

УДК 621.382.2/3

В. С. Дмитрієв¹**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ФОРМУВАННЯ ІНЖЕКТУЮЧИХ
БАР'ЄРНИХ ПЕРЕХОДІВ НА ОСНОВІ СРІБЛА
ДО АРСЕНІДУ ГАЛІЮ**¹Запорізька державна інженерна академія

Процеси, які відбуваються при взаємодії металів з напівпровідниковими сполуками A_3B_5 , є предметом інтенсивних досліджень, які підтвердили складність процесів, котрі протікають у контактах на межі розподілу фаз. Досліджено умови виготовлення та режими термічної обробки контакту $Ag/n-n^+GaAs$. Визначені: температура підкладки; температура відпалу, час відпалу; швидкість підвищення температури відпалу та охолодження для отримання бар'єрного переходу $Ag/n-n^+GaAs$ з висотою бар'єра 0,98 В. Підвищення висоти потенційного бар'єра пов'язане з поліпшенням адгезії плівок, а також початком взаємної дифузії хімічних елементів срібла, галію та миш'яку, що утворюють контакт.

Ключові слова: срібло, арсенід галію, висота бар'єра, термічна обробка.

Вступ

Важливе значення для отримання якісного бар'єрного переходу має метод нанесення контактного матеріалу на підкладку. Осадження металу шляхом конденсації парів у вакуумі — досить складний процес, який залежить, принаймні, від двох чинників: хімічних реакцій та перенесення речовин. На цей час досягнуто лише якісне розуміння цих явищ [1]. У разі нанесення на GaAs-підкладку плівки срібла методом вакуумного випаровування за рахунок теплоти конденсації і можливих хімічних реакцій відбувається руйнування ґратки в приповерхневому шарі напівпровідника ще до формування суцільної металевої плівки. Наслідки цієї стадії значною мірою визначаються умовами виготовлення контакту і режимами термообробок.

У порівнянні із золотом та паладієм [2, 3], які традиційно використовують для формування бар'єрних контактів у сучасному виробництві, срібло має більшу тепло- та електропровідність, відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію, що дозволяє зменшити товщину перехідного шару та, відповідно, покращити параметри та характеристики приладів з бар'єрами Шоттки на GaAs.

До основних недоліків відомих способів формування бар'єрного переходу $Ag/GaAs$ [2—6] відносять недостатню висоту бар'єра та низьку відтворюваність результатів. Отже є необхідність дослідження та розробки нових технологічних режимів виготовлення інжектуючих бар'єрних переходів на основі срібла до арсеніду галію з поліпшеними параметрами та характеристиками.

Результати досліджень

Для дослідження використовувався $n-n^+GaAs(111)B$ епітаксійний монокристалічний, $d_{e.ш.} = 2$ мкм, $n_{e.ш.} = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $n_{підкл} = 10^{18}$ см⁻³, $\mu > 5000$ см²/(В·с). Контакти $Ag/n-n^+GaAs$ виготовляли методом вакуумного випаровування. Високий вакуум (не гірше 10^{-6} Торр) в процесі термічного випаровування дозволяє отримати металеві плівки без забруднення. Товщина плівки контакту складала 0,5 мкм.

Арсенід галію відрізняється від металів й елементарних напівпровідників структурними особливостями, зумовленими наявністю в ньому двох типів атомів, тому кінетичні закономірності як у стадії окислення, так і в стадії розчинення окислених форм набувають складного характеру.

Обробка поверхні проводиться за допомогою різних хімічних процесів. При цьому створюються хімічно з'єднані з поверхню півки, які, будучи закінченням ґраток, забезпечують прийнятну щільність поверхневих станів. Якщо поверхня напівпровідника підготовлена так, що зміна електричного поля на поверхні під час роботи приладу та зміна навколишнього середовища помітно не впливають на характеристики приладу, то поверхня є пасивованою.

Хімічна обробка GaAs розглянута в роботах [4—6], але питання кінетики і механізмів реакцій в цих системах все ще не можна вважати вирішеним. Якщо під час виготовлення бар'єрного переходу здійснювати ретельний контроль всіх процесів і наносити метал на добре очищену поверхню в умовах високого вакууму, то можна спостерігати зміну властивостей контакту.

Процес хімічної обробки поверхні GaAs складався з таких етапів: знежирення у суміші толуолу і метилового спирту, полірування у суміші $3\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ та витримки у комплексоутворювачі $\text{HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH}$.

