

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА И ТЕЛЕКОММУНІКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.382.2/3

Дмитриев В. С.

Завідувач навчально-наукової лабораторії кафедри мікроелектронних інформаційних систем Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ ТА ІНЖЕКЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ГЕТЕРОПЕРЕХОДУ $Ag/n-n^+GaAs$

Актуальність. В наш час дослідження та розробку гетеропереходів проводять у напрямках пошуку нових композицій метал-арсенід галію, розробки технологічних режимів, які змогли б забезпечити відтворюваність параметрів НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі.

Срібло у порівнянні з золотом має більшу тепло- та електропровідність, відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію, що дозволяє зменшити товщину перехідного шару. Перехід до металізації на основі срібла повинен підвищити технічні характеристики виробів. Розробка технологічних режимів виготовлення покращених гетеропереходів до GaAs на основі срібла є актуальною з наукової та практичної точок зору.

Мета роботи – встановлення впливу термічної обробки на реальні вольт-амперні характеристики та величину коефіцієнта інжекції гетеропереходу $Ag/n-n^+GaAs$.

Метод. Метод виготовлення гетеропереходів – термічне випаровування у вакуумі. Розрахунок параметрів гетеропереходу за методом вольт-амперних характеристик.

Результати. Рекомендований режим хімічної обробки GaAs-підкладки. Досліджено вплив термічної обробки на параметри та характеристики гетеропереходів $Ag/n-n^+GaAs$. Досліджено вплив висоти бар'єру на величину коефіцієнта інжекції. Розглянуті та апробовані різні методи визначення висоти бар'єру Шотткі та фактору неідеальності з вольт-амперних характеристик.

Висновки. Встановлено, що підвищення температури відпалу до 803 К дає найбільше значення висоти бар'єру Φ_b для гетеропереходу $Ag/n-n^+GaAs$ з концентрацією донорів в епітаксійному шарі $N_D=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Встановлено, що найбільш точним методом визначення параметрів гетеропереходу з вольт-амперної характеристики є метод direct approximation, який враховує вплив послідовного опору при визначенні фактору неідеальності та висоти бар'єру Шотткі. Розраховані коефіцієнти інжекції γ для гетеропереходів з різною висотою бар'єру Шотткі, отриманих при різних температурах відпалу, мають дуже малі значення, тому інжекцією дірок можна знехтувати.

Ключові слова: бар'єрний перехід, вольт-амперна характеристика, висота бар'єру, фактор неідеальності, коефіцієнт інжекції.

НОМЕНКЛАТУРА

БШ – бар'єр Шотткі;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

НВЧ – надвисока частота;

A^{**} – ефективна стала Річардсона;

C_B – бар'єрна ємність;

$d_{еш}$ – товщина епітаксійного шару;

k – стала Больцмана;

L_p – дифузійна довжина неосновних носіїв;

N_D – концентрація донорів в епітаксійному шарі;

$n_{підкл.}$ – концентрація носіїв у підкладці;

q – заряд електрона;

R_c – опір контакту;

R_p – шунтуючий опір;

© Дмитриев В. С. 2018

DOI 10.15588/1607-3274-2018-2-1

R_s – опір розтікання;

T – температура оточуючого середовища;

$t_{відп}$ – температура відпалу;

V – прикладена напруга;

η – фактор неідеальності;

τ_r – час релаксації «гарячих» електронів у металі;

τ_s – стала часу;

$\tau_{відп}$ – час відпалу;

Φ_b – висота бар'єра.

ВСТУП

Арсенід галію привертає увагу дослідників як перспективний матеріал для мікро- та наноелектроніки [1–5]. Різке збільшення долі електронних приладів НВЧ діапазону [1], які виготовляють на основі електронного арсе-

ніду галію, пов'язане з бурхливим розвитком мобільного зв'язку, використанням високошвидких безпровідних телекомунікаційних засобів та інше.

Срібло у порівнянні з золотом має більшу тепло- та електропровідність, відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію, що дозволяє зменшити товщину перехідного шару. Перехід до металізації на основі срібла повинен підвищити технічні характеристики виробів на n-GaAs.

