

УДК 537.311.33

doi:10.21685/2072-3040-2022-4-8

Особенности формирования контактов Ni-GaAs, получаемых при электролизе, и их электрофизические свойства

В. В. Филиппов¹, С. Е. Лузянин², К. А. Богоносов³

^{1,2}Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского, Липецк, Россия

¹Липецкий филиал Московского государственного университета технологии и управления имени К. Г. Разумовского, Липецк, Россия

³Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского, Москва, Россия

¹wwfilippow@mail.ru, ²luzyanin_se@mail.ru, ³kbogonosov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Никелевые контакты на арсениде галлия представляют интерес с точки зрения их применения в оптоэлектронике. Целью данной работы является исследование контактных структур Ni-p-GaAs и Ni-n-GaAs. Объектом исследования выбраны электрохимические контакты никеля к кристаллическому арсениду галлия. Приводятся исследования топографии однородных электрохимических пленок никеля нанометровой толщины (50–100 нм) на поверхности полупроводника. Экспериментально получены вольт-амперные характеристики контактов металл-полупроводник. *Материалы и методы.* Выполнено исследование шероховатости подложки GaAs пленки Ni с использованием оптического и зондового микроскопов. Для получения пленок никеля использовался раствор Уоттса и установка по получению электрохимических структур капельным методом. Для минимизации шероховатости поверхности никеля, получаемой электролитическим методом, использовался режим малой плотности тока. С использованием теоретической модели и экспериментальных данных вычислены сопротивления контактов и построены их вольт-амперные характеристики. *Результаты.* Определены параметры шероховатости поверхности никеля, влияющие на эксплуатационные свойства контактных структур. Выявлены особенности протекания тока через полученный электрохимическим методом контакт Ni-GaAs. *Выводы.* Показано, что полученные структуры Ni-p-GaAs проявляют омические свойства, а вольт-амперные характеристики контактов Ni-n-GaAs имеют нелинейную область при напряжениях менее 1,5 Вольт. Выявлено, что формирование цельной никелевой пленки на поверхности GaAs возможно при толщине слоя Ni, превосходящей среднюю шероховатость подложки.

Ключевые слова: никелевые пленки, контакт металл-полупроводник, шероховатость пленки, зондовая микроскопия

Для цитирования: Филиппов В. В., Лузянин С. Е., Богоносов К. А. Особенности формирования контактов Ni-GaAs, получаемых при электролизе и их электрофизические свойства // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2022. № 4. С. 76–91. doi:10.21685/2072-3040-2022-4-8

The features of the Ni-GaAs contacts formation obtained by electrolysis and their electrophysical properties

V.V. Filippov¹, S.E. Luzyanin², K.A. Bogonosov³

^{1,2}Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russia

¹Lipetsk Branch of Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovsky, Lipetsk, Russia

³Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky, Moscow, Russia

¹wwfilippow@mail.ru, ²luzyanin_se@mail.ru, ³kbogonosov@gmail.com

Abstract. *Background.* Nickel contacts based on gallium arsenide are of interest from the point of view of their application in optoelectronics. The purpose of this work is to study the contact structures of Ni p-GaAs and Ni n-GaAs. The object of the study is the electrochemical contacts of nickel to crystalline gallium arsenide. The article presents studies of the topography of homogeneous electrochemical nickel films of nanometer thickness (50–100 nm) on the surface of a semiconductor. The current-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts are experimentally obtained. *Materials and methods.* The roughness of the GaAs Ni film substrate was studied using optical and probe microscopes. Nickel films were obtained using a Watts solution and a setup for the production of electrochemical structures by the drop method. To minimize the roughness of the nickel surface obtained by electrolysis, a mode of low current density was used. Using a theoretical model and experimental data, the contact resistances and their current-voltage characteristics are obtained. *Results.* The parameters of nickel surface roughness, which affect the operational properties of contact structures, are determined. The features of the current flow through the electrochemically obtained Ni GaAs contact are revealed. *Conclusions.* It is shown that the resulting Ni p-GaAs structures are ohmic, and the current-voltage characteristics of the Ni n-GaAs contacts have a nonlinear region at voltages less than 1.5 volts. It is shown that the formation of an integral nickel film on the GaAs surface is possible when the Ni layer thickness exceeds the average substrate roughness.

Keywords: nickel films, metal-semiconductor contact, film roughness, probe microscopy

For citation: Filippov V.V., Luzyanin S.E., Bogonosov K.A. The features of the Ni-GaAs contacts formation obtained by electrolysis and their electrophysical properties. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences*. 2022;(4):76–91. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3040-2022-4-8

Введение

Благодаря своим уникальным электрическим и фотоэлектрическим свойствам арсенид галлия является одним из основных материалов современной оптоэлектроники [1, 2]. Как известно, основное применение полупроводниковые приборы находят благодаря явлениям, возникающим на контактах металл-полупроводник и полупроводников с различным типом проводимости. Современная технология позволяет получать и исследовать контактные структуры нанометровой толщины. Весьма перспективными структурами микро- и нанoeлектроники считают контактные структуры Ni-GaAs. Согласно известным экспериментальным данным при вакуумной технологии получения контакт Ni к полупроводниковому кристаллу GaAs с дырочным типом проводимости проявляет омические свойства [3], в то же время контактная структура Ni-n-GaAs является барьером Шоттки [4]. Однако окончательные свойства контакта Ni-GaAs определяются не только типом легирова-

ния полупроводника (доноров или акцепторов), но и рядом других условий, среди которых необходимо указать: элементный состав легирующих примесей в GaAs, метод их внедрения, состояние поверхности полупроводника, способ и условия получения контакта, толщина и однородность контактного металлического слоя [5, 6].

В данной работе выполнено исследование свойств никелевых контактов нанометровой толщины на арсениде галлия с электронной и дырочной проводимостями. Металлические контакты получали электролитически при малых плотностях тока. С помощью зондовой микроскопии (STM) изучена структура поверхности. Получены и проанализированы экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых контактов Ni-GaAs.

