

**В. С. Дмитриев**

## **МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ К GaAs**

*В статье приведены результаты исследования влияния предварительной обработки полупроводниковой пластины, режимов нанесения и термообработки контактов Ag-Ge-In/n-n<sup>+</sup>GaAs на удельное переходное сопротивление.*

**Ключевые слова:** *арсенид галлия, тройной сплав, вакуумное напыление, термообработка, удельное сопротивление, омический контакт.*

### **Введение**

При изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на арсениде галлия одной из важнейших технологических операций является формирование омических контактов (ОК) [1, 2]. Для создания ОК используют двойные или более сложные сплавы на основе меди, серебра, золота, палладия с примесью металлов (кадмия, магния, алюминия, индия и других [2 – 5]), которые легко окисляются. Сопротивление эрозии этой группы сплавов базируется на защитном действии оксидных пленок, препятствующих испарению, но не препятствующих контактной проводимости. Величину контактного сопротивления омического контакта в значительной степени определяет технология его создания [3 – 11].

**Целью этой статьи** является исследование и установление влияния предварительной обработки полупроводниковой пластины, режимов нанесения и термообработки контактов Ag-Ge-In/n-n<sup>+</sup>GaAs на удельное переходное сопротивление.

### **Экспериментальные исследования**

Для исследования использовали n-n<sup>+</sup>GaAs(111)В эпитаксиальный монокристаллический с толщиной эпитаксиального слоя  $d_{э.с.}=2$  мкм, концентрацией носителей в эпитаксиальном слое  $n_{э.с.}=2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, концентрацией носителей в подложке  $n_{подл.}=10^{18}$  см<sup>-3</sup> и подвижностью  $\mu > 5000$  см<sup>2</sup>/(В·с). Для создания ОК к арсениду галлия выбран тройной сплав Ag-Ge-In (75%-20%-5% по весу соответственно), где Ag – основной материал, Ge – легирующая примесь, а In улучшает смачиваемость. Сплавы серебра подобного типа достаточно хорошо сопротивляются коррозии, сохраняя низкое контактное сопротивление [3 – 5, 8 – 12]. Серебро под действием электрических разрядов окисляется, но окислы серебра электропроводящие и легко диссоциируют (температура диссоциации ~ 573 К). В результате окисление почти не сказывается на устойчивости контактного сопротивления серебряных контактов.

Для изготовления омических контактов необходимо получить у поверхности полупроводника концентрацию примесей  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Существуют различные способы [2] увеличения концентрации носителей заряда в приповерхностном слое. Легирование поверхности металлом происходит при обработке поверхности полупроводника в растворах [13 – 16], которые содержат примеси различных металлов.

Химическую полировку полупроводниковой подложки проводят с целью сглаживания неровностей и уменьшения шероховатости поверхности. Особенность соединения GaAs заключается в разной скорости растворения полупроводника на плоскости (111) с гранями А и В с разным для них характером химических связей поверхностных атомов подложки. При использовании одинакового травителя сторона (111) В полируется (гладкая, зеркальная), сторона (111) А – матовая, с развитой мозаичной структурой [14].

Проведенный сравнительный анализ известных полирующих травителей показал, что среди травителей, используемых для химической полировки [13 – 16] GaAs, травление в серноокислом травителе дает более качественную поверхность.

При проведении химической обработки пластин GaAs в серноокислом травителе

$H_2SO_4:H_2O_2:H_2O$  (3:1:1) рекомендована дополнительная выдержка пластины в течение  $(1...1,3) \cdot 10^3$  секунд в диоксиантарной кислоте  $HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH$  с последующей промывкой в горячей, холодной дистиллированной и деионизированной воде, а также в метиловом спирте. Установлено, что выдержка в диоксиантарной кислоте в течение  $(1...1,3) \cdot 10^3$  секунд после химической полировки в смеси  $3H_2SO_4-1H_2O_2-1H_2O$  снижает значение удельного переходного сопротивления до  $5 \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>.

Исследовано влияние на удельное переходное сопротивление контакта  $Ag-Ge-In/n-n^+GaAs$  предварительного отжига пластин арсенида галлия при температурах 673...873 К в течение 30...150 секунд (табл. 1).