До цього часу існують розбіжності в питаннях встановлення причин відхилення ВАХ від ідеальних [6–10]. Припускається [6–10], що реальні вольт-амперні характеристики та інжекційні властивості гетеропереходів метал-напівпровідників залежать від технологічних особливостей їх виготовлення. При виготовленні гетеропереходів до GaAs необхідно враховувати роль поверхневих станів у механізмі випрямлення струму, тому що з ними пов'язано зниження щільності струму насичення. Відсутність у GaAs стабільного природного окислу, а також чутливість його поверхні до впливу різних хімічних речовин, що використовують у технологічних процесах, потребують розробки нових підходів до технологічних процесів їх виготовлення. Серед найбільш ефективних засобів управління структурою межі розділу є відпал тонкоплівкових структур, механізм якого до теперішнього часу ще до кінця не вивчений і не розкритий. Тому, з нашої точки зору, дослідження впливу режимів термообробки на вольт-амперну характеристику і параметри гетеропереходів Ag/n-p⁺GaAs виділяється у самостійну наукову проблему, рішення якої може привести до суттєвого уточнення уявлень про процеси у гетеропереходах метал-GaAs та дозволить покращити характеристики та параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі на GaAs.

1 ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Одними з основних якісних показників гетеропереходів метал-напівпровідник є вольт-амперна характеристика, висота бар'єру ϕ_b , фактор неідеальності η , коефіцієнт інжекції γ [11], значення яких значною мірою залежать від технології виготовлення, зокрема від режимів термообробки контактів метал-напівпровідник. Точність визначення висоти потенційного бар'єру та фактору неідеальності залежать не тільки від точності вимірювання струму та напруги, але й від методу їх визначення. Відомо також [12], що на характеристики діодів з бар'єрами Шотткі при більших значеннях струму починають істотно впливати неосновні носії.

Постановка задачі: розробити режими термообробки для створення гетеропереходів Ag/n-p⁺GaAs з покращеними характеристиками та провести експериментальні дослідження.

Метою статті є встановлення впливу термічної обробки на реальні вольт-амперні характеристики та величину коефіцієнту інжекції гетеропереходу Ag/n-p⁺GaAs.

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Реальні епітаксійні плівки, які використовують в основному для виготовлення випрямляючого контакту метал-напівпровідник, мають нерівномірний розподіл домішок, виникаючий в процесі вирощування плівки. Це призводить до появи механічної напруги та може привести до виникнення дислокацій, дефектів упаковки чи тріщин. Обробка поверхні напівпровідника [13–15] для

усунення різних дефектів, видалення чужорідних домішок, отримання мінімального мікрорельєфу призводить до непланарності межі розділу метал-напівпровідник. Електрофізичні параметри реальних поверхонь напівпровідників після обробки існуючими способами стають неоднорідними уздовж поверхні [16].

Реальні характеристики та параметри інжектуючих бар'єрних переходів срібло-арсенід галію залежать від режимів їх термообробки. У відомих роботах [13–15] запропоновані режими хімічної та термічної обробки, при яких значення висоти бар'єру Шотткі для контактів Ag/GaAs знаходяться в інтервалі 0,82 В..0,95 В. Для покращення цих параметрів необхідно розробити нові способи створення контактів.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для дослідження використовувався n-p⁺GaAs(111)В епітаксійний монокристалічний, $d_{\text{еш}}=2\text{мкм}$, $N_D=2\cdot 10^{16}\text{см}^{-3}$, $n_{\text{підкл}}=10^{18}\text{см}^{-3}$.

GaAs-підкладку знежирювали в суміші толуолу і метилового спирту (1:2), обробляли у сірчанокислому травнику $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=3:1:1$ з подальшою витримкою у діоксіянтранній кислоті $\text{HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH}$ продовж $1,2\cdot 10^3$ секунд.

За результатами попередніх досліджень [10–13] в якості бар'єрного матеріалу обрано срібло високої чистоти, яке утворює з GaAs сполуки, що не змінюються в робочому діапазоні температур. Контакти виготовляли методом вакуумного випаровування. Для вимірювання вольт-амперних характеристик бар'єрного переходу метал-напівпровідник використовувався чотирьохзондовий метод [17].

