

## Оригинальная статья / Original article

УДК 538.915:537.311.33

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-91-107>

## Электрические свойства контактов Ni-GaAs, получаемых методом электролиза

В.В. Филиппов<sup>1,2,3</sup>, С.Е. Лузянин<sup>2</sup>, Д.А. Бакеев<sup>2</sup>, В.В. Климентьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Липецкий государственный технический университет  
ул. Московская, д. 30, г. Липецк 398055, Российская Федерация

<sup>2</sup> Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского  
ул. Ленина, д. 42, г. Липецк 398020, Российская Федерация

<sup>3</sup> Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского  
(Первый казачий университет), Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал)  
ул. Краснознаменная, влд. 4, г. Липецк 398006, Российская Федерация

✉ e-mail: bakeev.98@mail.ru

### Резюме

**Цель.** Контакты металл – полупроводник составляют основу современной твердотельной электроники. В представленной работе целью является исследование электрических свойств контактных структур Ni-GaAs, полученных электрохимическим методом. Основной задачей являлось изучение влияния типа примеси и степени легирования полупроводниковых кристаллов на вольт-амперные характеристики контактов металл – полупроводник.

**Методы.** Объектом исследования выбраны никелевые контакты к кристаллическому арсениду галлия, полученные капельным электрохимическим методом. Для практического изготовления контактных структур металл – полупроводник использовался раствор Уоттса в режиме малых плотностей токов. С помощью сканирующей туннельной микроскопии изучена топография поверхности образованных пленок. Электрические параметры полупроводников определены контактными методами ван дер Пау. Учет сопротивления растекания тока в области контактов учитывался посредством аналитического решения уравнения Лапласа с краевыми условиями Неймана на границах.

**Результаты.** Получены и проанализированы экспериментальные ВАХ исследуемых контактов Ni-GaAs. С использованием математической модели распределения потенциала в области образцов и экспериментальных данных вычислены сопротивления контактов никель – арсенид галлия и построены их вольт-амперные характеристики. Представлены энергетические модели контактов металл – полупроводник в случае невырожденного и вырожденного GaAs, поясняющие электрические свойства полученных структур.

**Заключение.** Показано, что полученные контактные структуры Ni-p-GaAs на основе невырожденных полупроводников проявляют омические свойства, а вольт-амперные характеристики контактов Ni-n-GaAs имеют нелинейную область, характерную для диодов Шоттки. Полученные электрохимические контактные структуры Ni-GaAs с полупроводниками с различным типом примесей при концентрации носителей выше  $10^{25} \text{ м}^{-3}$  имеют только линейные вольт-амперные характеристики, то есть проявляются омические свойства.

**Ключевые слова:** никелевые контакты; контакт металл – полупроводник; вольт-амперная характеристика; вырожденный полупроводник.

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

**Для цитирования:** Электрические свойства контактов Ni-GaAs, получаемых методом электролиза / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин, Д.А. Бакеев, В.В. Климентьев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 3. С. 91–107. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-91-107>.

Поступила в редакцию 01.07.2025

Подписана в печать 29.08.2025

Опубликована 30.09.2025

## Electrical properties of Ni-GaAs contacts obtained by electrolysis

Vladimir V. Filippov<sup>1,2,3</sup>, Sergey E. Luzyanin<sup>2</sup>, Dmitry A. Bakeev<sup>2</sup>✉, Vadim V. Klimentyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lipetsk State Technical University  
30 Moskovskaya Str., Lipetsk 398055, Russian Federation

<sup>2</sup> Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky  
42 Lenina Str., Lipetsk 398020, Russian Federation

<sup>3</sup> Moscow State University of Technologies and Management named after K.G. Razumovsky  
(First Cossack University), Lipetsk Cossack Institute of Technology and Menedgement (branch)  
4 Krasnoznamennaya Str., Lipetsk 398006, Russian Federation

✉ e-mail: bakeev.98@mail.ru

### Abstract

**Purpose.** Metal-semiconductor contacts form the basis of modern solid-state electronics. In the presented work the aim is to study the electrical properties of Ni-GaAs contact structures obtained by electrochemical method. The main task was to study the influence of impurity type and doping degree of semiconductor crystals on the current-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts.

**Methods.** The object of the study is nickel contacts to crystalline gallium arsenide obtained by the drop electrochemical method. For the practical production of metal-semiconductor contact structures, a Watts solution was used in the low-current density mode. The surface topography of the formed films was studied using scanning tunnel microscopy. The electrical parameters of the semiconductors were determined by Van der Pauw contact methods. The resistance of current spreading in the contact region was taken into account by means of an analytical solution of the Laplace equation with Neumann boundary conditions on the boundaries.

**Results.** Experimental current-voltage characteristics of the investigated Ni-GaAs contacts are obtained and analyzed. Using a mathematical model of potential distribution in the sample area and experimental data, the resistances of nickel-gallium arsenide contacts are calculated and their volt-ampere characteristics are constructed. Energy models of metal-semiconductor contacts in the case of non-degenerate and degenerate GaAs are presented, explaining the electrical properties of the obtained structures.

**Conclusion.** It is shown that the obtained Ni-p-GaAs contact structures based on non-degenerate semiconductors exhibit ohmic properties, and the volt-ampere characteristics of the Ni-n-GaAs contacts have a nonlinear region, characteristic of Schottky diodes. The obtained electrochemical contact structures of Ni-GaAs with semiconductors of different types of impurities at a carrier concentration above  $10^{25} \text{ m}^{-3}$  have only linear volt-ampere characteristics, i.e. ohmic properties are manifested.

**Keywords:** nickel contacts; metal-semiconductor contact; current-voltage characteristic; degenerate semiconductor.

**Conflict of interest:** The Authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Filippov V.V., Luzyanin S.E., Bakeev D.A., Klimentyev V.V. Electrical properties of Ni-GaAs contacts obtained by electrolysis. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2025;15(3):91–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-91-107>.