Таблица 1

Удельное переходное сопротивление  $\rho_k$  контактов  $Ag-Ge-In/n-n^+GaAs$ , подложка которых прошла предварительный отжиг

Температура предварительного отжига $GaAs$ -подложки, К	Удельное переходное сопротивление контактов $\rho_k$ , Ом·см <sup>2</sup>				
	Партии $GaAs$ -пластин				
	№1	№2	№3	№4	№5
673	$9 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
698	$8,6 \cdot 10^{-2}$	$7,50 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$
723	$8 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$
748	$7,15 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
773	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
798	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
823	$7 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
848	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
873	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
Время отжига, с	30	60	90	120	150

Установлено (рис. 1), что предварительный температурный отжиг подложки при 873 К в течение 60 секунд в вакууме при остаточном давлении порядка  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр снижает значение удельного переходного сопротивления омических контактов до  $\rho_k = (5...7) \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>.

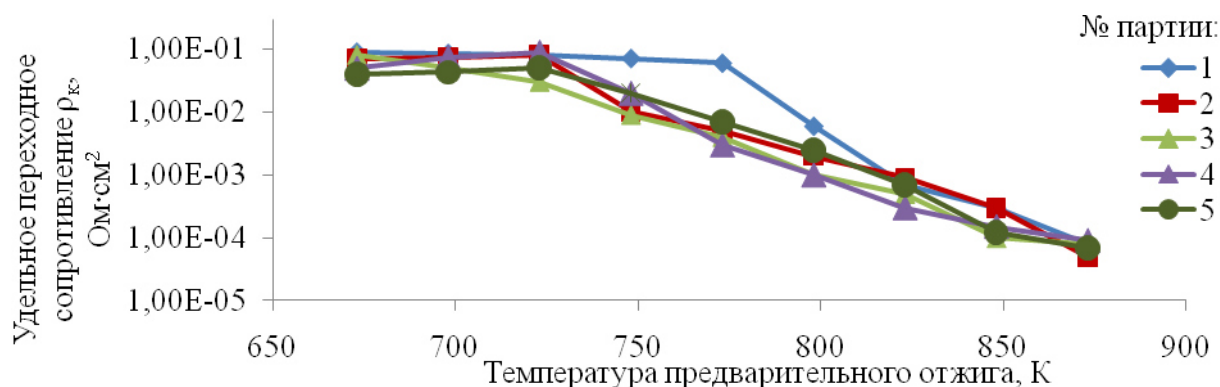


Рис. 1. Влияние предварительного отжига подложки на удельное переходное сопротивление контакта  $Ag-Ge-In/n-n^+GaAs$

Таким образом доказано, что качество омического контакта улучшается, если  $GaAs$ -подложку после химической обработки в серноокислом травителе выдержать в диоксиантарной кислоте в течение  $1,2 \cdot 10^3$  секунды и дополнительно отжечь в вакууме со степенью не менее  $1,2 \cdot 10^{-6}$  Торр при температуре 873 К в течение 60 секунд.

Нанесение контактного материала проводили методом вакуумного испарения при остаточном давлении не менее  $10^{-6}$  Торр. Измерение сопротивления контакта проводили компенсационным методом [17, 18]. Расчет удельного переходного сопротивления ОК проводили на основе метода эквивалентных схем [17, 18].

Формирование структуры омического контакта путем отжига проводили в вакууме со степенью не менее  $(2...6) \cdot 10^{-6}$  Торр. Отжиг контакта к GaAs необходим для введения в область границы контакта примеси или дефектов.

Исследовано влияние на удельное переходное сопротивление контакта температуры подложки при нанесении материала контакта методом термического испарения, скорости подъема температуры отжига, температуры и времени отжига, скорости охлаждения контакта. При расчете величины удельного переходного сопротивления использовали формулу [17]:

$$\rho_k = \frac{R_k b}{k \operatorname{cth}(ka)}, \quad (1)$$

где  $R_k$  – полное сопротивление контакта,  $\rho_k$  – удельное переходное сопротивление контакта,  $a$  – ширина контакта,  $b$  – длина контакта,  $\rho_{\text{пп}}$  – поверхностное сопротивление полупроводника. Значения  $k$ , соответствующие значениям  $R_k$ , находят из графического решения уравнения  $y_1 = cka$ ,  $y_2 = \operatorname{cth}(ka)$ , где  $c = R_k \cdot b / (\rho_{\text{пп}} \cdot a)$ .