При аналізі ВАХ тонкоплівкових структур з бар'єром Шотткі Ag/n-p⁺GaAs припускалося, що в початкових структурах механізм переносу носіїв заряду при концентрації вільних носіїв в GaAs $N_D=2\cdot 10^{16}\text{см}^{-3}$ визначається термоелектронною емісією (Т-емісією). Rhoderick E. H., Williams R. H. [18] представили вольт-амперну характеристику з урахуванням параметрів, які описують стаціонарну ВАХ (висоти бар'єру Шотткі ϕ_b , фактору неідеальності η , послідовного R_s та шунтуючого R_p опорів), у вигляді:

$$I = I_0 \exp(qV_{pn}/\eta kT) [1 - \exp(-qV/kT)] + V_{pn}/R_p, \quad (1)$$

де $I_0 = A \cdot T^2 \cdot S \exp(-q\phi_b/kT)$ – струм насичення,

$V_{pn} = V - IR_s$ – напруга на переході метал-напівпровідник.

З рівняння (1) були визначені умови [18, 19], при яких: внесок R_s та R_p дуже малий (менше 1%) і ними можна знехтувати. Також обумовлені обмеження, коли внесок бар'єра Шотткі на фоні цих опорів значний (для досягнення похибки менше 1% на фоні похибки вимірювання) [18, 19]. Якщо на ВАХ відсутні ділянки, обмежені цими умовами, то вона не дає інформації про коефіцієнт неідеальності та висоту бар'єра.

Найбільш простим у реалізації є розрахунок параметрів ВАХ за методом, запропонованим Rhoderick E. H. у роботі [18], де струм крізь бар'єр Шотткі описаний виразом:

$$I = I_0 \exp(qV/\eta kT) [1 - \exp(-qV/kT)]. \quad (2)$$

Після побудови ВАХ у координатах $\ln(I)/[1 - \exp(-qV/kT)] \propto V$, виконують апроксимацію

прямої лінійної ділянки $y=a+bx$, отримують коефіцієнти $b = \ln(I_0)$ та $a = q/\eta kT$, звідки розраховують ϕ_b і η , але при цьому не враховується послідовний опір R_s , що може привести до додаткових помилок при визначенні ділянки ВАХ, де цим впливом нехтують.

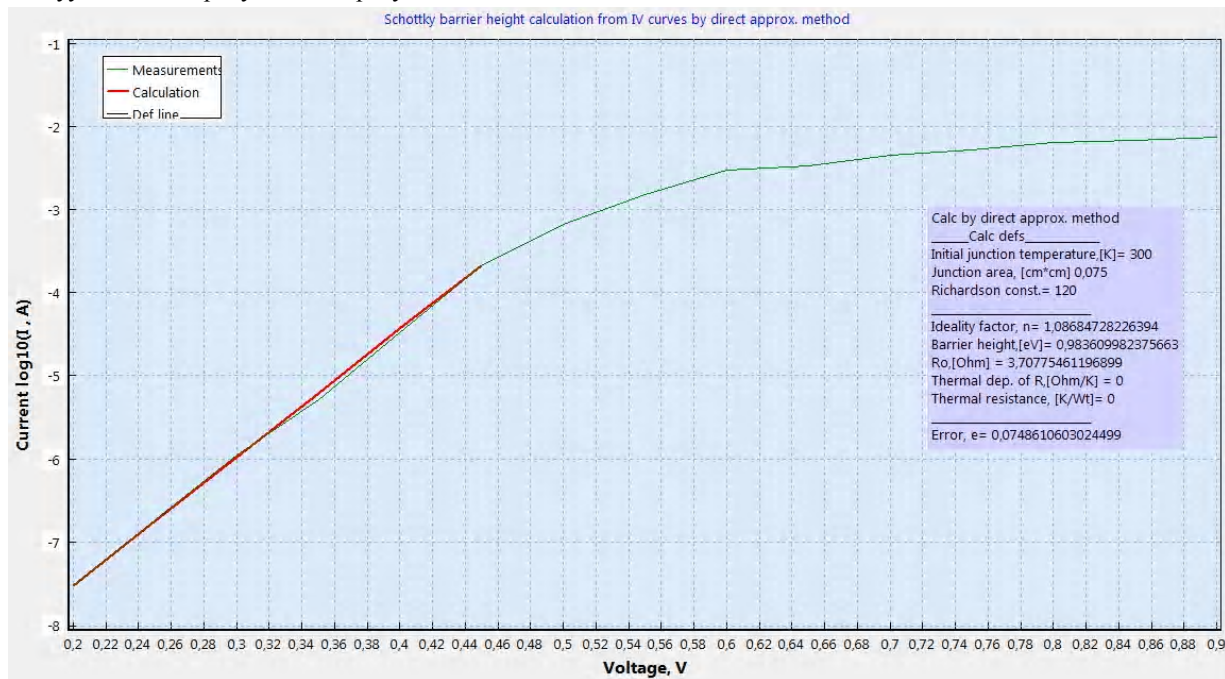
У [20–22] для розрахунку параметрів БШ запропоновано метод прямої апроксимації усєї довжини ВАХ (the direct approximation method), описаний формулою (1), недоліком якого є складні розрахунки.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