2. Методика получения контактов

Получить никелевые пленки можно несколькими способами (напыление, электролиз, пленки из расплава) [7–9]. Основным преимуществом никелевых покрытий, нанесенных химическим путем, является однородная толщина, независимо от формы изделия. Особенностью электрохимического никелирования является непрерывное осаждение слоя, что создает возможность образования покрытий различной толщины [7, 8].

Для получения металлических контактов малой площади к образцу нами была изготовлена экспериментальная установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 1.

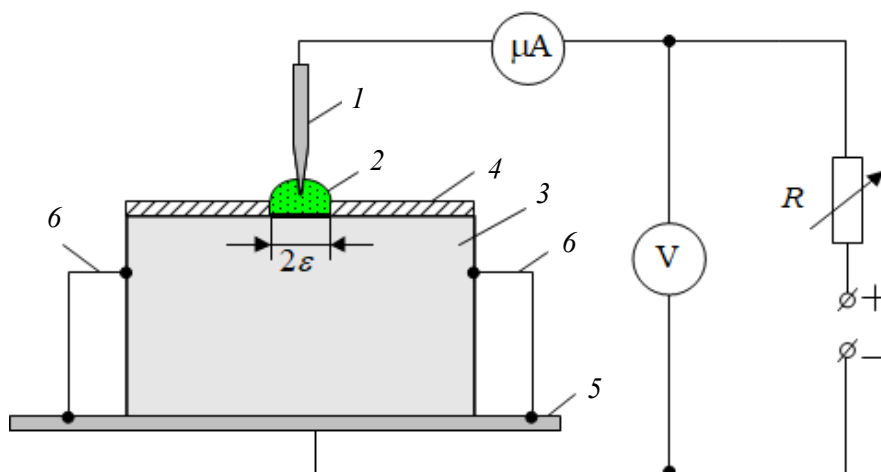


Рис. 1. Принципиальная схема установки по нанесению металлических контактов на поверхность полупроводника капельным электрохимическим методом:

1 – никелевый зонд; 2 – капля раствора электролита; 3 – полупроводниковый образец; 4 – изолирующий слой на поверхности полупроводника (оксидная пленка); 5 – проводящий подвижный столик; 6 – контактные провода

Для того чтобы получить электрохимические никелевые пленки, применялся раствор Уоттса [10] $((\text{NiSO}_4) \cdot (7\text{H}_2\text{O}) - 0,27 \text{ кг}, (\text{NiCl}_2) \cdot (6\text{H}_2\text{O}) - 0,045 \text{ кг}, \text{H}_3\text{BO}_3 - 0,033 \text{ кг}, \text{H}_2\text{O} - 1 \text{ кг})$, приведенный в контакт с полупроводниковым образцом, с использованием никелевого зонда [11]. Данный состав электролита позволяет минимизировать влияние выделяющегося водорода на

качество получаемых металлических пленок [8, 10]. Никель оседал на полупроводник при комнатной температуре, и при малой плотности тока ($j \approx 5 \text{ мкА/мм}^2$) были получены пленки никеля микроскопической толщины. Для получения контактных структур использовались подложки из арсенида галлия, выращенные методом Чохральского. Все кристаллы были ориентированы в плоскости (001). После шлифовки пастой ГОИ поверхность полупроводника имела малую шероховатость. Визуально данные пленки наблюдались в металлографическом микроскопе Биомед ММР-3.

Для получения нанопленок никеля с малой шероховатостью поверхности использовался режим малых токов со временем электролиза 5–10 мин [10, 11]. В ходе эксперимента получили цельные пленки никеля толщиной 50–100 нм. Среднюю толщину пленки можно оценить по формуле

$$D = \frac{k \cdot I \cdot t}{\rho \cdot S}, \quad (1)$$

где k – электрохимический эквивалент никеля; I – сила тока; t – время электролиза; ρ – плотность объемного Ni; S – площадь получаемой пленки [10]. Площадь S нанопленок никеля соответствовала площадке контакта капли электролита и проводниковой подложки (круглый контакт диаметром 5 мм). В составе используемого электролита Уоттса никель двухвалентен, поэтому при вычислениях $k = 0,3041 \cdot 10^{-6} \text{ кг/Кл}$ плотность пленки никеля принимаем равной соответствующей величине объемного материала $\rho = 8902 \text{ кг/м}^3$. Принимая ток в $I = 90 \text{ мкА}$, площадь контакта 20 мм^2 ($j = 4,5 \text{ мкА/мм}^2$), а время (в секундах), получаем следующую формулу для расчета толщины пленки никеля (в нм):

$$D = 0,154 \cdot t. \quad (2)$$

При времени, равном 300 с (5 мин) получаем толщину пленки примерно 46 нм.

3. Топография поверхности никелевых пленок на полупроводнике

В нашей работе для получения никелевых пленок на поверхности полупроводника и их дальнейшего исследования мы использовали четыре образца GaAs прямоугольной и круглой формы.

Первоначально с помощью механической полировки получали гладкую поверхность арсенида галлия без микродефектов для последующего нанесения пленок никеля. Никелевые контакты к полупроводнику для всех образцов получали электрохимически в течение 10 мин при плотности тока $4,5 \text{ мкА/мм}^2$ согласно технологии, описанной выше. Образец n-GaAs прямоугольной формы с размерами $17,85 \times 9,05 \times 0,45 \text{ мм}$ допускал размещение на подложке в микроскопе СММ-2000 ЗАО «Протон» [12] и для данного образца производилось сканирование поверхностей. Сканирование поверхностей проводилось в режиме туннельной микроскопии [13]. Стандартные проводящие зонды применяемого зондового микроскопа для СТМ методики имеют радиус острия порядка 0,2–1 нм и позволяют получать соответствующее латеральное разрешение, предельно достижимое разрешение по высотам рельефа 0,02 нм [12].

Выполнялось сканирование поверхности GaAs после полировки (рис. 2,*а*) слоя никеля в центральной части пленки (рис. 2,*б*) и слоя никеля на границе получаемого контакта (рис. 2,*в*). Это было сделано для сравнения свойств покрытия в различных зонах контакта.