Введення до розчину травника діоксіянтранної кислоти сприяє створенню добре розчинних комплексних сполук і запобігає утворенню важкорозчинних продуктів реакції. Запропонований спосіб попередньої обробки дає можливість отримати прийнятну щільність поверхневих станів.

Для контактних пар метал-GaAs хімічні тенденції у формуванні міжфазної межі виражені гірше, ніж для інших напівпровідників A_3B_5 [7]. Ag входить до групи металів, результатом взаємодії яких з GaAs є взаємна дифузія і перемішування двох матеріалів; катіони напівпровідника сегрегують в півці металу, а також беруть участь в утворенні сплавів.

Досліджували умови виготовлення та режими термічної обробки контакту Ag/n-p⁺GaAs. Вольтамперні характеристики (ВАХ) контактів вимірювали чотиризондовим методом [8].

Досліджено вплив температури відпалу напиленої структури Ag/n-p⁺GaAs на висоту бар'єра у діапазоні температур $t_{\text{відп}} = 703 \dots 853 \text{ K}$ впродовж $3 \cdot 10^2 \dots 9 \cdot 10^2$ секунд (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив температури та часу відпалу контакту на висоту бар'єра

| Температура відпалу контактів, К | Висота бар'єра, В | | |
|--|-------------------|-----------|-----------|
| | № партії зразків | | |
| | 1 | 2 | 3 |
| 703 | 0,7±0,71 | 0,72±0,74 | 0,75±0,78 |
| 753 | 0,82±0,85 | 0,83±0,86 | 0,82±0,87 |
| 803 | 0,78±0,87 | 0,89±0,91 | 0,92±0,98 |
| 853 | 0,78±0,85 | 0,83±0,86 | 0,83±0,87 |
| Час відпалу контакту, $\cdot 10^2 \text{ c}$ | 3 | 9 | 6 |

ВАХ контактів Ag/n-p⁺GaAs показані на рис. 1.

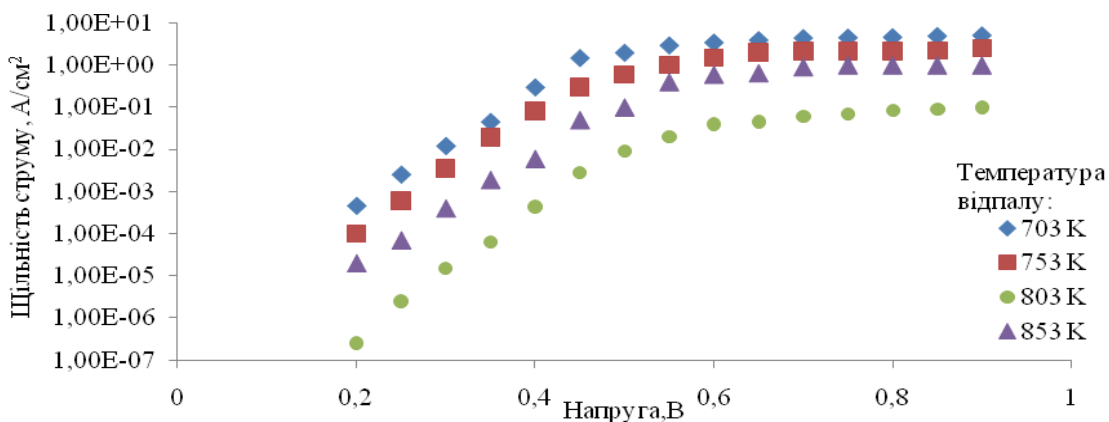


Рис. 1. Прямі вольтамперні характеристики контактів Ag/n-p⁺GaAs, виготовлених за різних температур відпалу (час відпалу $\tau_{\text{відп}} = 6 \cdot 10^2 \text{ c}$)

Висота бар'єра ϕ_B визначалася за методом вольтамперної характеристики згідно з [9]:

$$\phi_{Bn} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A^{**} T^2}{I_s} \right), \quad (1)$$

де k — стала Больцмана, Дж/град; T — температура навколишнього середовища, К; q — заряд електрона, Кл; A^{**} — ефективна стала Ричардсона, $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$, для GaAs $A^{**} = 120 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$ [9], I_s — щільність струму насичення, (A/cm^2), при $V = 0$, значення якого визначали методом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ бар'єрів Шотткі (рис. 2).