Received 01.07.2025

Accepted 29.08.2025

Published 30.09.2025

\*\*\*

## Введение

Контакты металл – полупроводник и полупроводников различных типов проводимости составляют основу современной твердотельной электроники. Несмотря на преобладающую роль кремния и структур на его основе в современной планарной технологии [1], полупроводниковые приборы и микроструктуры на основе соединений A2B5 являются важной частью материалов для современной высокочастотной электроники и оптоэлектроники [2]. При формировании контактных структур весьма важны не только свойства полупроводника, но и металлического материала, поэтому современная тенденция квантовой электроники, базирующейся на прямозонных полупроводниках, указывает на востребованность контактных структур на основе материалов Ni-GaAs. В производстве контактов самым распространённым способом их создания является метод напыления. Ученые и инженеры подробно изучили свойства таких контактов в работе [3]. Проведенные исследования [4] подтверждают, что изготовление контактов Ni-*p*-GaAs по вакуумной технологии, приводят к возникновению структур, проявляющих преимущественно омические свойства. В свою очередь, переход Ni-*n*-GaAs работает по-иному, он служит основой для диодов Шоттки и создает одноименный потенциальный барьер [5]. Общеизвестный факт, что электрические характеристики на границе раздела контакта металл – полупроводник имеют прямую зависимость не только от элементного состава контактирующих материалов, но и ряда других важных условий технологии получения контакта: первоначальное состояние поверхности полупроводника, температурные условия [6], толщина и однородность металлического слоя [7]. Для создания качественных Ni контактов на поверхности GaAs с управляемыми харак-

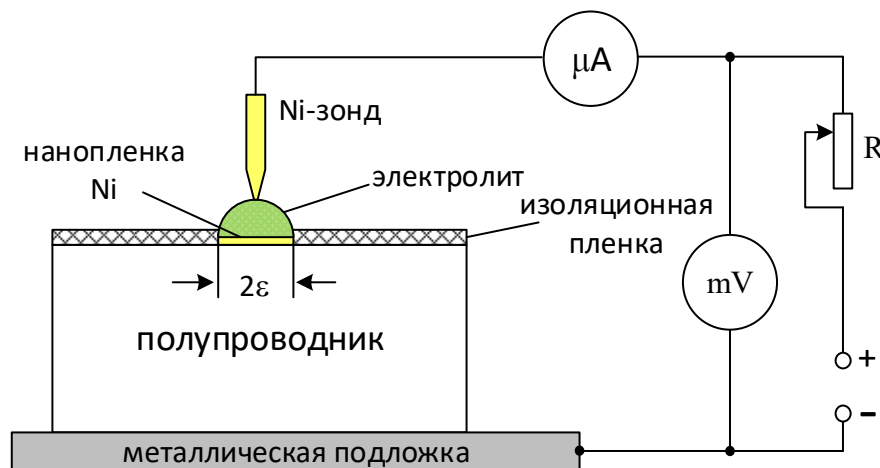
теристиками метод металлизации в вакууме не является единственным, хорошо известно, что их можно производить посредством химического выделения [8], электролиза [9] и осаждения пленки из расплава [10]. Главным достоинством метода электрохимической металлизации полупроводниковой поверхности в условиях физических лабораторий является простота и возможность самостоятельной сборки экспериментальной установки, а также широкие возможности по управлению толщиной, химическим составом осаждаемого металла и положением никелевой контактной пленки [9].

В данной работе приведены результаты эксперимента по анализу электрофизических свойств контактов металл – полупроводник на основе никеля наноразмерной толщины, осажденного на поверхность GaAs с различным уровнем легирования примесей.

## Материалы и методы

Формирование никелевых пленок нанометровой толщины на поверхности кристаллического арсенида галлия производилось на установке, реализующей электрохимическое осаждение, подробно описанной в работе [9], основные компоненты которой показаны на рисунке 1. Структуры металл – полупроводник практически получали методом электролиза [11] из раствора Уоттса [12] при малых плотностях тока ( $j \approx 5$  мкА/мм<sup>2</sup>).

Осаждение металлического слоя (Ni) из солевого раствора на поверхность кристалла GaAs происходило при комнатной температуре (20°C), электрический ток электролиза подавался от источника стабилизированного питания НУ3005, напряжение во внутренней цепи управлялось магазином сопротивлений МСР-63, рабочий ток через раствор Уоттса контролировался микроамперметром Ф135.



**Рис. 1.** Устройство для осаждения металла на поверхность полупроводника

**Fig. 1.** A device for depositing metal onto the surface of a semiconductor

Для практического получения контактов металл – полупроводник использовались подложки из кристаллического арсенида галлия, выращенные методом Чохральского. Все плоскости сколов кристаллов имели ориентацию (001), (010), (100). Для обеспечения минимальной шероховатости подконтактные площадки были первоначально отполированы с применением мелкозернистой полировальной пасты.

Формула для расчета толщины никелевого контакта

$$D = \frac{kIt}{\rho S}, \quad (1)$$

где  $k = 0,3041 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл – электрохимический эквивалент металла (двухвалентный Ni);  $t$  – время электрохимического осаждения;  $I$  – сила подаваемого тока;  $\rho = 8902$  кг/м<sup>3</sup> – плотность объемного Ni;  $S$  – площадь получаемого контакта металл – полупроводник. Активная площадь поверхности напыления металла равнялась 20 мм<sup>2</sup> ( $j = 4,5$  мкА/мм<sup>2</sup>), а сила тока контролировалась на уровне  $I = 90$  мкА. При времени осаждения равном 600 с (10 мин) получаем никелевый контакт с расчетным значением толщины 92 нм.

После получения контактов для контроля размеров контактных площадок

данные пленки визуально наблюдались в металлографическом микроскопе «Биомед ММР-3» [13]. Для оценки механических свойств контактов их поверхности исследовались на шероховатость в режиме силовой туннельной микроскопии (СТМ) [14] на микроскопе «Протон» СММ-2000 [15]. Параметры шероховатостей поверхности вычислялись с помощью автоматизированной программы ScanMaster для СММ-2000.

## Результаты и их обсуждение

Согласно описанной нами методике [16], были получены никелевые контакты на поверхности полупроводниковых восьми образцов, имеющих форму как прямоугольных параллелепипедов, так и круглых дисков.

Первоначально были определены параметры шероховатостей поверхности контактных структур с помощью программы ScanMaster. Качественные результаты сканирования для образцов не отличались, поэтому в таблице 1 отражены базовые характеристики микрорельефа кристалла арсенида галлия и осажденного металла только для одного процесса получения наноконтакта.

**Таблица 1.** Базовые характеристики микрорельефа GaAs и Ni.**Table 1.** Basic characteristics of the microrelief of GaAs and Ni.

Характеристики микрорельефа	Поверхности		
	1	2	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 $D_q$	9,180 <sup>0</sup>	8,723 <sup>0</sup>	18,777 <sup>0</sup>
Средний локальный наклон $D_a$	6,903 <sup>0</sup>	5,966 <sup>0</sup>	10,855 <sup>0</sup>
Относительная длина профиля $L_0$	1,013	1,011	1,038

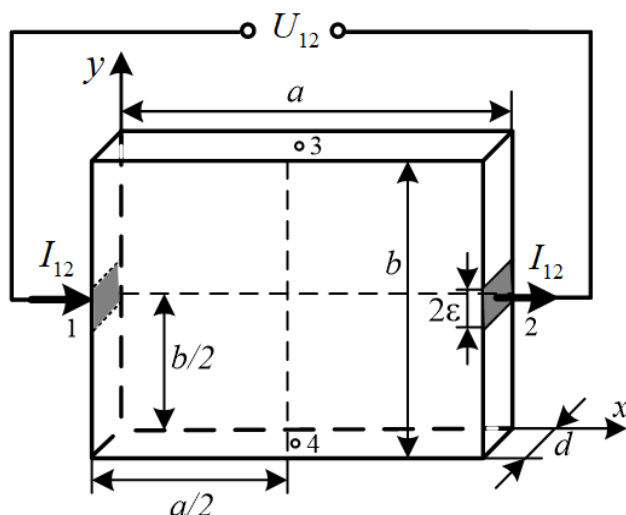
*Примечание.* Поверхности структур: 1 – полупроводник GaAs до напыления никеля; 2 – центр осажденной пленки Ni; 3 – рельеф контакта Ni на стыке с полупроводником.

