УДК 621.382.2/3

В. С. Дмитрієв

БАГАТОКОМПОНЕНТНІ ОМІЧНІ КОНТАКТИ ДО GaAs

У статті наведені результати дослідження впливу попередньої обробки напівпровідникової пластини, режимів нанесення та термообробки контактів Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs на питомий перехідний опір.

Ключові слова: *арсенід галію, потрійний сплав, вакуумне напилення, термообробка, питомий опір, омічний контакт.*

Вступ

Під час виготовлення напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем на арсеніді галію однією з найважливіших технологічних операцій є формування омічних контактів (ОК) [1, 2]. Для створення ОК використовують подвійні або більш складні сплави на основі міді, срібла, золота, паладію з домішкою металів (кадмію, магнію, алюмінію, індію та інших [2 – 5]), які легко окислюються. Опір ерозії цієї групи сплавів ґрунтується на захисній дії оксидних плівок, що перешкоджають випаровуванню, але не перешкоджають контактній провідності. Величину контактного опору омічного контакту значною мірою визначає технологія його створення [3 – 11].

Метою цієї статті є дослідження та встановлення впливу попередньої обробки напівпровідникової пластини, режимів нанесення та термообробки контактів *Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs* на питомий перехідний опір.

Експериментальні дослідження

Для дослідження використовували *n-n$^+$GaAs*(111)*B* епітаксійний монокристалічний із товщиною епітаксійного шару $d_{\text{е.ш.}}$=2 мкм, концентрацією носіїв у епітаксійному шарі $n_{\text{е.ш.}}=2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$, концентрацією носіїв у підкладці $n_{\text{підкл}}=10^{18}$ см$^{-3}$ та рухливістю μ>5000 см^2/(В·с). Для створення ОК до арсеніду галію було обрано потрійний сплав *Ag-Ge-In* (75%-20%-5% за вагою відповідно), де *Ag* – основний матеріал, *Ge* легуюча домішка, а *In* покращує змочуваність. Сплави срібла подібного типу досить добре пручаються корозії, зберігаючи низький контактний опір [3 – 5, 8 – 12]. Срібло під дією електричних розрядів окислюється, але оксиди срібла електропровідні та легко дисоціюють (температура дисоціації ~ 573 К). Унаслідок цього окислення майже не позначається на стійкості контактного опору срібних контактів.

Для виготовлення омічних контактів необхідно отримати біля поверхні напівпровідника концентрацію домішок 10^{18} см$^{-3}$. Існують різні способи [2] збільшення концентрації носіїв заряду у приповерхневому шарі. Легування поверхні металом відбувається під час обробки поверхні напівпровідника в розчинах [13 – 16], які містять домішки різних металів.

Хімічне полірування напівпровідникової підкладки проводять із метою згладжування нерівностей та зменшення шорсткості поверхні. Особливість сполуки *GaAs* полягає в різній швидкості розчинення напівпровідника на площині (111) з гранями *A* і *B* з різним для них характером хімічних зв'язків поверхневих атомів підкладки. За використання однакового травника сторона (111) *B* полірується (гладка, дзеркальна), сторона (111) *A* – матова, з розвинутою мозаїчною структурою [14].

Проведений порівняльний аналіз відомих полірувальних травників показав, що серед травників, які використовують для хімічного полірування [13 – 16] *GaAs*, травлення в сірчанокислому травнику дає більш якісну поверхню.

Під час проведення хімічної обробки пластин *GaAs* у сірчанокислому травнику H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (3:1:1) було рекомендовано додатково витримати пластину впродовж $(1...1,3)\cdot10^3$ секунд у диоксиянтарній кислоті *HOOC-CH*(*OH*)*-CH*(*OH*)*-COOH* з подальшим

промиванням у гарячій, холодній дистильованій та деіонізованій воді, а також у метиловому спирті. Установлено, що витримка в диоксиянтарній кислоті впродовж $(1...1,3)\cdot10^3$ секунд після хімічного полірування в суміші $3H_2SO_4$-$1H_2O_2$-$1H_2O$ знижує значення питомого перехідного опору до $5\cdot10^{-5}$ Ом·см^2.

Досліджено вплив на питомий перехідний опір контакту *Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs* попереднього відпалу пластин арсеніду галію за температур 673...873 К упродовж 30...150 секунд (табл. 1).