Пределы измерения численных значений  $k$  выбраны из условия [17], что  $\rho_k / \rho_{\text{пп}}$  меньше одного порядка ( $k = 0,1 \div 10$ ) в соответствии с общими требованиями, предъявляемыми к контактам. Очевидно, что в случае, когда величина сопротивления контакта металл-полупроводник  $R_k > \rho_{\text{пп}}$ , то и удельное переходное сопротивление контакта, приведенное к единице площади,  $\rho_{k \text{ прив}} > \rho_{\text{пп}}$ , при этом наблюдается явление растекания токов, проходящих через контакт, в приконтактной области. При оптимальном режиме  $\rho_k$  контакта является «чистым» при  $\rho_k \leq \rho_{\text{пп}}$ . При  $\rho_k > \rho_{\text{пп}}$  удельное переходное сопротивление состоит только из переходного сопротивления растекания в приконтактной области.

Основная погрешность измерений при этом, выраженная в % от номинального значения измеряемого сопротивления при температуре  $293 \pm 2$  К и относительной влажности воздуха 80%, не превышала значений: а)  $\pm 0,1\%$  в пределах  $10^{-3} - 10^{-2}$  Ом, б)  $\pm 0,05\%$  в пределах  $10^{-2} - 10^{-8}$  Ом.

Выбор оптимальных значений температурной обработки контактов к GaAs с  $n_{3,c} = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> определялся необходимостью создать слой с повышенной концентрацией электронов за счет легирования германием. Режим отжига контакта должен обеспечить минимальное удельное переходное сопротивление контакта и неглубокое залегание границы раздела металл-полупроводник.

Напыление контактного материала проводили на предварительно подогретую подложку (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние температуры подложки на удельное переходное сопротивление контактов  $\rho_k$  Ag-Ge-In/n- $n^+$ GaAs**

Температура подложки, К	Удельное переходное сопротивление, Ом·см <sup>2</sup>		
	№ партии		
	1	2	3
423	$2 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
453	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
483	$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
513	$8 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$

По результатам исследования (табл. 2), лучшую адгезию контактного материала к арсениду галлия получено при температуре подложки 453 К,  $\rho_k = (4...7) \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup>.

Исследовали зависимость удельного переходного сопротивления омических контактов  $\rho_k$  от температуры и времени отжига в диапазоне температур 693...943 К и времени отжига 60...300 секунд (рис. 2).

