless communication (satellite, mobile), as well as in

✉ Zhukalin Dmitry A., e-mail: d.zhukalin@mail.ru

computational logic circuits [3, 4]. The average composition of the solid solution  $x$ , according to x-ray diffraction is 0.490 and 0.5235 (sample C2159 and C2100, respectively), which provides for a good correspondence of the crystal lattice constants in the heterostructure  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  and the possibility of forming a heterojunction with a qualitative interface. The main purpose of this paper is to study the structure of  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  at room temperature.

Since InAs and AlAs are semiconductors with crystal structure of sphalerite type [5], the width of the band gap of solid solution  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  is calculated using the model calculation method of interpolation schemes. In [6] it is proved that the empirical Vegard's law is satisfied for the lattice parameter of solid solutions  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ . The best correspondence of the solid solution  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  with the lattice parameter InP ( $\alpha_0 = 5.8690$ ) occurs when the composition value is  $x \approx 0.5$  [5, 7].

The paper uses the band gap values for binary compounds AlAs and InAs from [5, 7] and the references provided in them. The temperature dependence of the band gap is described by Varshni's empirical expression.

**Methods and methodology.** Ge/Au/Ni/Au contacts, annealed to the form a ohmic contact, and Ti/Au barrier contacts were applied to the epitaxial layer of the samples.  $C$ - $V$  curves of heterostructures  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$  were measured at frequencies of the test signal in the range of  $10^3$ – $10^6$  Hz at room temperature. The measurement results demonstrate a pronounced modulation of the charge region with frequencies of the test signal at  $10^4$ – $10^5$  Hz. At lower frequencies a steady leakage currents appear.

The paper presents the  $C$ - $V$  curves obtained at different frequencies of the test signal. They were further studied in the format of  $1/C^2(V)$ . It should be noted that the slopes on all the dependences of  $1/C^2(V)$  are constant, that is, in the depletion region the graph represents a straight line, which indicates a constant concentration of charge carriers [8].

**Results.** The effective centre of the energy distribution of the surface state density was estimated using the experimental temperature dependences of the differential conductivity [9, 10]. The maximum curve, whose estimate corresponds to the energy value of 0.49 eV, was observed for the dependences of  $G(T)$ . As the frequency of the test signal increases, the maximum shifts to higher temperatures. At  $10^6$  Hz it completely disappears, presumably due to the application of the through current of differential conductivity. We may thus conclude that the presence of the characteristic maximum of the curve is associated with the parameter of the donor-type centre that causes the phenomenon of current flow in the layer with both positive and negative potential on the contact.

**Conclusion.** The electrophysical study shows that a modulation of the spatial charge occurs in the heterostructure  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ , and the processes of current passage are associated with the presence in the band gap of a solid solution  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$  of a deep centre with effective energy is 0.49 eV.

**Keywords:** solid solutions, charge localization center, differential conductivity, capacity.

## CONFLICT OF INTEREST

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors express their sincere gratitude to all the staff of the Novosibirsk Institute of semiconductor physics Siberian Branch Russian Academy of Sciences, personally Gilinsky Alexander Mikhailovich for the samples and Voronezh state University of engineering technologies for the fruitful discussion of the experimental results.

## REFERENCES

1. Yamashita Y., Endoh A., Shinohara K., Hikosaka K., Matsui T., Hiyamizu S., Mimura T. *IEEE Electron Device Letters*, 2002, vol. 23, iss. 10, p. 573. DOI: 10.1109/led.2002.802667
2. Chang E.-Y., Kuo C.-I., Hsu H.-T., Chiang C.-Y., Miyamoto Y. *Applied Physics Express*, 2013, vol. 6, iss. 3, p. 34001. DOI: 10.7567/apex.6.034001
3. del Alamo J. A. *Nature*, 2011, vol. 479, pp. 317–323. DOI: 10.1038/nature10677
4. Stillman W. J., Shur. M. S. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2007, vol. 2, no. 3, pp. 209–221. DOI: 10.1166/jno.2007.301
5. Adachi S. *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors*. Wiley, 2009, p. 422.
6. Denton A. R., Ashcroft N. W. *Phys. Rev. A.*, 1991, vol. 43, iss. 6, pp. 3161–3164. DOI: 10.1103/physreva.43.3161
7. Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R. *J. Appl. Phys.*, 2001, vol. 89, iss. 11, pp. 5815–5875. DOI: 10.1063/1.1368156
8. Sze S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, 1969, 2nd Ed. 1981, 868 p.



9. Casey H. C., Cho A. Y., Lang D. V., Nicollan E. H., Foy P. W. *J. Appl. Phys.*, 1979, vol. 50, iss. 5, pp. 3484–3491. DOI: 10.1063/1.326343

10. Forrest S. R., Kim O. K. *J. Appl. Phys.*, 1982, vol. 53, iss. 8, pp. 5738. DOI: 10.1063/1.331462

---

*Михайлюк Екатерина Андреевна* – к. ф.-м. н, доцент кафедры автоматизированных и информационных систем управления, Старооскольский технологический институт имени А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета МИСиС, Старый Оскол, Белгородская обл., Российская Федерация; e-mail: gazon1978@yandex.ru. ORCID iD 0000-0002-3130-1063.

*Прокопова Татьяна Владимировна* – к. ф.-м. н, доцент, преподаватель кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kop1965@mail.ru. ORCID iD 0000-0003-3693-8220.

*Жукалин Дмитрий Алексеевич* – к. ф.-м. н, доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: d.zhukalin@mail.ru. ORCID iD 0000-0002-0754-4989.

*Mikhailyuk Ekaterina A.* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of Automated Information Management Systems Stary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) of National Research Technological University MISIS, Stary Oskol, Belgorod region, Russian Federation; e-mail: gazon1978@yandex.ru. ORCID iD 0000-0002-3130-1063.

*Prokopova Tatyana V.* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Lecturer, Department of Physics and Chemistry of Military Training and Research Center Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation; e-mail: kop1965@mail.ru. ORCID iD 0000-0003-3693-8220.

*Zhukalin Dmitry A.* – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Physics of Semiconductors and Microelectronics, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation; e-mail: d.zhukalin@mail.ru. ORCID iD 0000-0002-0754-4989.