Таблиця 1

Питомий перехідний опір $\rho_к$ контактів *Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs*, підкладка яких пройшла попередній відпал

Температура попереднього відпалу *GaAs*-підкладки, К	Питомий перехідний опір контактів $\rho_к$, Ом·см^2				
	Партії *GaAs*-пластин				
	№1	№2	№3	№4	№5
673	$9\cdot10^{-2}$	$7\cdot10^{-2}$	$8\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-2}$	$4\cdot10^{-2}$
698	$8{,}6\cdot10^{-2}$	$7{,}50\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-2}$	$7{,}5\cdot10^{-2}$	$4{,}3\cdot10^{-2}$
723	$8\cdot10^{-2}$	$8\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-2}$	$9\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-2}$
748	$7{,}15\cdot10^{-2}$	$1\cdot10^{-2}$	$9\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-2}$	$2\cdot10^{-2}$
773	$6\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-3}$	$4\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-3}$	$7\cdot10^{-3}$
798	$6\cdot10^{-3}$	$2\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$1\cdot10^{-3}$	$2{,}5\cdot10^{-3}$
823	$7\cdot10^{-4}$	$9\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-4}$	$7\cdot10^{-4}$
848	$3\cdot10^{-4}$	$3\cdot10^{-4}$	$1\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$1{,}2\cdot10^{-4}$
873	$8\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-5}$	$8\cdot10^{-5}$	$9\cdot10^{-5}$	$7\cdot10^{-5}$
Час відпалу, с	30	60	90	120	150

Установлено (рис. 1), що попередній температурний відпал підкладки за 873 К впродовж 60 секунд у вакуумі за залишкового тиску порядку $2\cdot10^{-6}$ Торр знижує значення питомого перехідного опору омічних контактів до $\rho_к=(5...7)\cdot10^{-5}$ Ом·см^2.

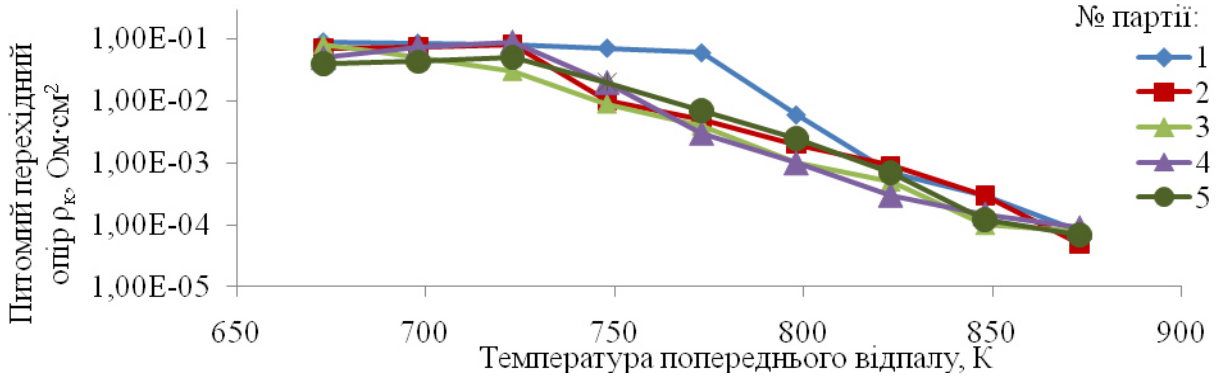

Рис. 1. Вплив попереднього відпалу підкладки на питомий перехідний опір контакту *Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs*

Таким чином доведено, що якість омічного контакту поліпшується, якщо *GaAs*-підкладку після хімічної обробки в сірчанокислому травнику витримати в диоксиянтарній кислоті впродовж $1{,}2\cdot10^3$ секунд та додатково відпалити у вакуумі із ступенем не менше за $1{,}2\cdot10^{-6}$ Торр за температури 873 К упродовж 60 секунд.

Нанесення контактного матеріалу проводили методом вакуумного випаровування за залишкового тиску не менше 10^{-6} Торр. Вимірювання опору контакту проводили компенсаційним методом [17, 18]. Розрахунок питомого перехідного опору ОК проводили на основі методу еквівалентних схем [17, 18].