На основе данных таблицы 1 видно, что шероховатость поверхности скана 2 минимальна (в средней области контакта), а максимальна для скана 3 (вблизи края контакта). Соответственно, можно сделать вывод, что шероховатость возрастает вблизи границы пленки и значительно уменьшается в средней части. Также выявлено, что в области границы с арсенидом галлия шероховатость никеля превышает первоначальное значение. Поэтому для практического выделения качественных однородных по толщине пленок пограничные области по периметру образовавшегося контакта частично нужно удалять механически или вытравливать. В центральной же части, согласно данным сканирования, пленка сглаживает поверхность подложки, именно ее и следует использовать в практических целях для создания контактной структуры.

Первоначально были получены четыре контактные структуры на основе невырожденных полупроводниковых образцов GaAs. Позиционирование никелевых

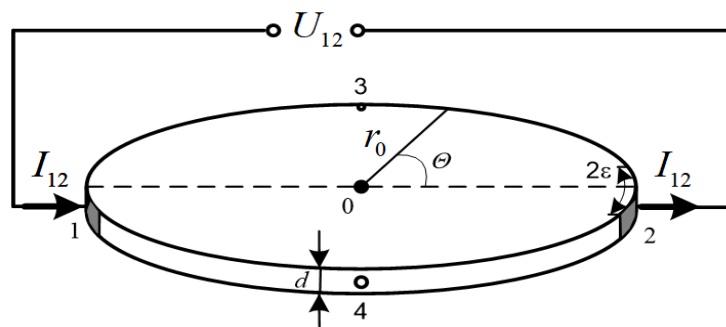
контактных структур на поверхности образцов арсенида галлия показано на рисунке 2 для прямоугольного полупроводника и на рисунке 3 – для образца в форме шайбы. Средняя толщина осажденного металлического слоя управляемо контролировалась в диапазоне около 90 нм. После осаждения никеля для подключения измерительных устройств поверхность полученного металлического контакта изначально обрабатывалась ортофосфорной кислотой, после чего по аналогичной технологии на контакт осаждалась медь.

В нашей установке (рис. 1) производилась замена никелевого зонда на медный и при плотности тока около 5 мкА/мм<sup>2</sup> осуществлялось осаждение меди (из 10% раствора медного купороса) на поверхность никелевого контакта на протяжении 15 мин. Полученная структура Cu/Ni-GaAs позволяла применять паянные контакты на основе припоя ПОС-61 (температура плавления 180–190°C) для включения в измерительную цепь.



**Рис. 2.** Позиционирование металлических пленок Ni на прямоугольном полупроводнике

**Fig. 2.** Positioning of metal films Ni on a rectangular semiconductor



**Рис. 3.** Позиционирование металлических пленок Ni на полупроводнике в форме шайбы

**Fig. 3.** Positioning of Ni metal films on a puck-shaped semiconductor

**Таблица 2.** Параметры полупроводников и контактов ( $\pm 0,05$  мм)

**Table 2.** Dimensions of prototypes and contacts ( $\pm 0.05$  mm)

Образец	Материал	Диаметр $2R$ , мм	Длина $a$ , мм	Ширина $b$ , мм	Толщина $d$ , мм	Контакт $2\epsilon$ , 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

Теория расчета электрического поля в области прямоугольного образца с двумя токовыми контактами на его гранях

(рис. 2) описана в работе [17] и окончательное выражение для потенциала представимо в виде

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

где  $I_{12}$  – ток, протекающий через контакты 1 и 2;  $\sigma$  – удельная электропроводность полупроводника.

Для образца в форме тонкой шайбы (рис. 3) с диаметрально противоположно расположенными токовыми контактами размером  $2\varepsilon \times d$  формулу для расчета двумерного электрического потенциала удобно представить в полярных координатах  $(r, \Theta)$  [17]

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

$$R_{12\text{теор}} = \frac{a}{\sigma b d} \left[ 1 + \frac{4b}{a\pi} \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \left( \frac{\sin \frac{\pi n \varepsilon}{b}}{\frac{\pi n \varepsilon}{b}} \right)^2 \times \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{\pi n a}{b}\right) - 1}{\operatorname{sh}\left(\frac{\pi n a}{b}\right)} \right\} \right]. \quad (5)$$

Для образца в форме тонкой шайбы или диска, на поверхности которого диаметрально симметрично расположены два контакта (рис. 5), омическое сопротивление определяется формулой [17]:

$$R_{12\text{теор}} = \frac{4}{\pi \sigma d} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{1}{m} \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi m \varepsilon}{r_0}\right)}{\frac{\pi m \varepsilon}{r_0}} \right)^2 \right\}. \quad (6)$$

Для получения теоретических значений потенциалов (2) – (3) и сопротивлений (5) – (6) с погрешностью меньше 0,1% для полупроводниковых приборов и пленок с физическими характеристиками, пред-

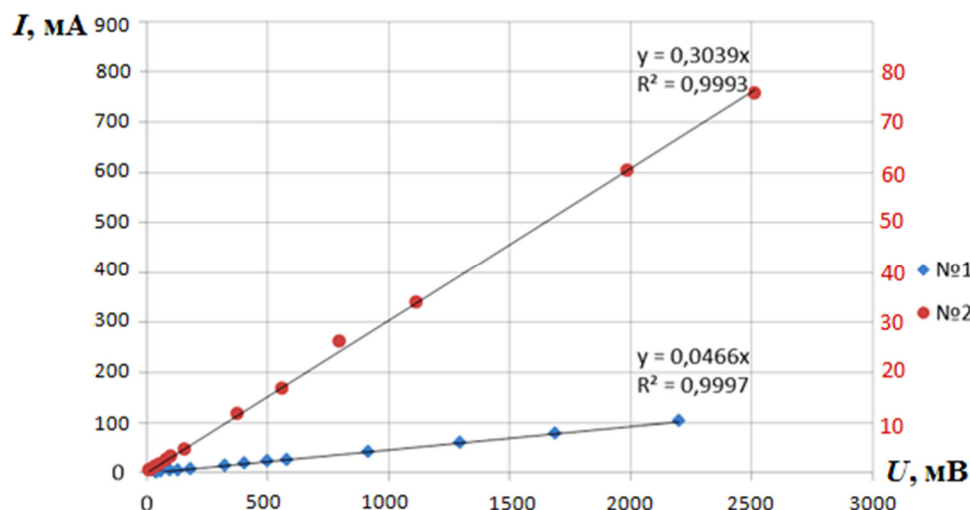
где  $\Theta$  – полярный угол, определяемый согласно рисунку 2.