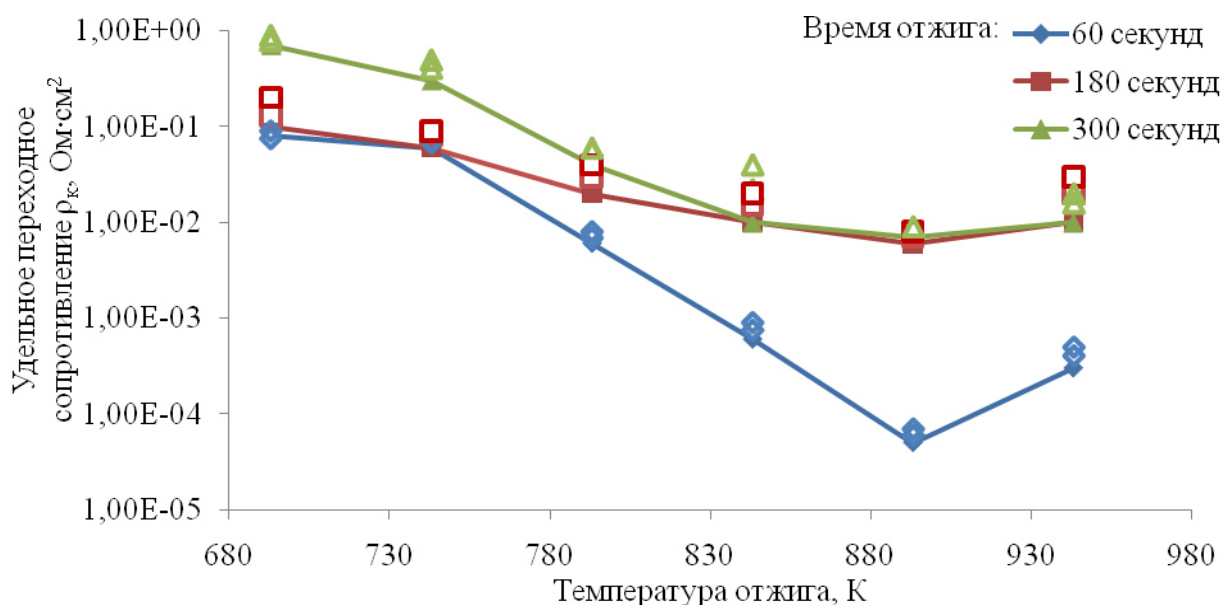


Рис. 2. Влияние температуры и времени отжига на удельное переходное сопротивление  $\rho_k$  контактов  $Ag-Ge-In/n-n^+GaAs$

Установлено, что время и температура отжига контактной структуры существенно влияют на качество омического контакта. Лучшие результаты  $\rho_k=(5...7)\cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup> получены при температуре отжига 893 К и времени отжига 60 секунд.

Линейность ВАХ изготовленных омических контактов не нарушалась при нагреве до температуры 453 К (рис. 3).

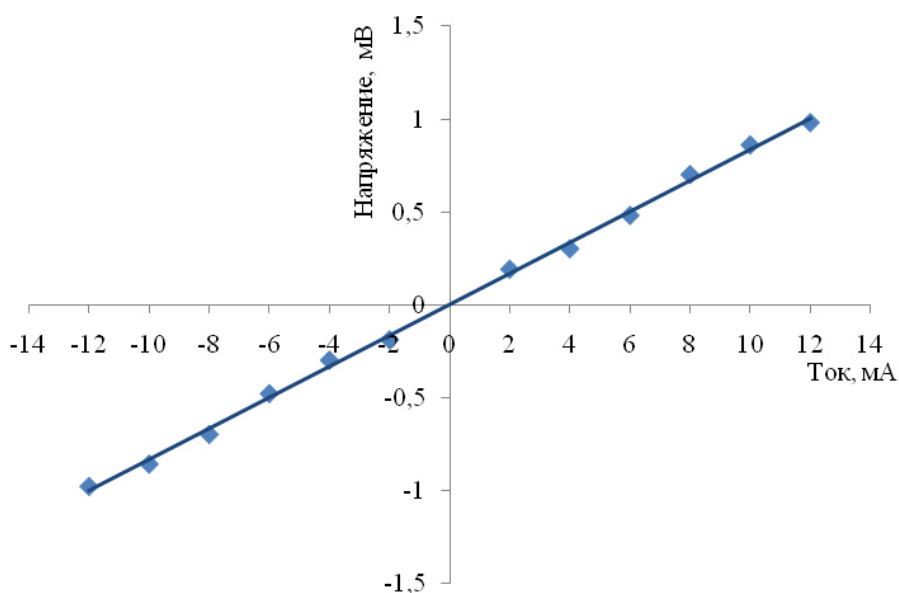


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика омического контакта  $Ag-Ge-In/n-n^+GaAs$ ,  $T_{отж}=893$  К,  $\tau_{отж}=60$  с

Исследовали (рис. 4) влияние на значение удельного переходного сопротивления омических контактов  $\rho_k$  скорости подъема температуры отжига в диапазоне 4,8...7,2 К/с и скорости охлаждения контакта в диапазоне 4,65...4,75 К/с (рис. 5).

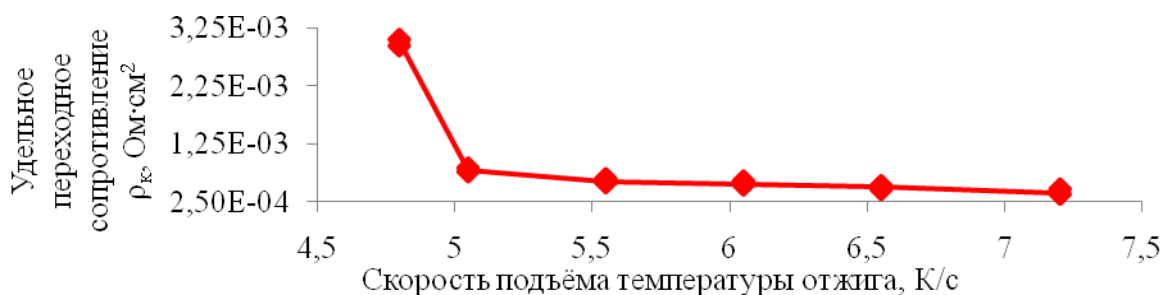


Рис. 4. Зависимость удельного переходного сопротивления омических контактов  $\rho_k$  от скорости подъема температуры отжига