Формування структури омічного контакту шляхом відпалу проводили у вакуумі із ступенем не менше за $(2...6)\cdot10^{-6}$ Торр. Відпал контакту до *GaAs* необхідний для введення в ділянку межі контакту домішки або дефектів.

Досліджено вплив на питомий перехідний опір контакту температури підкладки під час нанесення матеріалу контакту методом термічного випаровування, швидкості підйому температури відпалу, температури та часу відпалу, швидкості охолодження контакту. Під час розрахунку величини питомого перехідного опору використовували формулу [17]:

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

де $R_к$ – повний опір контакту, $\rho_к$ – питомий перехідний опір контакту, a – ширина контакту, b – довжина контакту, $\rho_{нп}$ – поверхневий опір напівпровідника. Значення k, що відповідають значенням $R_к$, знаходять із графічного рішення рівняння $y_1=cka$, $y_2=cth(ka)$, де $c=R_к \cdot b/(\rho_{нп} \cdot a)$.

Межі виміру чисельних значень k обрані з умови [17], що $\rho_к/\rho_{нп}$ менше одного порядку (k=0,1÷10) відповідно до загальних вимог, які пред'являють до контактів. Очевидно, що в разі, коли величина опору контакту метал-напівпровідник $R_к>\rho_{нп}$, то і питомий перехідний опір контакту, наведений до одиниці площі, $\rho_{к\ нав}>\rho_{нп}$, при цьому спостерігають явище розтікання струмів, котрі проходять крізь контакт, у приконтактній ділянці. За оптимального режиму $\rho_к$ контакту є «чистим» за умови $\rho_к \le \rho_{нп}$. За $\rho_к>\rho_{нп}$ питомий перехідний опір складається лише з перехідного опору розтікання у приконтактній ділянці.

Основна похибка вимірів при цьому, виражена у % від номінального значення вимірюваного опору при температурі +293±2 К і відносній вологості повітря 80%, не перевищувала значень: а) ±0,1% у межах 10^{-3}–10^{-2} Ом, б) ±0,05 % в межах 10^{-2}–10^{-8} Ом.

Вибір оптимальних значень температурної обробки контактів до *GaAs* з $n_{е.ш.}=2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ визначався необхідністю створити шар із підвищеною концентрацією електронів за рахунок легування германієм. Режим відпалу контакту повинен забезпечити мінімальний питомий перехідний опір контакту та неглибоке залягання межі розділу метал-напівпровідник.

Напилення контактного матеріалу проводили на попередньо підігріту підкладку (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив температури підкладки на питомий перехідний опір контактів $\rho_к$*Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs*

Температура підкладки, К	Питомий перехідний опір, Ом·см^2		
	№ партії		
	1	2	3
423	$2\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-2}$
453	$6\cdot10^{-5}$	$4\cdot10^{-5}$	$7\cdot10^{-5}$
483	$8\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	$4\cdot10^{-4}$
513	$8\cdot10^{-3}$	$9\cdot10^{-3}$	$6\cdot10^{-3}$

За результатами дослідження (табл. 2), найкращу адгезію контактного матеріалу до арсеніду галію одержано за температури підкладки 453 К, $\rho_к=(4...7)\cdot10^{-5}$ Ом·см^2.

Досліджували залежність питомого перехідного опору омічних контактів $\rho_к$ від температури та часу відпалу в діапазоні температур 693...943 К та часі відпалу 60...300 секунд (рис. 2).