Представленные выражения (2), (3) позволяют решить задачу расчета о вычислении объемного сопротивления полупроводника правильной геометрической формы, через теоретическую разность усредненных потенциалов на токовых контактах:

$$R_{12\text{теор}} = \frac{\langle \varphi_1 \rangle - \langle \varphi_2 \rangle}{I_{12}}. \quad (4)$$

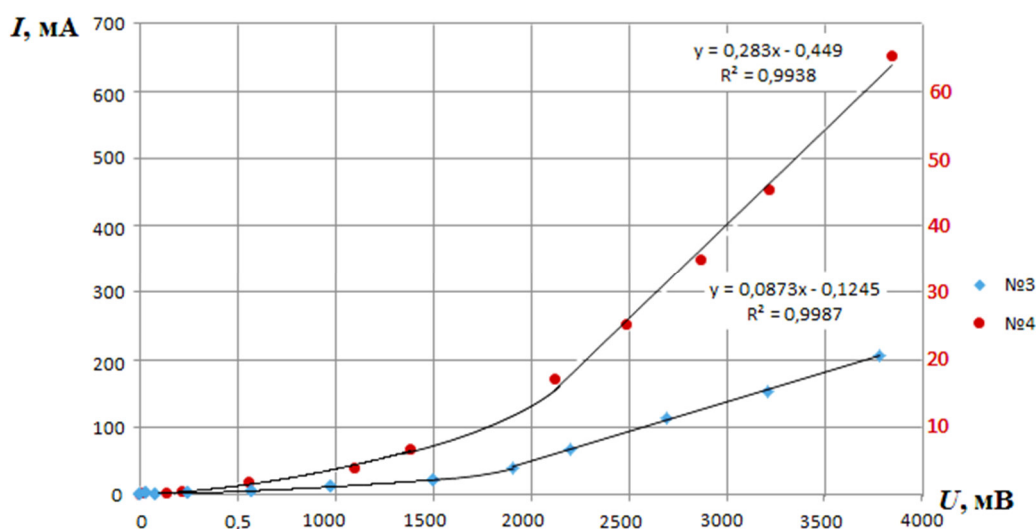
Для полупроводникового образца прямоугольной геометрии омическое сопротивление с малыми токовыми металлическими контактами (рис. 4) определяется выражением [18]

ставленными в таблице 2, достаточно использовать первые 100 членов соответствующих рядов. Вольт-амперные характеристики контактов Ni-GaAs измеряли при комнатной температуре ( $\approx 20^\circ \text{C}$ ) и исключении источников фотогенерации носителей зарядов. Результаты экспериментальных исследований ВАХ показаны на рисунках 4 и 5. Выявленные электрические характеристики контактов: Ni-p-GaAs демонстрирует линейную зависимость тока от напряжения и по определению является омическим контактом; Ni-n-GaAs показывает существенную контактную разность потенциалов и нелинейность ВАХ при напряжении ниже 1,5 В.



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики образцов 1 и 2 при  $I_{\min} = 2,3$  мА,  $U_{\min} = 1,5$  мВ

**Fig. 4.** Volt-ampere characteristics of samples 1 and 2 at  $I_{\min} = 2.3$  mA,  $U_{\min} = 1.5$  mV



**Рис. 5.** Вольт-амперные характеристики образцов 3 и 4 при  $I_{\min} = 2$  мА,  $U_{\min} = 1,4$  мВ

**Fig. 5.** Volt-ampere characteristics of samples 3 and 4 at  $I_{\min} = 2$  mA,  $U_{\min} = 1.4$  mV

Для линейных участков ВАХ при помощи программного обеспечения Excel была рассчитана достоверность аппроксимации ( $R^2$ ) и стандартные коэффициенты зависимостей  $y = ax + b$  (табл. 3). Определение концентрации носителей заряда выполнено классическим четырехконтактным методом ван дер Пау [19], холловские измерения также позволили определить типы проводимости полупроводниковых

кристаллов GaAs. Удельное сопротивление было вычислено по линейным участкам вольт-амперных характеристик с применением формул (5) и (6). Для определения значения холловских разностей потенциалов применялись зонды из вольфрама, которые прижимным методом крепились к поверхности полупроводника согласно схемам на рисунках 2 и 3 (контакты 3, 4).



**Таблица 3.** Измеренные основные электрические параметры образцов**Table 3.** Measured main electrical parameters of the samples

Образец	Материал	$U_{\text{cont}}, \text{В}$	$R_{12}, \text{Ом}$	$\sigma, (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	$n, 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$d, 10^{-7} \text{ м}$
1	p-GaAs (прямоуг.)	0	21,46	25,26	3,81	3,6
2	p-GaAs (круглый)	0	3,29	43,48	53,90	0,9
3	n-GaAs (прямоуг.)	1,49	11,20	806,45	6,17	5,0
4	n-GaAs (круглый)	1,59	3,53	2027,20	16,10	3,1

Величина контактной толщины перехода на поверхности металл – полупроводник определена в рамках модели резкого перехода [20]:

$$D_{\text{cont},n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(E_m - E_c)}{n_c e^2}};$$

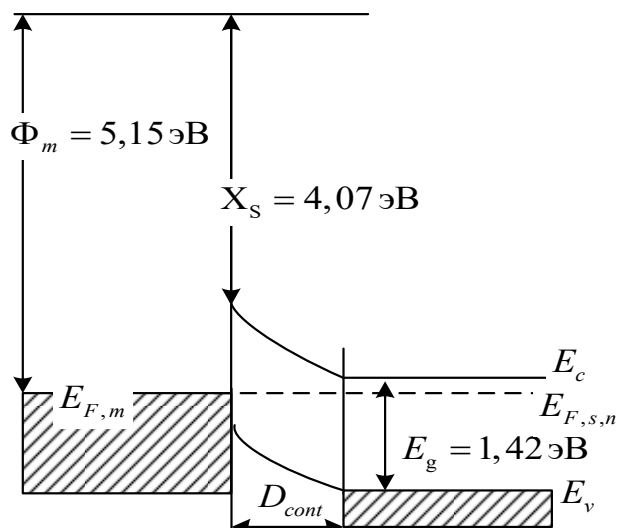
$$D_{\text{cont},p} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(E_v - E_{F,m})}{n_v e^2}}, \quad (7)$$

где  $n_c, n_v$  – концентрация электронов и дырок соответственно;  $E_{F,m}$  – уровни Ферми металла;  $E_c, E_v$  – энергия положительных уровней электронной проводимости и валентных дырок;  $\varepsilon = 13$  [20].