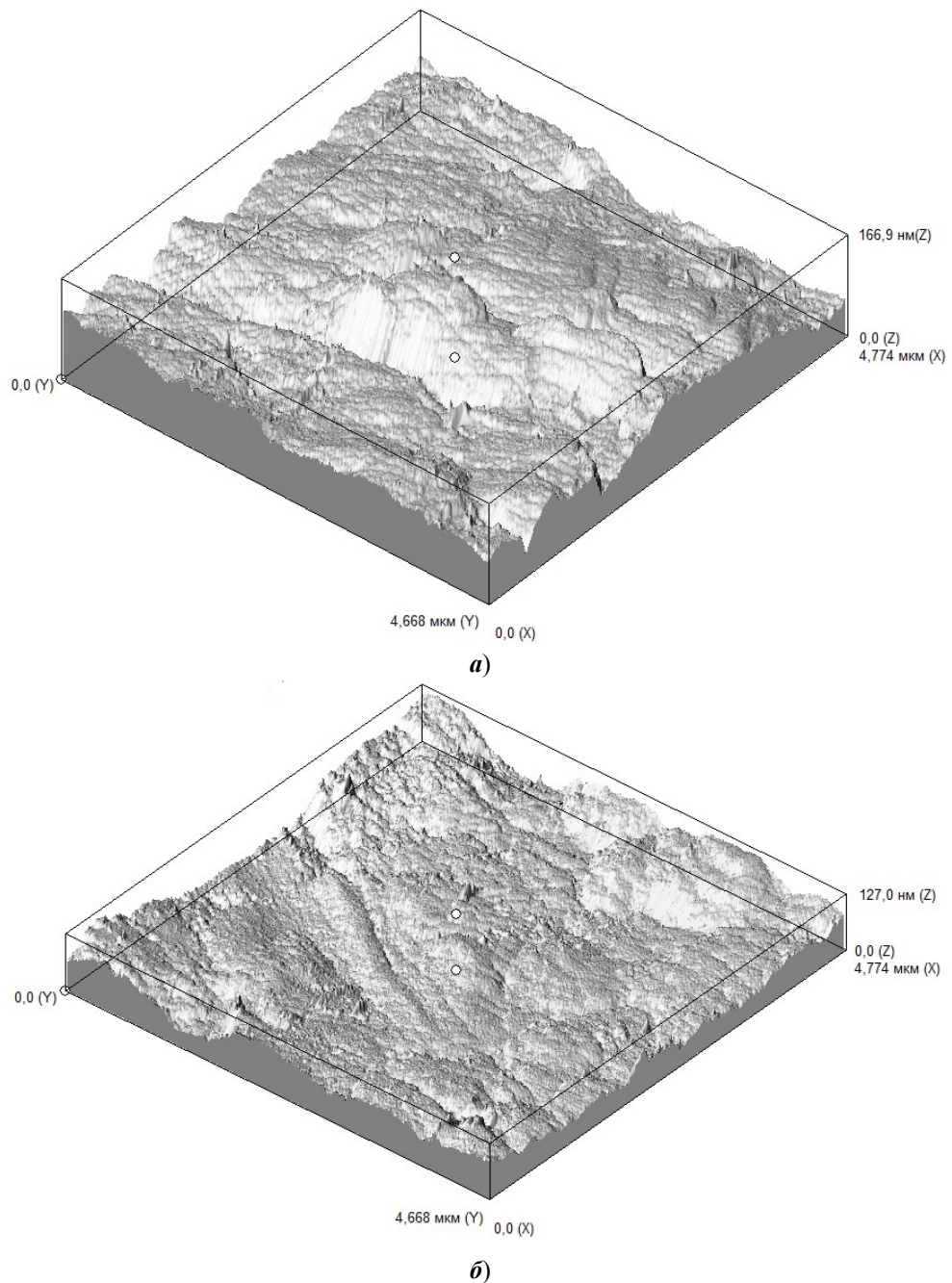


Рис. 2. Изображения поверхностей, полученные в режиме СТМ
а – арсенида галлия, используемого в качестве подложки;
б – тонкой пленки никеля в центральной ее части;
в – тонкой пленки никеля вблизи границы с подложкой

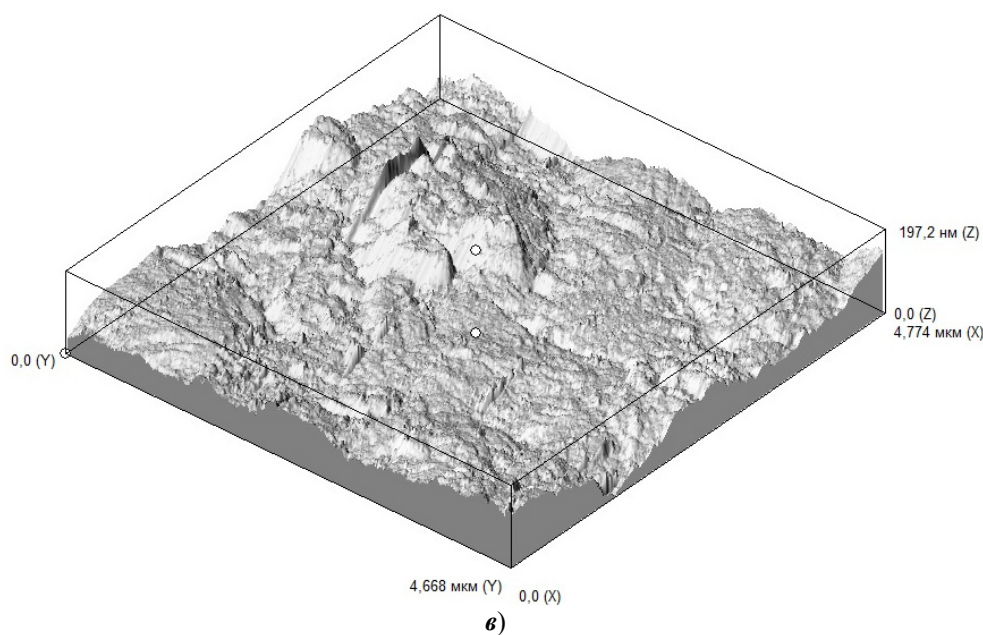


Рис. 2. Окончание

Параметры шероховатостей поверхности (ГОСТ 25142-82, ГОСТ Р ИСО 4287–2014) были определены с помощью программы ScanMaster, CMM-2000. Данные по шероховатости поверхностей в виде графика представлены на рис. 3.