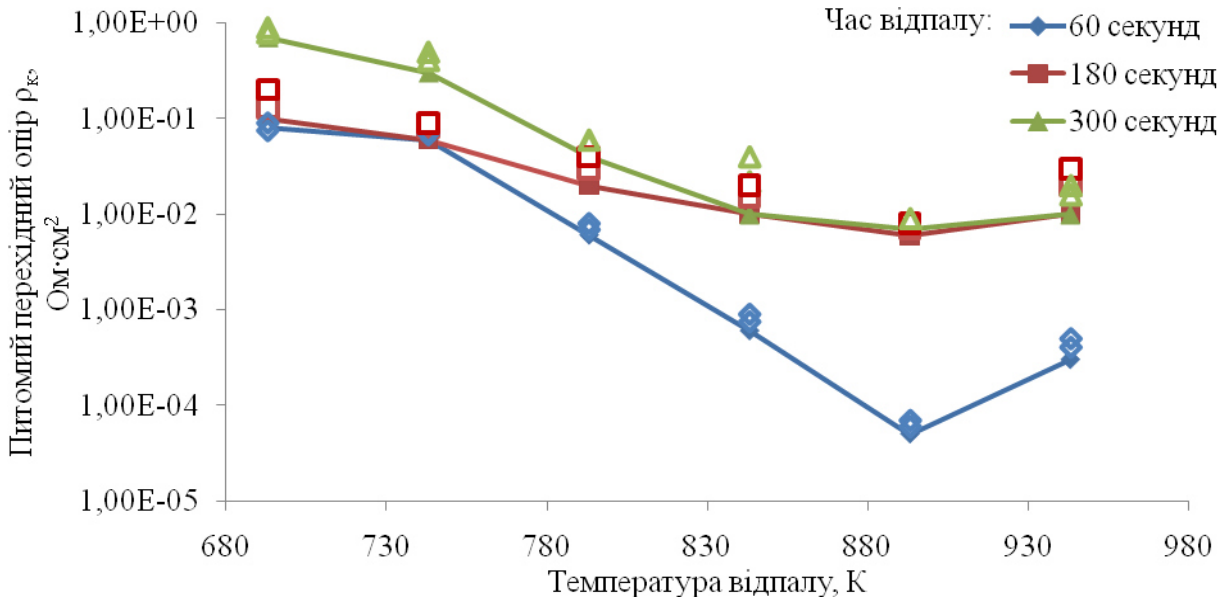

Рис. 2. Вплив температури та часу відпалу на питомий перехідний опір $\rho_к$ контактів *Ag-Ge-In/n-n*$^+$*GaAs*

Установлено, що час та температура відпалу контактної структури істотно впливають на якість омічного контакту. Кращі результати $\rho_к$=(5…7)·10^{-5} Ом·см^2 отримані за температури відпалу 893 К та часу відпалу 60 секунд.

Лінійність ВАХ виготовлених омічних контактів не порушували за нагріву до температури 453 К (рис. 3).

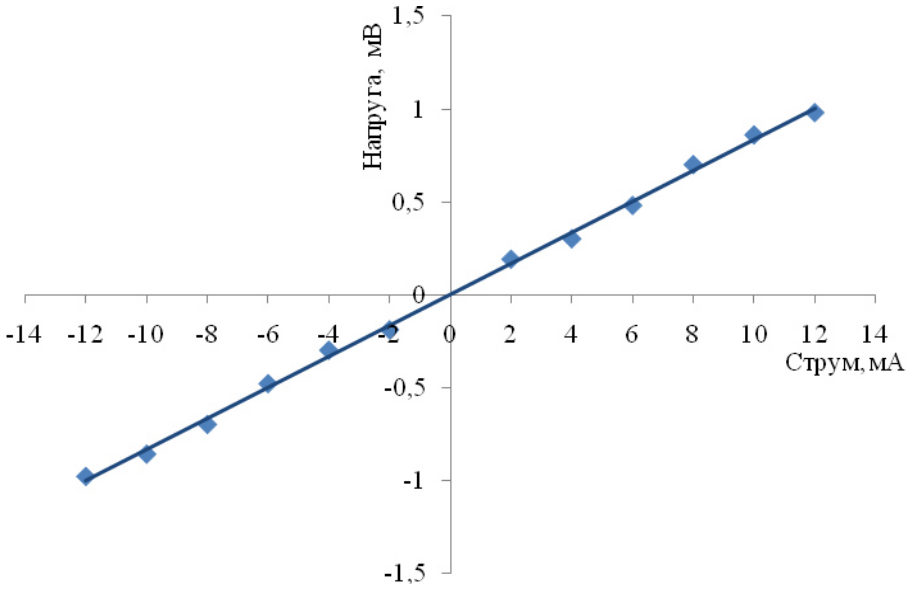

Рис. 3. Вольт-амперна характеристика омічного контакту *Ag-Ge-In/n-n*$^+$*GaAs*, $T_{відп}$=893 К, $\tau_{відп}$=60 с

Досліджували (рис. 4) вплив на значення питомого перехідного опору омічних контактів $\rho_к$ швидкості підйому температури відпалу в діапазоні 4,8...7,2 К/с та швидкості охолодження контакту в діапазоні 4,65...4,75 К/с (рис. 5).