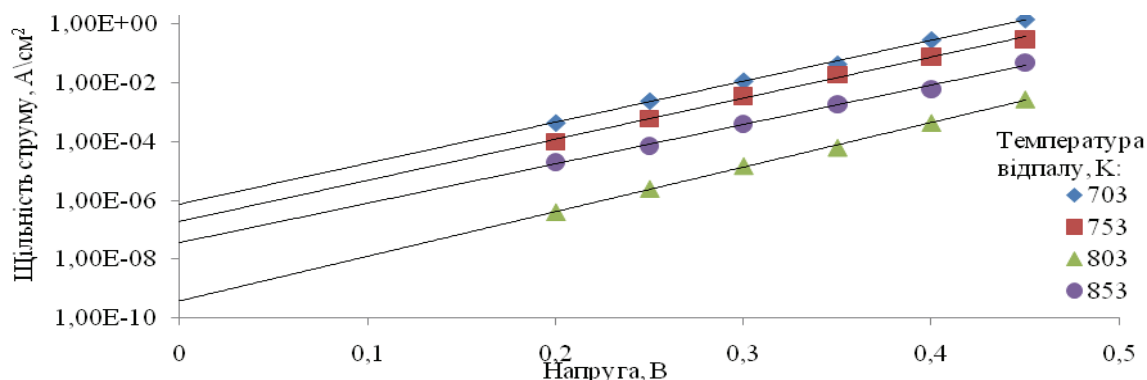


Рис. 2. Визначення методом лінійної екстраполяції значень щільності струму насичення за прямими гілками ВАХ контактів Ag/n-p⁺GaAs (температура відпалу $t_{\text{відп}} = 703 \dots 853$ К, час відпалу $\tau_{\text{відп}} = 6 \cdot 10^2$ с)

Встановлено (табл. 1), що висота бар'єрного переходу Ag/n-p⁺GaAs збільшується до 0,98 В при відпалі за $t_{\text{відп}} = 803$ К впродовж $\tau_{\text{відп}} = 6 \cdot 10^2$ секунд. Припускається, що підвищення висоти потенційного бар'єра ϕ_{Bn} пов'язане з поліпшенням адгезії плівок, а також початком взаємної дифузії хімічних елементів срібла, галію та миш'яку, що утворюють контакт.

Напилення срібла проводили у вакуумі на підкладки, температуру яких змінювали у діапазоні $t_{\text{підкл}} = 343 \dots 543$ К.

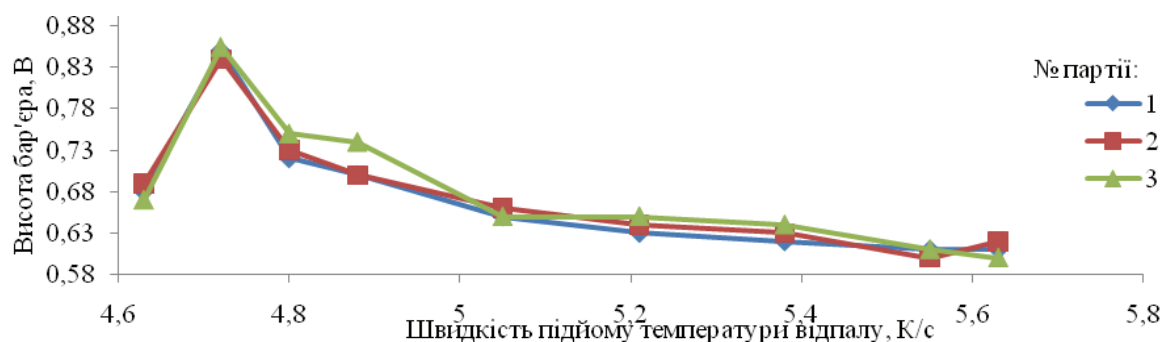
Встановлено, що найкращі значення ϕ_{Bn} отримані при нанесенні Ag на GaAs-підкладку за 393 К (табл. 2), незалежно від подальшої термообробки виготовленого контакту.