Представленные вольт-амперные характеристики электрохимически полученных контактов указывают на существенное различие потенциального барьера металл – полупроводник для никелевых контактов на невырожденных образцах *n*-GaAs и *p*-GaAs. Для качественного пояснения различий ВАХ контактов Ni-GaAs от типа проводимости полупроводника рассмотрим энергетические диаграммы соответствующих структур, на

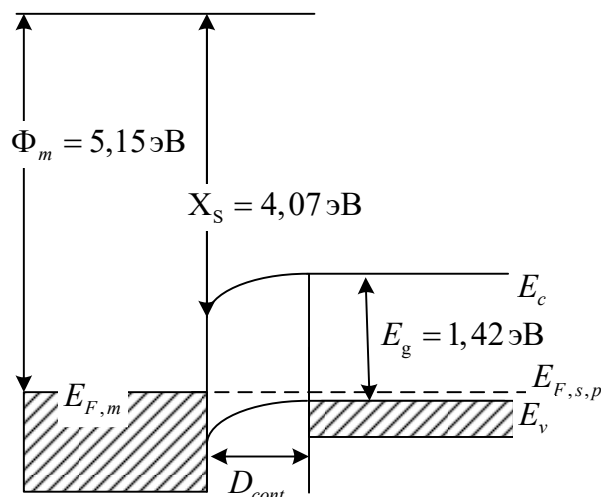
основе модели Шоттки – Мотта [21]. На рисунках 6 и 7 приведены модели идеальных контактов никеля к кристаллам *n*-GaAs и *p*-GaAs соответственно. При построении зонных диаграмм использованы следующие стандартные обозначения:  $E_{F,m}$  – уровень Ферми металла;  $\chi_s$  – энергия электронного сродства;  $\Phi_m$  – работа выхода электрона из металла;  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;  $E_c$  – дно зоны проводимости;  $E_{F,s,n}$  – уровень Ферми полупроводника *n*-типа;  $E_v$  – потолок валентной зоны;  $E_{F,s,p}$  – уровень Ферми полупроводника *p*-типа;  $D_{\text{cont}}$  – ширина области пространственного заряда [21].

Представленные на рисунках 6, 7 модели показывают, что в случае контакта никеля с полупроводником GaAs электронного типа проводимости получаем потенциальный барьер около 1 эВ, для дырочного GaAs барьер существенно меньше – 0,3–0,4 эВ. Соответственно барьер Ni-*p*-GaAs может преодолеваться электронами с на порядок меньшими значениями энергий, чем в случае преодоления барьера Ni-*n*-GaAs.



**Рис. 6.** Зонная диаграмма контакта Ni-*n*-GaAs, *n*-GaAs – невырожденный

**Fig. 6.** Zone diagram of the Ni-*n*-GaAs contact, *n*-GaAs is non-degenerate



**Рис. 7.** Зонная диаграмма контакта Ni-*p*-GaAs, *p*-GaAs – невырожденный

**Fig. 7.** Band diagram of the Ni-*p*-GaAs contact, *p*-GaAs – non-degenerate

Высоколегированные (вырожденные) полупроводники на основе арсенида галлия обладают высокой подвижностью электронов, пониженной чувствительностью к нагреву и большой скоростью переноса насыщенных электронов [21]. Применение высоколегированного полупроводника на основе GaAs в полупроводниковых лазерах обусловлено его уникальной способностью генерации когерентного излучения в широком диапазоне частот от ИК до УФ [6]. Соответственно, представляет научный и практический ин-

терес исследование свойств магнитных контактов Ni к вырожденному GaAs. Согласно известной литературе [21] примесный GaAs является вырожденным при концентрации примесей более  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

По аналогии с предыдущим экспериментом для измерения толщины никелевого покрытия на поверхности вырожденного полупроводника использовалась формула (1). Согласно описанной выше методике, были получены никелевые контакты с характерным размером  $2\varepsilon = 2 \text{ мм}$ .

Вырожденные полупроводниковые образцы имели прямоугольную форму, и их размеры приведены в таблице 4.

Для получения экспериментальных вольт-амперных характеристик нами проведены измерения на 4 образцах разной

степени легирования (табл. 4), результаты измерений представлены в таблице 5. Данные по концентрации носителей тока определены на основе измерений ЭДС Холла по методу ван дер Пау [19].

**Таблица 4.** Размеры опытных высоколегированных образцов и электрохимических контактов (погрешность  $\leq 0,05$  мм)

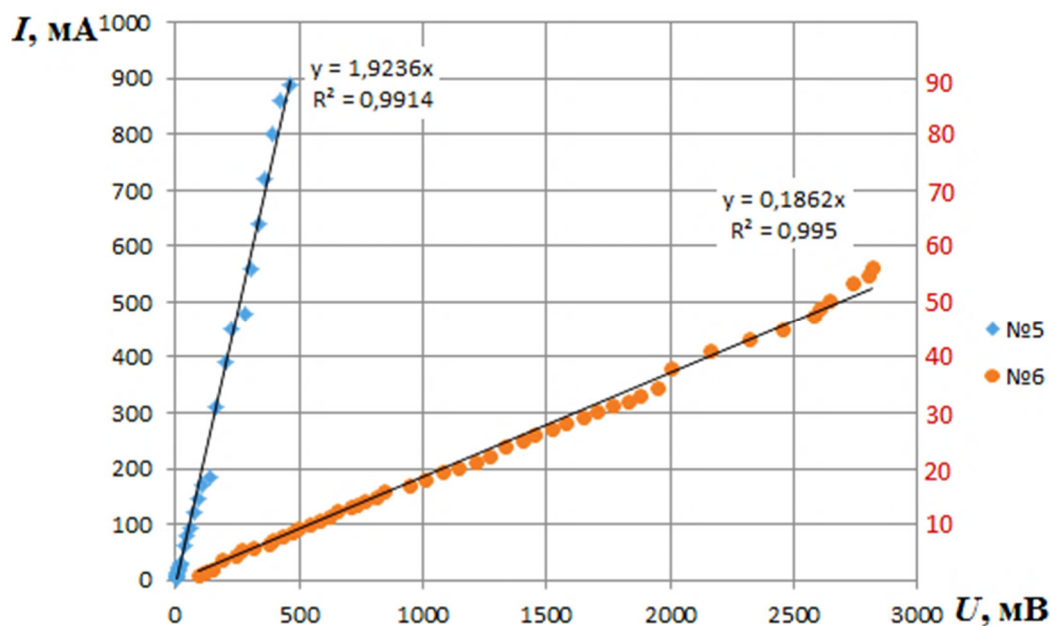
**Table 4.** Dimensions of experimental high-alloy samples and electrochemical contacts (error  $\leq 0.05$  mm)