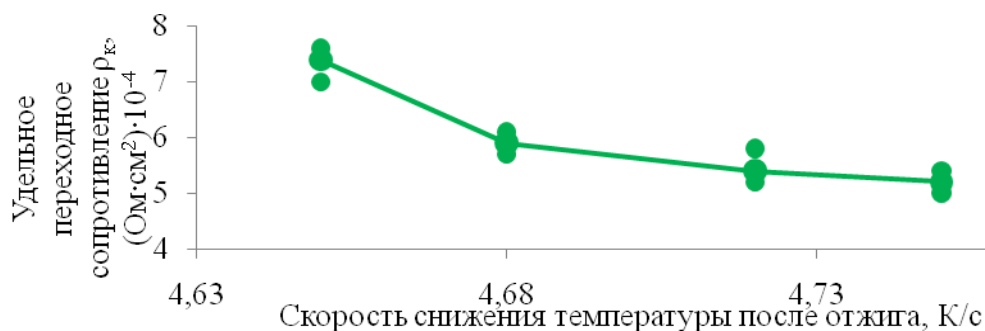


Рис. 5. Зависимость удельного переходного сопротивления омических контактов  $\rho_k$  от скорости охлаждения контакта

Установлено, что увеличение скорости подъема температуры отжига от 5,55 К/с до 7,2 К/с приводит к незначительному снижению величины удельного переходного сопротивления (рис. 4). Рекомендуемая скорость подъема температуры отжига 7,2 К/с.

Изменение скорости охлаждения контакта после отжига в интервале 4,72...4,75 К/с (рис. 5) практически не влияет на значение удельного переходного сопротивления. Рекомендуемая скорость охлаждения контакта после отжига 4,75 К/с.

### Выводы

Доказано, что дополнительная выдержка в диоксидантарной кислоте после обработки в серноокислом травителе и предварительный температурный отжиг в вакууме *GaAs*-подложки при 873 К в течение 60 секунд уменьшает удельное переходное сопротивление омического контакта *Ag-Ge-In/n-n<sup>+</sup>GaAs*.

Омические барьерные переходы на основе тройного сплава *Ag-Ge-In* (75% *Ag*, 20% *Ge*, 5% *In*) в *GaAs* с  $n_{э,с.} = 2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> обеспечивают достаточно низкое контактное сопротивление  $\rho_k = (5 \dots 7) \cdot 10^{-5}$  Ом·см<sup>2</sup> и линейность ВАХ при нанесении материала контакта на подогретую до температуры 453 К подложку и отжиге полученной структуры при 893 К в течение 60 с в вакууме при остаточном давлении не хуже  $1,2 \cdot 10^{-6}$  Торр, скорости подъема температуры отжига 7,2 К/с и скорости охлаждения контакта после отжига 4,75 К/с.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малошумящие арсенид-галлиевые усилители при воздействии электромагнитных помех повышенных интенсивностей [Электронный ресурс] / С. В. Платонов, Н. В. Пермяков, Б. И. Селезнев [и др.] // Вестник Новгородского государственного университета. – 2012. – № 67. – С. 29 – 32. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.novsu.ru/file/1010219>.
2. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition / S. M. Sze, K. K. Ng. – Hoboken : A John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 815 p.
3. Ti/Pd/Ag Contacts to n-Type GaAs for High Current Density Devices [Электронный ресурс] / P. Huo, I. Rey-Stolle // Journal of Electronic Materials. – 2016. – Vol. 45, № 6. – P. 2769 – 2775. – Режим доступа до ресурсу : <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-4432-6>.