Таблиця 2

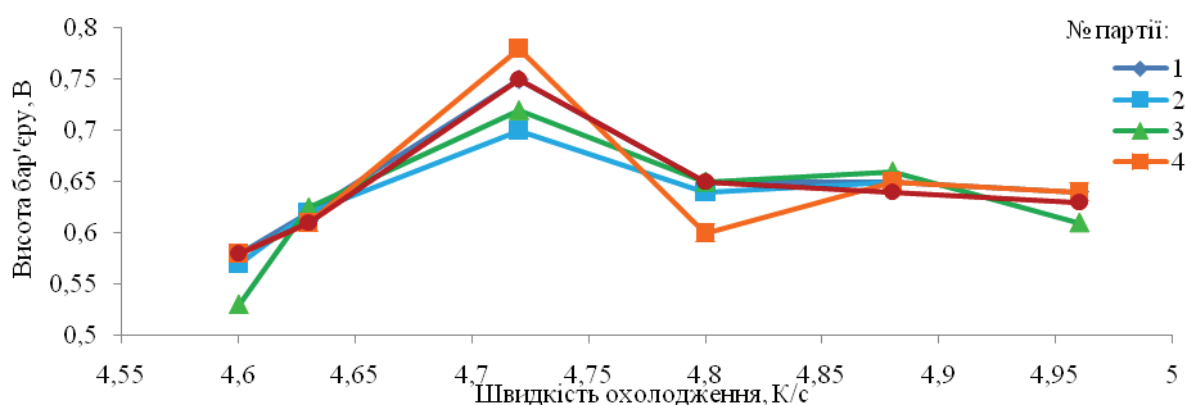
Вплив температури підкладки при осадженні Ag на висоту бар'єра

| Температура підкладки, К | Висота бар'єра, В | | | | | Тривалість відпалу, $\cdot 10^2$ с |
|--------------------------|-------------------|------|------|------|------|------------------------------------|
| | № партії зразків | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 343 | 0,51 | 0,56 | 0,58 | 0,58 | 0,58 | 3 |
| | 0,55 | 0,63 | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 6 |
| | 0,7 | 0,72 | 0,73 | 0,7 | 0,74 | 9 |
| 393 | 0,56 | 0,6 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 3 |
| | 0,8 | 0,82 | 0,84 | 0,83 | 0,84 | 6 |
| | 0,77 | 0,75 | 0,77 | 0,76 | 0,77 | 9 |
| 443 | 0,5 | 0,52 | 0,54 | 0,5 | 0,5 | 3 |
| | 0,7 | 0,68 | 0,65 | 0,68 | 0,68 | 6 |
| | 0,63 | 0,65 | 0,66 | 0,64 | 0,65 | 9 |
| 493 | 0,47 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,48 | 3 |
| | 0,65 | 0,65 | 0,65 | 0,66 | 0,67 | 6 |
| | 0,53 | 0,54 | 0,55 | 0,56 | 0,57 | 9 |
| 543 | 0,48 | 0,49 | 0,48 | 0,49 | 0,48 | 3 |
| | 0,65 | 0,63 | 0,66 | 0,64 | 0,65 | 6 |
| | 0,56 | 0,58 | 0,59 | 0,6 | 0,57 | 9 |

Після нанесення плівки срібла на GaAs-підкладку методом вакуумного випаровування підвищували температуру відпалу з різною швидкістю $V_{\text{нагр}} = 4,63 \dots 5,63$ К/с. Незалежно від режиму відпалу найкращі результати (рис. 3) отримано при $V_{\text{нагр}} = 4,72$ К/с.

Рис. 3. Вплив швидкості підйому температури відпалу на висоту бар'єра Ag/n-n⁺GaAs

Досліджено вплив на висоту бар'єра інжектуючого переходу Ag/n-n⁺GaAs швидкості охолодження $V_{\text{охол}} = 4,63 \dots 4,96$ К/с напильної структури після відпалу до кімнатної температури. Рекомендована швидкість охолодження виготовленого контакту $V_{\text{охол}} = 4,72$ К/с (рис. 4).

Рис. 4. Вплив швидкості охолодження контакту після відпалу на висоту бар'єра Ag/n-n⁺GaAs

Висновки

Розроблено режим термообробки у вакуумі не гірше $1,2 \cdot 10^{-6}$ Торр, який дозволяє збільшити висоту бар'єра Шотткі ϕ_{Bn} інжектуючих бар'єрних переходів Ag до n-n⁺GaAs(111)В з $n_{\text{е,ш}} = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻³ до 0,98 В за температури підкладки під час напильня 393 К, температури відпалу 803 К, часу відпалу $6 \cdot 10^2$ с, швидкості підвищення температури відпалу та охолодження, відповідно, $V_{\text{нагр}} = 4,72$ К/с; $V_{\text{охол}} = 4,72$ К/с.