Образец	Материал	Длина $a$ , мм	Ширина $b$ , мм	Толщина $d$ , мм	Контакт $2\varepsilon$ , мм
5	$n$ -GaAs	25	15	2,2	2
6	$n$ -GaAs	37	20,6	5,4	2
7	$p$ -GaAs	21,1	8,3	2,2	2
8	$p$ -GaAs	23,7	8,7	2,7	2

**Таблица 5.** Измеренные основные электрические параметры структур с вырожденными полупроводниками

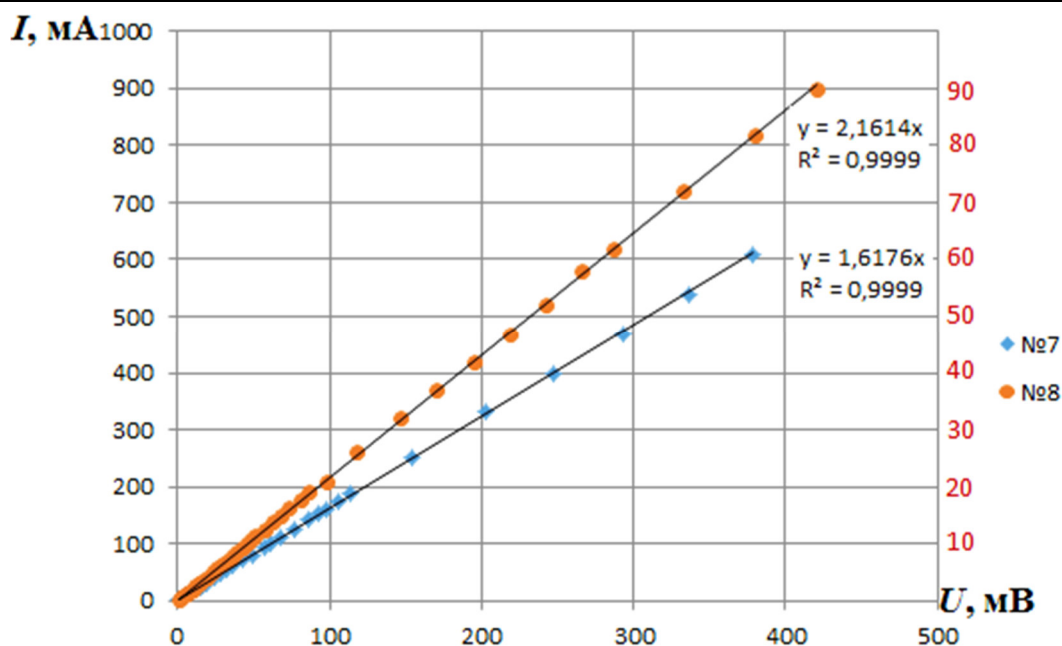
**Table 5.** Measured main electrical parameters of structures with degenerate semiconductors

Образец	материал	$U_{cont}$ , В	$R_{12}$ , Ом	$\sigma$ , $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	$n$ , $10^{25} \text{ м}^{-3}$	$D_{cont}$ , $10^{-8} \text{ м}$
5	$n$ -GaAs	0	0,527	14,37	1,41	1,1
6	$n$ -GaAs	0	22,1	0,12	0,18	2,9
7	$p$ -GaAs	0	0,433	4,13	1,56	0,6
8	$p$ -GaAs	0	0,477	2,85	1,71	0,5



**Рис. 8.** Вольт-амперные характеристики вырожденных образцов  $p$ -типа 5 и 6, при  $I_{min} = 1$  мА,  $U_{min} = 1,4$  мВ

**Fig. 8.** Volt-ampere characteristic of degenerate  $p$ -type samples 5 and 6, at  $I_{min} = 1$  mA,  $U_{min} = 1.4$  mV

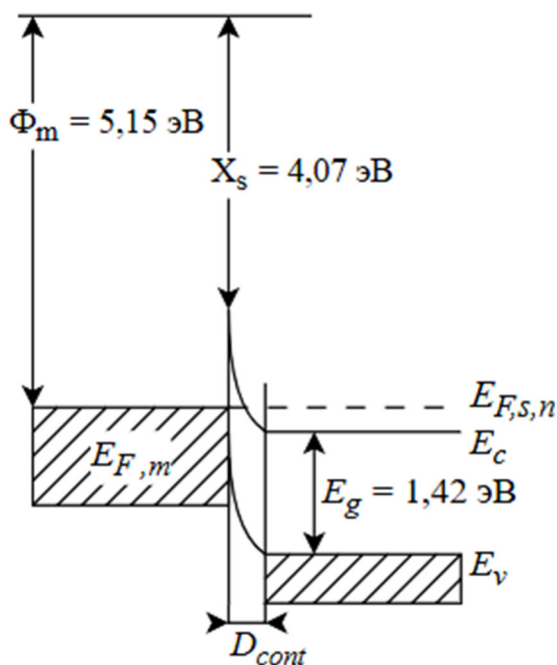


**Рис. 9.** Вольт-амперные характеристики вырожденных образцов  $n$ -типа 7 и 8, при  $I_{\min} = 2,4$  мА,  $U_{\min} = 1$  мВ

**Fig. 9.** Volt-ampere characteristic of degenerate samples of  $n$ -type 7 and 8, at  $I_{\min} = 2.4$  mA,  $U_{\min} = 1$  mV

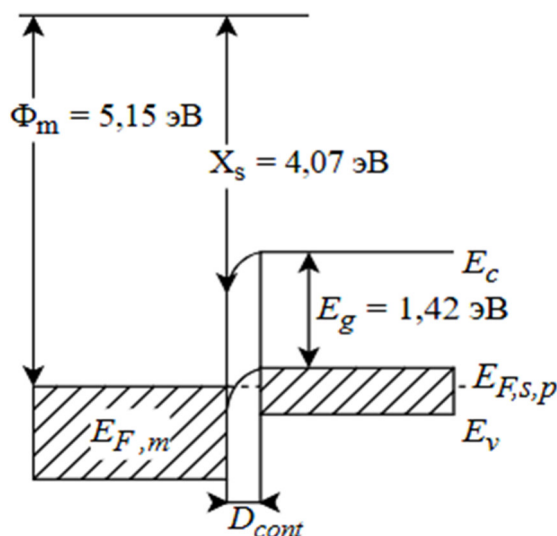
На рисунках 10 и 11 представлены зонные диаграммы контактов никеля на по-

верхности вырожденного полупроводника  $n$ - и  $p$ -типа соответственно.