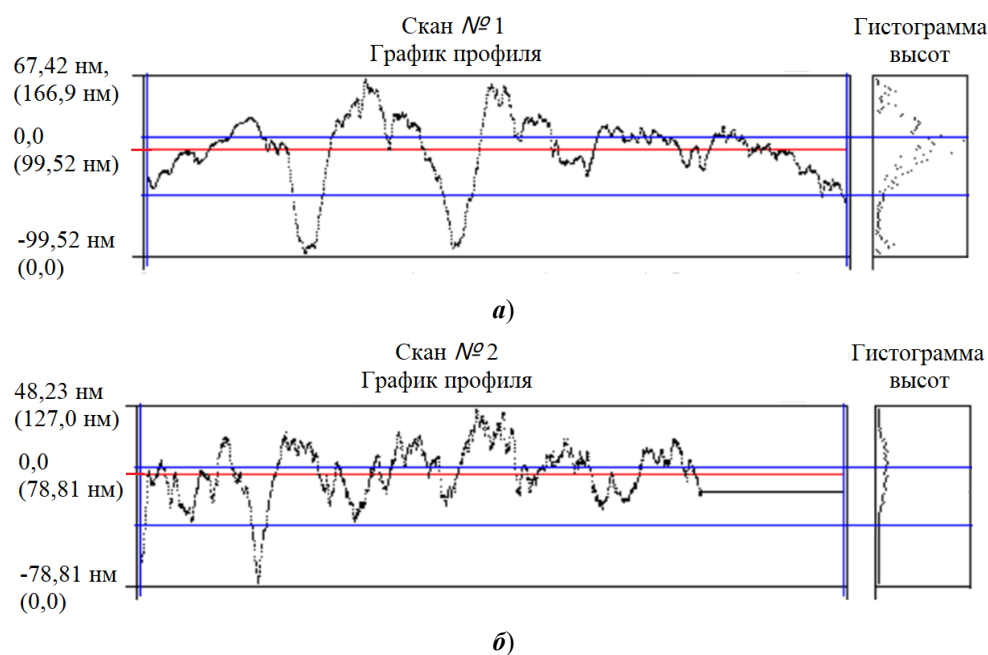


Рис. 3. Данные по исследованию поверхности арсенида галлия (а), используемого в качестве подложки, тонкой пленки никеля в центральной ее части (б), тонкой пленки никеля вблизи границы с подложкой (в)



в)

Рис. 3. Окончание

Измеренные топографические параметры представлены в табл. 1 для поверхности GaAs после полировки (Скан № 1), поверхности центральной части пленки никеля (Скан № 2), поверхности слоя никеля на границе с подложкой (Скан № 3).

Таблица 1

Параметры шероховатостей поверхностей подложки и никеля

Основные параметры шероховатостей	Скан № 1	Скан № 2	Скан № 3
Средняя квадратичная шероховатость профиля R_q , нм	32,18	18,80	36,81
Средняя шероховатость профиля R_a , нм	23,80	14,99	27,05
Средняя шероховатость по 10 точкам R_z , нм	88,30	71,92	157,3
Максимальная высота шероховатостей (размах профиля) R_{max} , нм	166,9	127,0	197,2
Средний шаг неровностей (размер зерна) S_m , мкм	1,073	0,732	1,027
Средний шаг выступов профиля (средняя насечка зерна) S , нм	95,74	61,77	87,35
Среднеквадратичный локальный наклон Dq	$9,180^\circ$	$8,723^\circ$	$18,777^\circ$
Средний локальный наклон Da	$6,903^\circ$	$5,966^\circ$	$10,855^\circ$
Относительная длина профиля (развитость поверхности) L_0	1,013	1,011	1,038

4. Экспериментальные измерения ВАХ контактных структур

Согласно описанной нами методике были получены никелевые контакты к четырем полупроводниковым образцам, имеющим форму прямоугольных параллелепипедов и круглых дисков. Схемы расположения полученных контактов представлены на рис. 4 для прямоугольного образца и на рис. 5 для круглого. Средняя толщина никеля на полупроводнике была нами рассчитана по формуле (2) и имела значение около 90 нм. Для возможности присоединений измерительных приборов на никель наносился небольшой слой меди, к которому осуществлялась пайка необходимых проводников. Медь на никель также наносилась капельным электрохимическим методом (с медным зондом), в качестве рабочего электролита использовался 10 % водный раствор медного купороса ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), время электролиза составляло 15 мин при плотности тока $\approx 5 \text{ мкА/мм}^2$.

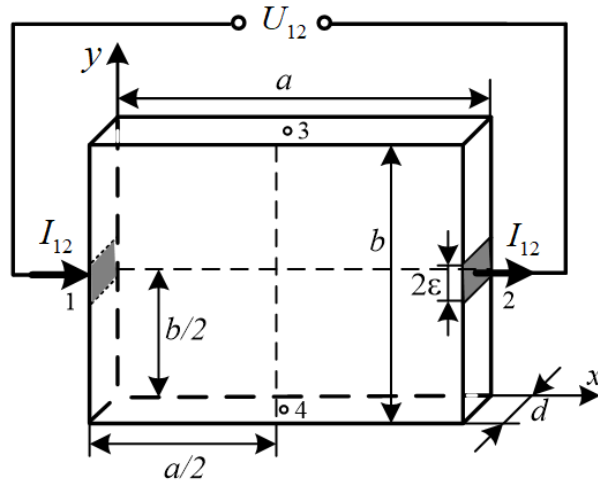


Рис. 4. Схема положения металлических контактов на прямоугольном образце

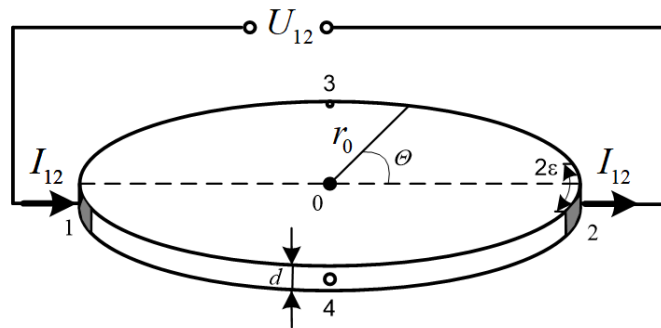


Рис. 5. Положение металлических контактов на круглом образце

Задачи о распределении потенциалов в полупроводниковых образцах рассматриваемой геометрии подробно проанализированы в работах [14–16]. Полученные в указанных работах выражения для расчетов электрических полей проверены экспериментально. В случае прямоугольного образца с двумя токовыми электродами на противоположных гранях (рис. 4) выражение для потенциала в области образца принимает вид