Підвищення ϕ_{Bn} пов'язане з поліпшенням адгезії плівок, а також початком взаємної дифузії хімічних елементів срібла, галію і миш'яку, що утворюють контакт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Майссела Л. Технология тонких пленок / Л. Майссела, Р. Гленга. — М. : Сов. радио, 1977. — Т. 1. — 662 с.
2. Investigations on the annealing behavior of high-energy carbon irradiated Au/n-GaAs Schottky barrier diodes / P. Jayavel, K. Asokan, D. Kanjilal, J. Kumar // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2001. — Vol. 3, № 3. — С. 195—199.
3. On the evaluation of Schottky barrier diode parameters of Pd, Au and Ag/n-GaAs [Electronic resource] / P. Jayavel, J. Kumar, P. Ramasam, R. Premanand. // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. — 2001. — Vol. 7, № 5—6. — P. 340—343. — Access mode: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24425/1/IJEMS%207%285-6%29%20340-343.pdf>.
4. Investigations on Au, Ag, and Al Schottky Diodes on Liquid Encapsulated Czochralski Grown n-GaAs [100] / [S. Arulkumar, J. Arokiaraj, M. Udhayasankar and other] // Journal of Electronic Materials. — 1995. — Vol. 24, № 7. — P. 813—817.
5. Пат. 95094 Україна, МПК Н 01 L 29/47. Спосіб виготовлення контактів з бар'єром Шоттки на арсеніді галію / Дмитрієв В. С., Дмитрієва Л. Б.; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія. — № u201407081; заявл. 23.06.14; опубл. 10.12.14, Бюл. № 23/2014.
6. Weber E. R. Structure and reliability of Metal contacts to GaAs / E. R. Weber, J. Washburn. — Berkeley, CA: Office of naval research AD-A259 184, Department of Materials Science and Mineral Engineering University of California, 1991. — 41 p.
7. Венгер Е. Ф. Межфазные взаимодействия и механизмы деградации в структурах металл-InP и металл-GaAs / [Е. Ф. Венгер, Р. В. Конакова, Г. С. Коротченков и др.]; под общ. ред. Р. В. Конаковой; АН Республики Молдова, Ин-т прикладной физики. — Киев: НАН Украины, 1999. — 233 с.

8. Физические методы диагностики в микро- и нанoeлектронике / [А. В. Беляев, Н. С. Болтовец, Е. Ф. Венгер и др.]; под ред. проф. Беляева А. Е., проф. Конаковой Р. В. — Харьков : ИСМА, 2011. — 284 с.

9. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition / S. M. Sze, K. N. Kwok. — Hoboken : A John Wiley & Sons, Inc., 2006. — 832 p.

Рекомендована до друку кафедрою електроніки та наносистем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.07.2017

Дмитрієв Вадим Сергійович — асистент кафедри мікроелектронних інформаційних систем, e-mail: dems562@gmail.com .

Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя

V. S. Dmitriev¹

Optimization of Regimes of Formation of Silver Based Injecting Barrier Transitions to Gallium Arsenide

¹Zaporizhzhia State Engineering Academy

The processes that occur during metals interaction with semiconductor A_3B_5 compounds are the subject of intensive research, which confirmed the complexity of processes occurring in contacts at the phase separation boundary. The producing conditions and the thermal treatment contact $Ag/n-n^+GaAs$ regimes have been researched. The substrate temperature; the annealing temperature and annealing time; the rise and cooling annealing temperature rate are determined to obtain a barrier transition $Ag/n-n^+GaAs$ with a barrier height of 0.98 V. It is assumed that the potential barrier height increase is associated with the improved films adhesion, as well as the beginning of mutual diffusion between silver, gallium and arsenic, during contact formation.

Keywords: silver, gallium arsenide, barrier height, heat treatment.

Dmitriev Vadym S. — Assistant of the Chair of Microelectronic Information Systems, e-mail: dems562@gmail.com

В. С. Дмитриев¹

Оптимизация режимов формирования инжектирующих барьерных переходов на основе серебра к арсениду галлия

¹Запорожская государственная инженерная академия

Процессы, происходящие при взаимодействии металлов с полупроводниковыми соединениями A_3B_5 , являются предметом интенсивных исследований, подтвердивших сложность процессов, протекающих в контактах на границе раздела фаз. Исследованы условия изготовления и режимы термической обработки контакта $Ag/n-n^+GaAs$. Определены температура подложки; температура отжига, время отжига; скорость подъема температуры отжига и охлаждения для получения барьерного перехода $Ag/n-n^+GaAs$ с высотой барьера 0,98 В. Повышение высоты потенциального барьера связано с улучшением адгезии пленок, а также началом взаимной диффузии химических элементов серебра, галлия и мышьяка, образующих контакт.

Ключевые слова: серебро, арсенид галлия, высота барьера, термическая обработка.

Дмитриев Вадим Сергеевич — ассистент кафедры микроэлектронных информационных систем, e-mail: dems562@gmail.com