**Рис. 10.** Зонная диаграмма контакта Ni- $n$ -GaAs,  $n$ -GaAs – вырожденный

**Fig. 10.** Zone diagram of the Ni  $n$ -GaAs contact,  $n$ -GaAs is degenerate



**Рис. 11.** Зонная диаграмма контакта Ni-*p*-GaAs, *p*-GaAs – вырожденный

**Fig. 11.** Zone diagram of the Ni-*p*-GaAs contact, *p*-GaAs is degenerate

В сравнении с невырожденным GaAs, видно, что для вырожденных полупроводников при концентрации основных носителей более  $\sim 10^{25} \text{ м}^{-3}$  получаем только линейную область, что свидетельствует о высоком качестве контактов металл – полупроводник предложенным в работе методом. Для вырожденных полупроводников *n*-типа энергия Ферми расположена в зоне проводимости, а у полупроводников *p*-типа  $E_F$  находится в валентной зоне. Использование вырожденного полупроводника в структурах Ni-GaAs приводит к существенному понижению контактной разницы потенциалов, которая оценена нами по формуле (8). У используемых нами образцов вырожденных полупроводников  $D_{cont}$  на один порядок меньше, чем у невырожденных, что обуславливает высокую проницаемость контакта металл – вырожденный полупроводник. Согласно полученным экспериментам такой контакт можно считать омическим при токах  $> 1 \text{ мА}$  и напряжении  $> 1 \text{ мВ}$ .

## Выводы

Весомую роль в электронике играют не только барьерные, но и омические контакты. Главными требованиями к омиче-

ским контактам являются их низкое сопротивление, температурная стабильность и малая шероховатость поверхности. Всем перечисленным требованиям отвечают несплавные омические контакты, в том числе полученные предложенным в работе локально-капельным электролитическим методом. Основным преимуществом предлагаемого метода для научных, учебно-научных и заводских лабораторий является возможность создания контактной структуры в требуемой зоне поверхности полупроводника, при этом близлежащая область образца не нарушается. Капельный электрохимический метод изготовления металлических наноструктур позволяет создавать контакт Ni-GaAs с прогнозируемыми свойствами и толщиной металлической пленки за счет непрерывности потока осаждения.

Согласование экспериментальных линейных ВАХ для никелевых контактов к *p*-GaAs, полученных капельным электрохимическим методом и теоретической модели Шоттки – Мотта, свидетельствует о высоком качестве химической чистоты границы раздела металл – полупроводник.

Полученная контактная структура Ni-*n*-GaAs для невырожденных материалов имеет нелинейную область при напряжениях менее 1,5 В. В свою очередь, при повышении концентрации носителей более  $\sim 10^{25} \text{ м}^{-3}$  (для вырожденных полупроводников) зависимость тока от напряжения контакт Ni-*n*-GaAs проявляет исключительно линейную зависимость ВАХ, при ширине области пространствен-

ного заряда ( $D_{\text{cont}}$ ) на порядок меньше, чем у невырожденных полупроводников.

Подводя итог, можно констатировать, что используемая в данной работе локально-капельная технология получения никелевых пленок на поверхности арсенида галлия позволяет получать качественные, однородные омические контакты металл – полупроводник.

### Список литературы

1. Sze S.M., Li Y., Ng K.K. Physics of semiconductor devices. 4th ed. New Jersey: Wiley, 2021. 944 p.
2. Rudan M. Physics of semiconductor devices. New York: Springer New York, 2015. 649 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-1151-6>.
3. Blank T.V., Gol'dberg Y.A. Mechanisms of current flow in metal-semiconductor ohmic contacts // Semiconductors. 2007. Vol. 41, no. 11. P. 1263–1292. <https://doi.org/10.1134/S1063782607110012>.
4. ToF-SIMS analysis of Au/Ge/Ni Ohmic Contacts for n GaAs / A. Prado, A.L. Manzano, L. Alarcon, O. Grizzi, H. Pastoriza // 24th International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS-24). La Rochelle, 2024. 1 p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12869.87528>.
5. Electrical and optical properties of schottky diodes fabricated by electrodeposition of Ni films on n-GaAs / M. Hacıismailoglu, M. Ahmetoglu, M. Hacıismailoglu, M. Alper, T. Batmaz // Sensors and Actuators A: Physical. 2022. Vol. 347. P. 113931. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113931>.
6. Shur M. Physics of Semiconductor Devices. Prentice Hall, 1990. 680 p.
7. Lebedev M.V. Modification of the atomic and electronic structure of III–V semiconductor surfaces at interfaces with electrolyte solutions (Review) // Semiconductors. 2020. Vol. 54. P. 699–741 p. <https://doi.org/10.1134/S1063782620070064>.
8. Phase formation between Ni thin films and GaAs substrate / R. Selma, C. Perrin, S. Zhiou, M. Benoudia, M. Texier, K. Hoummada // Scripta Materialia. 2017. Vol. 141. P. 28–31. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.07.011>.
9. Electrochemical formation and surface topography of Nickel nanofilms on Copper / V.V. Filippov, S.E. Luzyanin, D.A. Bakeev, M.B. Smirnov // 2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). Lipetsk: IEEE, 2022. P. 770–774. <https://doi.org/10.1109/summa57301.2022.9973884>.
10. Au/Ni-Au as a contact for p-type GaAs / S. Jones, E. Bancroft, S. Jarvis, M. Hayne // Semiconductor Science and Technology. 2024. Vol. 39, is. 12. P. 12501. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6641/ad8df7>.
11. Bari G.A. Electrodeposition of Nickel // Modern Electroplating / ed. by M. Schlesinger, M. Paunovic. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2010. P. 79–111. <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch3>.
12. Nickel Plating Handbook. Toronto: Nickel Institute, 2022. 104 p.
13. Условия формирования и топология поверхности никелевых нанопленок на меди / В.В. Филиппов, С.Е. Лузянин, Е.С. Нефедова, Д.В. Токарева // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 11, № 3. С. 59–76.
14. Chen J. Introduction to scanning tunneling microscopy. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press, 2021. 496 p. <http://dx.doi.org/10.1093/oso/9780198856559.001.0001>.

15. Логинов Б.А., Логинов П.Б., Логинов В.Б. Зондовая микроскопия: применения и рекомендации по разработке // Наноиндустрия. 2019. Т. 12, № 6. С. 352-365. <http://dx.doi.org/10.22184/1993-8578.2019.12.6.352.364>.
16. Filippov V.V., Mitsuk S.V., Luzyanin S.E. Measuring the resistance of metal-semiconductor contacts produced by drop electrochemical method // 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, (SUMMA) 2020. Lipetsk: IEEE, 2020. P. 871-875. <https://doi.org/10.1109/SUMMA50634.2020.9280818>.
17. Филиппов В.В., Лузянин С.Е., Мищук С.В. Методы решений уравнений Лапласа и Пуассона применительно к электродинамике полупроводников. Липецк: Липец. гос. пед. ун-т имени П.П. Семёнова-Тян-Шанского, 2023. 86 с.
18. Filippov V.V., Mitsuk S.V. Modelling magnetoresistance effect in limited anisotropic semiconductors // Chinese Physics Letters. 2017. Vol. 34, no. 7. P. 077201. <https://dx.doi.org/10.1088/0256-307X/34/7/077201>.
19. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
20. Шалимова К.В. Физика полупроводников. 4-е изд. СПб.: Лань, 2010. 384 с.
21. Божков В.Г. Контакты металл – полупроводник: физика и модели. Томск: Изд. дом Том. гос. ун-та, 2016. 528 с.