$$\varphi(x, y) = -\frac{I_{12}}{d\sigma} \left(\frac{x}{b} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^{n/2} \sin(\beta_n \varepsilon)}{n \beta_n \varepsilon} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\cos(\beta_n y)}{\operatorname{sh}(\beta_n a)} [\operatorname{ch}(\beta_n (x-a)) - \operatorname{ch}(\beta_n x)] \right\} \right), \quad (3)$$

где I_{12} – ток, протекающий через контакты 1 и 2; σ – удельная электропроводность полупроводника, $\beta_n = \pi n / b$.

Для однородного круглого образца (рис. 5) с диаметрально противоположно расположенными токовыми электродами размером $2\varepsilon \times d$ распределение потенциалов удобно представить в полярных координатах (r, Θ) :

$$\varphi_0(r, \Theta) = -\frac{2I_{12}}{\pi d \sigma} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \left(\frac{r}{r_0} \right)^m \frac{\sin \lambda_m \varepsilon \cos(m \Theta)}{\lambda_m \varepsilon m} \right\}, \quad (4)$$

где Θ – угол между линией токовых контактов и выбираемым направлением на точку, $\lambda_m = \pi m / r_0$.

Данные выражения для распределений потенциалов позволяют рассчитывать и визуализировать электрические поля в исследуемых полупроводниках, что может быть использовано для измерений напряжений между любыми точками на поверхности образцов и, при необходимости, контролировать однородность материалов.

Выражения (3), (4) позволяют определять теоретически разность потенциалов (как разность усредненных потенциалов на токовых контактах) и омическое сопротивление образца, включающее сопротивление растекания контактов:

$$R_{12\text{теор}} = \frac{\langle \varphi_1 \rangle - \langle \varphi_2 \rangle}{I_{12}}. \quad (5)$$

Для однородного образца прямоугольной формы с удельной проводимостью σ теоретическое сопротивление между контактами 1, 2 шириной 2ε (рис. 4) определяется выражением [14, 15]:

$$R_{12\text{теор}} = \frac{a}{\sigma b d} \left[1 + \frac{4b}{a\pi} \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \left(\frac{\sin \beta_n \varepsilon}{\beta_n \varepsilon} \right)^2 \frac{\text{ch} \beta_n a - 1}{\text{sh} \beta_n a} \right\} \right]. \quad (6)$$

Для круглого образца радиусом r_0 и толщиной d , на поверхности которого диаметрально симметрично расположены два токовых контакта (рис. 5), сопротивление определяется следующим образом [16]:

$$R_{12\text{теор}} = \frac{4}{\pi \sigma d} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{1}{m} \left(\frac{\sin \lambda_m \varepsilon}{\lambda_m \varepsilon} \right)^2 \right\}. \quad (7)$$

При практических вычислениях с целью достижения расчетной погрешности менее 0,1 % для опытных образцов и контактов с параметрами, приведенными в табл. 2, достаточно ограничиться первыми 100 членами ряда.

Таблица 2

Размеры опытных образцов и контактов ($\pm 0,05$ мм)

Образец	Материал	Диаметр 2R, мм	Длина a, мм	Ширина b, мм	Толщина d, мм	Контакт 2ε, мм
№ 1	p-GaAs (прямоуг.)		8,95	24,00	3,00	2,00
№ 2	p-GaAs (кругл.)	40,00			2,00	2,00
№ 3	n-GaAs (прямоуг.)		17,85	9,05	0,45	2,00
№ 4	n-GaAs (кругл.)	40,00			0,40	2,00

Экспериментальные ВАХ полученных нами структур представлены на рис. 6–9.