Рис. 4. Залежність питомого перехідного опору омічних контактів $\rho_к$ від швидкості підйому температури відпалу

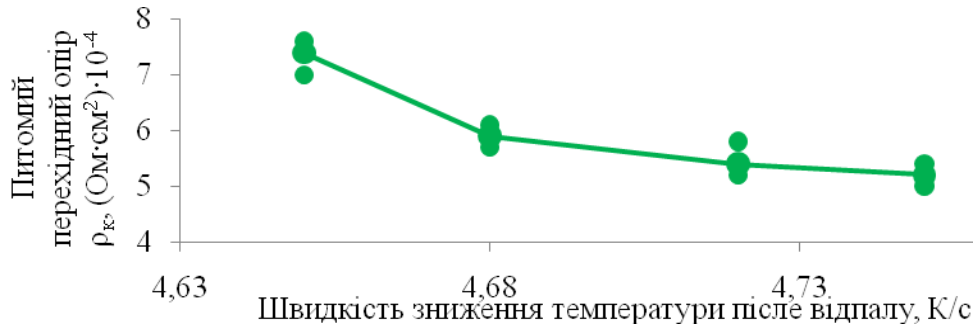

Рис. 5. Залежність питомого перехідного опору омічних контактів $\rho_к$ від швидкості охолодження контакту

Установлено, що збільшення швидкості підйому температури відпалу від 5,55 К/с до 7,2 К/с призводить до незначного зниження величини питомого перехідного опору (рис. 4). Рекомендована швидкість підйому температури відпалу 7,2 К/с.

Зміна швидкості охолодження контакту після відпалу в інтервалі 4,72...4,75 К/с (рис. 5) практично не впливає на значення питомого перехідного опору. Рекомендована швидкість охолодження контакту після відпалу 4,75 К/с.

Висновки

Доведено, що додаткова витримка в диоксіянтарній кислоті після обробки в сірчанокислому травнику та попередній температурний відпал у вакуумі *GaAs*-підкладки за 873 К упродовж 60 секунд знижують питомий перехідний опір омічного контакту *Ag-Ge-In/n-n*$^+$*GaAs*.

Омічні бар'єрні переходи на основі потрійного сплаву *Ag-Ge-In* (75% *Ag*, 20% *Ge*, 5% *In*) до *GaAs* з $n_{е.ш.}=2\cdot10^{16}$ см$^{-3}$ забезпечують достатньо низький контактний опір $\rho_к=(5...7)\cdot10^{-5}$ Ом·см^2 та лінійність ВАХ під час нанесення матеріалу контакту на підігріту до температури 453 К підкладку й відпалі отриманої структури за 893 К упродовж 60 с у вакуумі за залишкового тиску не гірше $1,2\cdot10^{-6}$ Торр, швидкості підйому температури відпалу 7,2 К/с і швидкості охолодження контакту після відпалу 4,75 К/с.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Малошумящие арсенид-галлиевые усилители при воздействии электромагнитных помех повышенных интенсивностей [Електронний ресурс] / С. В. Платонов, Н. В. Пермяков, Б. И. Селезнев [и др.] // Вестник Новгородского государственного университета. – 2012. – № 67. – С. 29 – 32. – Режим доступу 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 [Електронний ресурс] / P. Huo, I. Rey-Stolle // Journal of Electronic Materials. – 2016. – Vol. 45, № 6. – P. 2769 – 2775. – Режим доступу 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. Вартанян Т. А. Отложенное действие освещения на релаксацию гранулированной серебряной пленки при термическом отжиге / Т. А. Вартанян, 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 [Електронний ресурс] / W. Zhao, L. Wang, I. Adesida // Applied Physics Letters. – 2006. – Vol. 89, № 7. – P. 072105–1–072105–3. – Режим доступу 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. Перевощиков, Н. М. Возмилова и др.]. – М. : Радио и связь, 1982. – 136 с.

15. Пат. 2319798 Российская Федерация, МПК H 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 H 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.

Дмитрієв Вадим Сергійович – завідувач навчально-наукової лабораторії кафедри мікроелектронних інформаційних систем.

Запорізька державна інженерна академія.