## References

1. Sze S. M., Li Y., Ng K. K. Physics of semiconductor devices. 4th ed. New Jersey: Wiley; 2021. 944 p.
2. Rudan M. Physics of semiconductor devices. New York: Springer; 2015. 649 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-1151-6>.
3. Blank T.V., Gol'dberg Y.A. Mechanisms of current flow in metal-semiconductor ohmic contacts. *Semiconductors*. 2007;41(11):1263–1292. <https://doi.org/10.1134/S1063782607110012>.
4. Prado A., Manzano A.L., Alarcon L., Grizzi O., Pastoriza H. ToF-SIMS analysis of Au/Ge/Ni ohmic contacts for n GaAs. *24th International Conference on Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS-24)*. La Rochelle; 2024. 1 p. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12869.87528>.
5. Hacıismailoglu M., Ahmetoglu M., Hacıismailoglu M., Alper M., Batmaz T. Electrical and optical properties of schottky diodes fabricated by electrodeposition of Ni films on n-GaAs. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2022;347:113931. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113931>.
6. Shur M. Physics of semiconductor devices. Prentice Hal; 1990. 680 p.
7. Lebedev M.V. Modification of the atomic and electronic structure of III–V semiconductor surfaces at interfaces with electrolyte solutions (Review). *Semiconductors*. 2020;54:699-741. <https://doi.org/10.1134/S1063782620070064>.
8. Selma R., Perrin C., Zhiou S., Benoudia M., Texier M., Hoummada K. Phase formation between Ni thin films and GaAs substrate. *Scripta Materialia*. 2017;141:28-31. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.07.011>.
9. Filippov V.V., Luzyanin S.E., Bakeev D.A., Smirnov M.B. Electrochemical formation and surface topography of nickel nanofilms on copper. *2022 4th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk: IEEE; 2022. 770-774. <https://doi.org/10.1109/summa57301.2022.9973884>.
10. Jones S., Bancroft E., Jarvis S., Hayne M. Au/Ni-Au as a contact for p-type GaAs. *Semiconductor Science and Technology*. 2024;39(12):12501. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6641/ad8df7>.
11. Bari G.A. Electrodeposition of Nickel. In: Schlesinger M., Paunovic M. (eds.) Modern electroplating. 5th Ed. New York: John Wiley & Sons; 2010. P. 79-111. <https://doi.org/10.1002/9780470602638.ch3>.

12. Nickel plating handbook. Toronto: Nickel Institute; 2022. 104 p.
13. 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 Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2021;11(3):59-76. (In Russ.)
14. Chen J. Introduction to scanning tunneling microscopy. 3rd ed. Oxford: Oxford University Press; 2021. 496 p. <http://dx.doi.org/10.1093/oso/9780198856559.001.0001>.
15. Loginov B.A., Loginov P.B., Loginov V.B. Probe microscopy: applications and recommendations for development. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2019;12(6):352-365. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22184/1993-8578.2019.12.6.352.364>.
16. Filippov V.V., Mitsuk S.V., Luzyanin S.E. Measuring the resistance of metal-semiconductor contacts produced by drop electrochemical method. In: *2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. Lipetsk: IEEE; 2020. P. 871-875. <https://doi.org/10.1109/SUMMA50634.2020.9280818>.
17. Filippov V.V., Luzyanin S.E., Mitsuk S.V. Methods for solving the Laplace and Poisson equations as applied to the electrodynamics of semiconductors. Lipetsk: Lipeck. gos. ped. un-t imeni P. P. Semyonova-Tyan-Shanskogo; 2023. 86 p. (In Russ.)
18. Filippov V.V., Mitsuk S.V. Modelling magnetoresistance effect in limited anisotropic semiconductors. *Chinese Physics Letters*. 2017;34(7):077201. <https://dx.doi.org/10.1088/0256-307X/34/7/077201>.
19. Batavin V.V., Kontsevoy Yu.A., Fedorovich Yu.V. Measurement of parameters of semiconductor materials and structures. Moscow: Radio i svyaz; 1985. 264 p. (In Russ.)
20. Shalimova K.V. Physics of semiconductors. 4th ed. St Petersburg: Lan; 2010. 384 p. (In Russ.)
21. Bozhkov V.G. Metal-semiconductor contacts: physics and models. Tomsk: Izd. dom Tomsk. gos. un-ta; 2016. 528 p.

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Филиппов Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и биомедицинской техники, Липецкий государственный технический университет; профессор кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семёнова-Тян-Шанского; профессор кафедры естественных и технических наук, Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий), Липецкий казачий институт технологий и управления (филиал), г. Липецк, Российская Федерация  
e-mail: [wwfilippow@mail.ru](mailto:wwfilippow@mail.ru),  
ORCID: 0000-0003-4323-351X

**Vladimir V. Filippov**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Physics and Biomedical Engineering, Lipetsk State Technical University; Professor of the Department Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky; Professor of the Department of Natural and Technical Sciences; Moscow State University of Technology and Management named after K.G. Razumovsky (First Cossack University); Lipetsk Cossack Institute of Technology and Management (branch), Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: [wwfilippow@mail.ru](mailto:wwfilippow@mail.ru),  
ORCID: 0000-0003-4323-351X



**Лузянин Сергей Евгеньевич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация,  
e-mail: luzyanin\_se@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-9788-6500

**Бакеев Дмитрий Александрович**, аспирант кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация,  
e-mail: bakeev.98@mail.ru,  
ORCID: 0000-0001-8212-2447

**Климентьев Вадим Владимирович**, преподаватель кафедры математики и физики, Липецкий государственный педагогический университет имени П.П. Семенова-Тян-Шанского, г. Липецк, Российская Федерация,  
e-mail: i@vklm.ru,  
ORCID: 0009-0001-3498-1308

**Sergey E. Luzyanin**, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: luzyanin\_se@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-9788-6500

**Dmitriy A. Bakeev**, Postgraduate Student of the Department of Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: bakeev.98@mail.ru,  
ORCID: 0000-0001-8212-2447

**Vadim V. Klimentyev**, Lecturer in the Department of Mathematics and Physics, Lipetsk State Pedagogical University named after P.P. Semenov-Tyan-Shansky, Lipetsk, Russian Federation,  
e-mail: i@vklm.ru,  
ORCID: 0009-0001-3498-1308