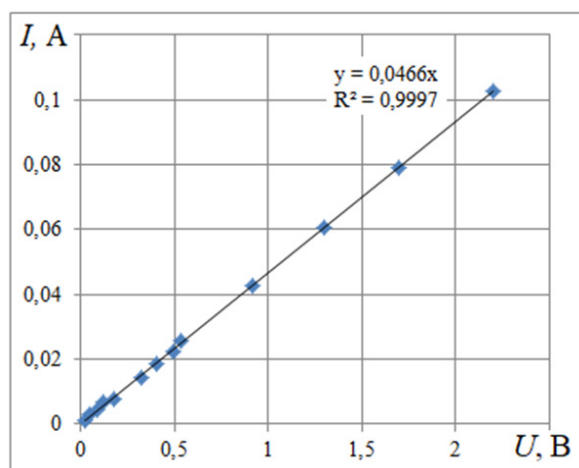


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика образца № 1

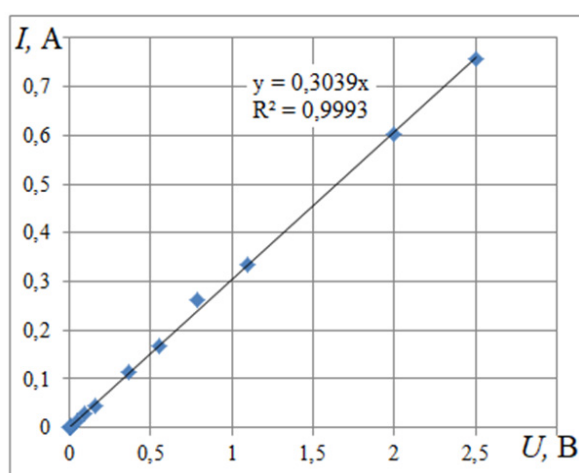


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика образца № 2

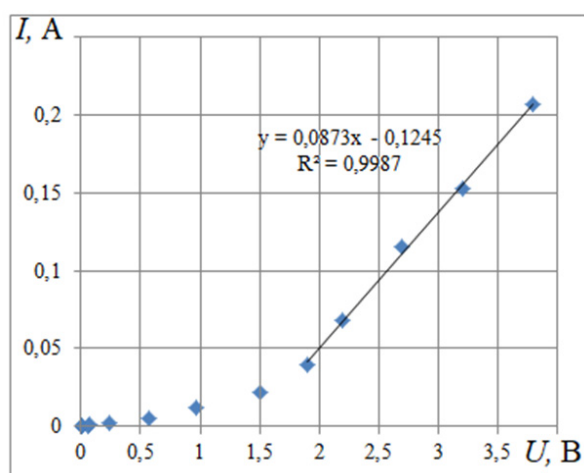


Рис. 8. Вольт-амперная характеристика образца № 3

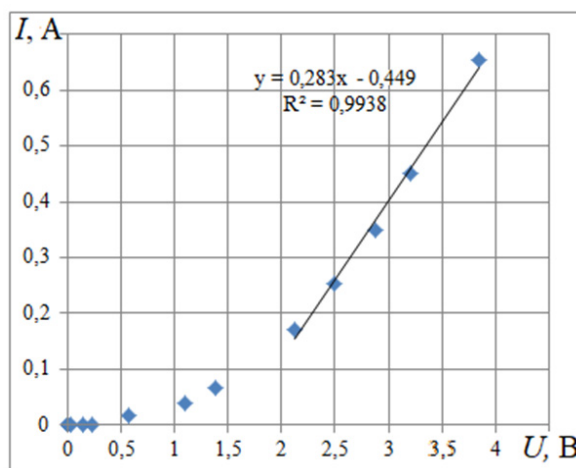


Рис. 9. Вольт-амперная характеристика образца № 4

Измерения проводились при нормальных условиях (при температуре 20 °С и отсутствии источников фотогенерации носителей тока). Из данных графиков видно, что контакт Ni-p-GaAs имеет ярко выраженную линейную зависимость тока от подаваемого напряжения и является омическим контактом. Контакт Ni-n-GaAs, напротив, имеет нелинейную область и контактную разность потенциалов (U_{cont}) около 1,5 В. Для линейных областей ВАХ, используя стандартные встроенные функции табличного процессора MS Excel, определены коэффициенты зависимостей ($y = ax + b$) и величины достоверности аппроксимации (R^2), показывающие выполнение выбранной линейной зависимости.

Вычисленные по экспериментальным данным параметры образцов GaAs приведены в табл. 3. Удельное сопротивление определялось по линейной области ВАХ согласно формулам (6), (7). Для определения типа проводимости и концентрации носителей заряда применялась стандартная методика холловских измерений по методу Ван дер Пау [17]. В качестве измерительных контактов для электродвижущей силы (ЭДС) Холла использовались прижимные вольфрамовые зонды (контакты 3 и 4 на рис. 4, 5). Измерения ЭДС Холла проводились в поперечном магнитном поле, компенсационным методом высокоомным вольтметром В2-34.

Таблица 3
Измеренные основные электрические параметры образцов

Образец	Материал	U_{cont} , В	R_{12} , Ом	σ , (Ом·м) ⁻¹	n , 10 ¹⁵ см ⁻³
№ 1	p-GaAs (прямоуг.)	0	21,46	25,26	3,81
№ 2	p-GaAs (круглый)	0	3,29	43,48	53,90
№ 3	n-GaAs (прямоуг.)	1,49	11,20	806,45	6,17
№ 4	n-GaAs (круглый)	1,59	3,53	2027,20	16,10

Полученные вольт-амперные характеристики контактов металл-полупроводник указывают существенное различие потенциального барьера металл-полупроводник в случае никелевого контакта на n-GaAs и p-GaAs. Рассмотрим различия в энергетических диаграммах соответствующих структур,

используя известную модель Шоттки – Мотта [18]. На рис. 10 приведена модель идеальных контактов никеля к полупроводникам n-GaAs (рис. 10,*a*) и p-GaAs (рис. 10,*б*), где использованы следующие стандартные обозначения: Φ_M – работа выхода электрона из металла; $E_{F,m}$ – уровень Ферми металла; X_S – энергия электронного сродства; E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника; E_c – дно зоны проводимости; E_v – потолок валентной зоны; $E_{F,s,n}$ – уровень Ферми полупроводника n-типа; $E_{F,s,p}$ – уровень Ферми полупроводника p-типа; D_{cont} – ширина области пространственного заряда. Необходимые энергетические параметры Ni и GaAs приведены из литературы [3, 17].

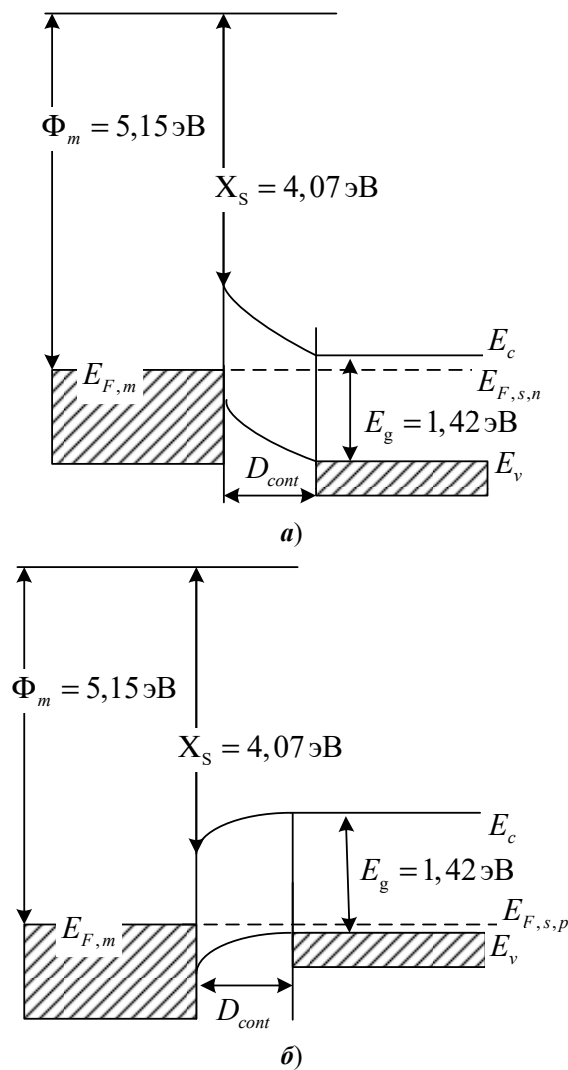


Рис. 10. Зонная диаграмма контакта Ni-GaAs: Ni-n-GaAs (*a*), Ni-p-GaAs (*б*)