4. Kawamura M. Electrical and morphological change of Ag–Ni films by annealing in vacuum / M. Kawamura, M. Yamaguchi, Y. Abe, K. Sasaki // *Microelectronic Engineering*. – 2005. – Vol. 82, № 3–4. – P. 277–282.
5. Christou A. Solid phase formation in Au: Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au: Ge GaAs ohmic contact systems / A. Christou // *Solid-State Electronics*. – 1979. – Vol. 22, № 2. – P. 141–149.
6. Дмитриев В. С. Влияние межфазной границы раздела на параметры омического контакта / В. С. Дмитриев, Л. Б. Дмитриева // *Материали за X международна научна практична конференция «Настоящи изследвания и развитие - 2014»* / В. С. Дмитриев, Л. Б. Дмитриева. – София : «Бял ГРАД-БГ» ООД. – 2014. – Т. 28. – С. 79–82. – (ISBN 978-966-8736-05-6).
7. Thermal stability of Ag films in air prepared by thermal evaporation / L. Jing, L. Fachun, L. Limei [and al.] // *Applied Surface Science*. – 2007. – Vol. 253, № 17. – P. 7036–7040.
8. Sugawara K. Comparison of the agglomeration behavior of Ag(Al) films and Ag(Au) films / K. Sugawara, M. Kawamura, Y. Abe, K. Sasaki // *Microelectronic Engineering*. – 2007. – Vol. 84, № 11. – P. 2476–2480.
9. Вартамян Т. А. Отложенное действие освещения на релаксацию гранулированной серебряной пленки при термическом отжиге / Т. А. Вартамян, Н. Б. Леонов, С. Г. Пржибельский // *Оптический журнал*. – 2013. – Т. 80, № 2. – С. 24–28.
10. Electrical and structural investigations of Ag-based Ohmic contacts for InAlAs/InGaAs/InP high electron mobility transistors [Электронный ресурс] / W. Zhao, L. Wang, I. Adesida // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 89, № 7. – P. 072105–1–072105–3. – Режим доступа до ресурсу : <http://dx.doi.org/10.1063/1.2337102>.
11. Kawamura M. Electrical and morphological change of Ag–Ni films by annealing in vacuum / M. Kawamura, M. Yamaguchi, Y. Abe, K. Sasaki // *Microelectronic Engineering*. – 2005. – Vol. 82, № 3–4. – P. 277–282.
12. Kim H. C. Improvement of the thermal stability of silver metallization / H. C. Kim, T. L. Alford // *Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 94, № 8. – P. 5393–5395.
13. Маркин Б. В. Влияние химической обработки на состав поверхности GaAs / Б. В. Маркин, В. В. Чикун // *Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ*. – 1990. – № 4. – С. 19.
14. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / [Б. Д. Луфт, В. А. Перевошиков, Н. М. Возмилова и др.]. – М. : Радио и связь, 1982. – 136 с.
15. Пат. 2319798 Российская Федерация, МПК Н 01 L 21/302. Способ получения атомно-гладкой поверхности подложки арсенида галлия / Безрядин Н. Н., Котов Г. И., Стародубцев А. А., Стрыгин В. Д., Арсентьев И. Н.; заявитель и патентообладатель ГОУВПО Воронежская государственная технологическая академия. – № 2006116830/15 ; заявл. 16.05.06 ; опубл. 20.03.08, Бюл. № 8.
16. Пат. 2402103 Российская Федерация, МПК Н 01 L 21/316. Способ пассивации поверхности GaAs. / Ерофеев Е. В., Ишуткин С. В., Кагадей В. А., Носаева К. С.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Научно-производственная фирма Микран». – №2009133993/28 ; заявл. 10.09.09 ; опубл. 20.10.10, Бюл. № 29.
17. Нисков В. Я. Измерение переходного сопротивления омических контактов к тонким слоям полупроводников / В. Я. Нисков // *Приборы и техника эксперимента*. – 1971. – № 1. – С. 235–237.
18. Нисков В. Я. Сопротивление омических контактов к тонким слоям полупроводников / В. Я. Нисков, Г. А. Кубецкий // *Физика и техника полупроводников*. – 1970. – Т. 4, № 9. – С. 1806–1808.

**Дмитриев Вадим Сергеевич** – заведующий учебно-научной лабораторией кафедры микроэлектронных информационных систем.

Запорожская государственная инженерная академия.