Представленная модель показывает, что в случае идеального контакта никеля с полупроводником электронного типа проводимости получаем по-

тенциальный барьер около 1 эВ, для дырочного полупроводника барьер существенно меньше: 0,3–0,4 эВ. Однако в реальных условиях для определения величины потенциального барьера необходимо учитывать физико-химические особенности формирования контакта: поверхностные состояния, оксидные пленки, электрохимические процессы, размерные граничные эффекты.

Заключение

Таким образом, предлагаемая технология получения пленок никеля на арсениде галлия позволяет получать качественные однородные контакты металл-полупроводник, проявляющие омические свойства.

Предлагаемый капельный электрохимический метод изготовления контакта Ni-GaAs также позволяет создавать металлические наноструктуры на полупроводнике. Создание контактной структуры в нужной зоне поверхности полупроводника не нарушает близлежащую область образца. Получаемые пленки Ni повторяют структуру поверхности подложки (при малой толщине Ni ($d \leq R_a$)). Толщиной металлической пленки можно управлять, получая магнитные наноразмерные структуры. Полученные пленки могут быть использованы в качестве единиц магнитной памяти на полупроводнике.

Для экспериментального получения цельных пленок никеля на поверхности меди необходима предварительная оценка шероховатости подложки, так чтобы пленка никеля имела среднюю толщину, превосходящую по величине шероховатость полупроводника. Никелевый анод для получения максимально однородной по толщине пленки необходимо располагать по центру площади границы раздела воздух-электролит [19].

При проведении измерений на полученных электрохимическим методом никелевых контактах к p-GaAs не выявлено контактной разности потенциалов, что свидетельствует о высоком качестве химической чистоты границы раздела металл-полупроводник. Согласно полученным экспериментальным ВАХ никелевый контакт к полупроводнику n-GaAs (при концентрациях примесей 10^{15} – 10^{16} см⁻³) имеет нелинейную область при напряжениях менее 1,5 В, при повышении напряжения зависимость тока от напряжения приобретает линейный характер.

Известно, что надежные омические контакты необходимы при исследованиях кинетических параметров полупроводников и при изучении слоистых структур электронной техники, соответственно полученные результаты можно использовать для практического получения качественных омических контактов к p-GaAs в лабораторных условиях.

В дальнейших работах предполагается исследование влияние температуры и электромагнитных полей на данные контакты и соответствующие практические применения.

Список литературы

1. Sze S. M., Li Y., Ng K. K. Physics of Semiconductor Devices. 4th Edition. New Jersey : Wiley. 2021. 944 p.
2. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы. 9-е изд. М. : Лань, 2021. 480 с.
3. Бланк Т. В., Гольдберг Ю. А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл-полупроводник (обзор) // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41, № 11. С. 1281–1307. doi:10.1134/S1063782607110012

4. Филонов Н. Г., Ивонин И. В. Электрофизические свойства структур с барьером Шоттки на основе арсенида галлия. Томск : Издательский дом Томского государственного университета, 2018. 364 с.
5. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия : пер. с англ. М. : Мир, 1991. 632 с.
6. Лебедев М. В. Модификация атомной и электронной структуры поверхности полупроводников АЗВ5 на границе с растворами электролитов (обзор) // Физика и техника полупроводников. 2020. Т. 54, № 7. С. 587–630. doi:10.1134/S1063782620070064
7. Румянцева К. Е. Физические и технологические свойства покрытий. Иваново : Ивановский государственный химико-технологический университет, 2018. 80 с.
8. Бережная А. Г. Электрохимические технологии и материалы. Ростов н/Д ; Таганрог : Южный федеральный университет, 2017. 118 с.
9. Апокин И. А. Технология изготовления ферромагнитных пленок. Л. : Физматлит, 2016. 80 с.
10. Вирбилис С. Гальванотехника для мастеров. М. : Наука, 2017. 208 с.
11. Поляков Н. Н., Мицук С. В., Филиппов В. В. Капельный метод электрохимического осаждения контактов металл-полупроводник и исследование их свойств // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72, № 2. С. 30–34.
12. Логинов Б. А., Логинов П. Б., Логинов В. Б. Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке // Наноиндустрия. 2019. Т. 12, № 6. С. 352–365. doi:10.22184/1993-8578.2019.12.6.352.364
13. Chen C. J. Introduction to Scanning Tunneling Microscopy. New York : Oxford University Press, 2015. 488 p.
14. Филиппов В. В. Особенности явлений электронного переноса в анизотропных полупроводниках. М. : Спутник+, 2015. 257 с.
15. Лузянин С. Е., Сысоева Ю. Ю. Возможности исследования переходных сопротивлений контактов к полупроводниковым кристаллам // Наука молодых – будущее России : сб. науч. статей 4-й Международной науч. конф. (Курск, 10–11 декабря 2019 г.) / Ответственный редактор А. А. Горохов. Курск : Юго-Западный государственный университет, 2019. Т. 7. С. 183–187.
16. Filippov V. V., Mitsuk S. V., Luzyanin S. E. Measuring the Resistance of Metal-Semiconductor Contacts Produced by Drop Electrochemical Method // Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA (10–13 November). 2020. Lipetsk, 2020. P. 871–875.
17. Павлов Л. П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М. : Высшая школа, 1987. 240 с.
18. Божков В. Г. Контакты металл-полупроводник: физика и модели. Томск : Издательский дом Томского государственного университета, 2016. 528 с.
19. Филиппов В. В., Лузянин С. Е., Нефедова Е. С., Токарева Д. В. Условия формирования и топография поверхности никелевых нанопленок на меди // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 3. С. 59–76.

References

1. Sze S. M., Li Y., Ng K.K. *Physics of Semiconductor Devices. 4th Edition*. New Jersey: Wiley, 2021:944.
2. Pasyukov V.V., Chirkin L.K. *Poluprovodnikovye pribory. 9-e izd. = Semiconductors The 9th edition*. Moscow: Lan', 2021:480. (In Russ.)
3. Blank T.V., Gol'dberg Yu.A. Mechanisms of current flow in ohmic metal-semiconductor contacts (review). *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 2007;41(11):1281–1307. (In Russ.). doi:10.1134/S1063782607110012

4. Filonov N.G., Ivonin I.V. *Elektrofizicheskie svoystva struktur s bar'erom Shottki na osnove arsenida galliya = Electrophysical properties of structures with a Schottky barrier based on gallium arsenide*. Tomsk: Izdatel'skiy dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2018:364. (In Russ.)
5. Shur M. *Sovremennye pribory na osnove arsenida galliya: per. s angl. = Modern devices based on gallium arsenide: translated from English*. Moscow: Mir, 1991:632. (In Russ.)
6. Lebedev M.V. Modification of the atomic and electronic structure of the A3V5 semiconductors surface at the interface with electrolyte solutions (review). *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Physics and technology of semiconductors*. 2020;54(7):587–630. (In Russ.). doi:10.1134/S1063782620070064
7. Rumyantseva K.E. *Fizicheskie i tekhnologicheskie svoystva pokrytiy = Physical and technological properties of coatings*. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy khimiko-tekhnologicheskii universitet, 2018:80. (In Russ.)
8. Berezhnaya A.G. *Elektrokhimicheskie tekhnologii i materialy = Electrochemical technologies and materials*. Rostov-on-Don; Taganrog: Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2017:118. (In Russ.)
9. Apokin I.A. *Tekhnologiya izgotovleniya ferromagnitnykh plenok = Manufacturing technology of ferromagnetic films*. Leningrad: Fizmatlit, 2016:80. (In Russ.)
10. Virbilis S. *Gal'vanotekhnika dlya masterov = Electroplating for craftsmen*. Moscow: Nauka, 2017:208. (In Russ.)
11. Polyakov N.N., Mitsuk S.V., Filippov V.V. Drop method of electrochemical deposition of metal-semiconductor contacts and study of their properties. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Factory laboratory. Material diagnostics*. 2006;72(2): 30–34. (In Russ.)
12. Loginov B.A., Loginov P.B., Loginov V.B. Probe microscopy: applications and design considerations. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2019;12(6):352–365. (In Russ.). doi:10.22184/1993-8578.2019.12.6.352.364
13. Chen C.J. *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy*. New York: Oxford University Press, 2015:488.
14. Filippov V.V. *Osobennosti yavleniy elektronogo perenosa v anizotropnykh poluprovodnikakh = Peculiarities of electron transfer phenomena in anisotropic semiconductors*. Moscow: Sputnik+, 2015:257. (In Russ.)
15. Luzyanin S.E., Sysoeva Yu.Yu. Possibilities of studying the transition resistance of contacts to semiconductor crystals. *Nauka molodykh – budushchee Rossii : sb. nauch. stat-ey 4-y Mezhdunarodnoy nauch. konf. (Kursk, 10–11 dekabrya 2019 g.) = The science of the young is the future of Russia: proceedings of the 4th International scientific conference (Kursk, December 10–11, 2019)*. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet, 2019;7:183–187. (In Russ.)
16. Filippov V.V., Mitsuk S.V., Luzyanin S.E. Measuring the Resistance of Metal-Semiconductor Contacts Produced by Drop Electrochemical Method. *Proceedings 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA (10–13 November)*. 2020. Lipetsk, 2020:871–875.
17. Pavlov L.P. *Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovykh materialov = Methods for measuring the parameters of semiconductor materials*. Moscow: Vysshaya shkola, 1987:240. (In Russ.)
18. Bozhkov V.G. *Kontakty metall-poluprovodnik: fizika i modeli = Metal-semiconductor contacts: physics and models*. Tomsk: Izdatel'skiy dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016:528. (In Russ.)
19. Filippov V.V., Luzyanin S.E., Nefedova E.S., Tokareva D.V. Formation conditions and surface topography of nickel nanofilms on copper. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the South-West State University. Series: Engineering and technologies*. 2021;11(3):59–76. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Владимирович Филиппов

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского (Россия, г. Липецк, ул. Ленина, 42); профессор кафедры естественных и технических дисциплин, Липецкий филиал Московского государственного университета технологии и управления имени К. Г. Разумовского (Россия, г. Липецк, ул. Краснознаменная, влд. 4.)

E-mail: wwfilippow@mail.ru

Vladimir V. Filippov

Doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, professor of the sub-department of mathematics and physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky (42 Lenina street, Lipetsk, Russia); professor of the sub-department of natural and technical disciplines, Lipetsk Branch of Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovsky (building 4, Krasnozamennaya street, Lipetsk, Russia)

Сергей Евгеньевич Лузянин

старший преподаватель кафедры информатики, информационных технологий и защиты информации, Липецкий государственный педагогический университет имени П. П. Семенова-Тян-Шанского (Россия, г. Липецк, ул. Ленина, 42)

E-mail: luzyanin_se@mail.ru

Sergey E. Luzyanin

Senior lecturer of the sub-department of informatics, information technology and information security, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky (42 Lenina street, Lipetsk, Russia)

Константин Александрович Богонос

кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Россия, г. Москва, ул. Земляной вал, 73)

E-mail: kbogonosov@gmail.com

Konstantin A. Bogonosov

Candidate of engineering sciences, associate professor of the sub-department of physics, Moscow State University of technologies and management named after K.G. Razumovsky (73 Zemlyanoy val street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 18.10.2022

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 21.11.2022

Принята к публикации / Accepted 03.12.2022