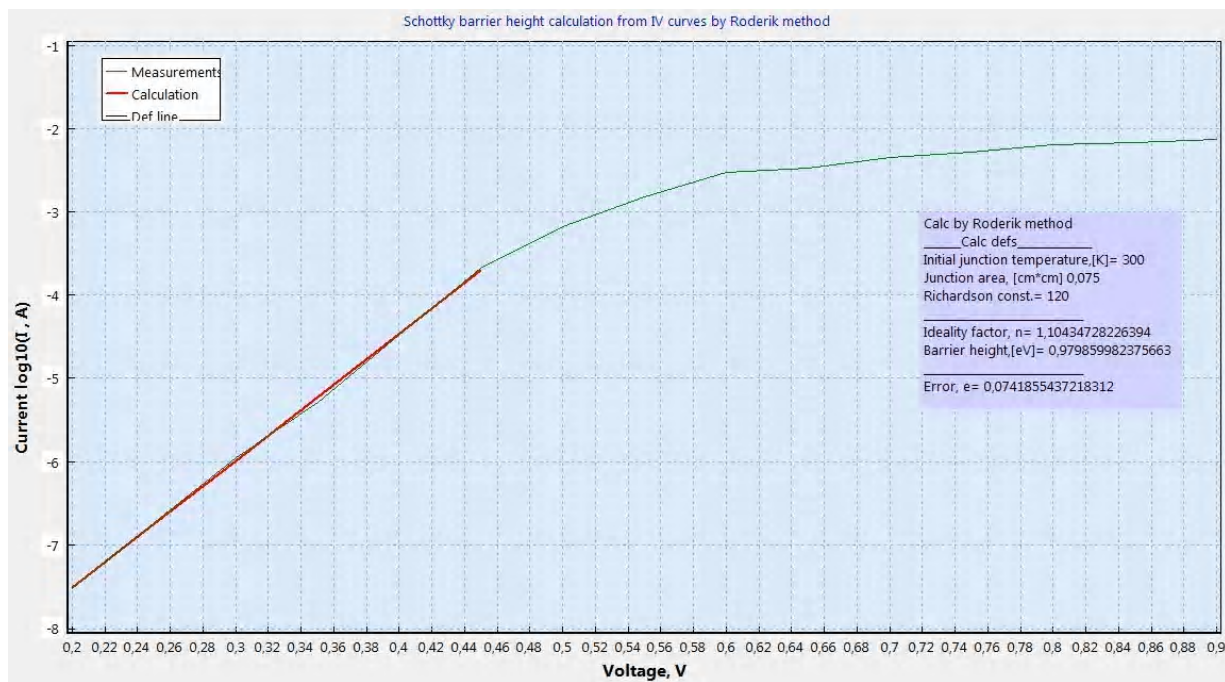
При нанесенні на GaAs-підкладку півки срібла методом вакуумного випаровування за рахунок теплоти кон-

денсації і можливих хімічних реакцій відбувається руйнування ґратки в приповерхневому шарі напівпровідника ще до формування суцільної металеві півки. Наслідки цієї стадії значною мірою визначаються умовами приготування контакту і режимами термообробок. Досліджували вольт-амперні характеристики бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs, виготовлених у вакуумі методом термічного випаровування при температурах відпалу $t_{\text{відп}}=703\dots853$ К та часі відпалу $\tau_{\text{відп}}=6\cdot 10^2$ секунд.

На рис. 1 представлені експериментальні ВАХ контактів Ag/n-n⁺GaAs, виготовлених при температурному режимі $t_{\text{відп}}=803$ К, $\tau_{\text{відп}}=6\cdot 10^2$ секунд, до яких проведе-



a



б

Рисунок 1 – Прямі вольт-амперні характеристики бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs

ний розрахунок параметрів з ВАХ (табл. 1) за методом direct approximation (рис. 1a) та методом Rhoderick E.H. (рис. 1б) за допомогою програми IVbarrierCalc2 [19].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати розрахунків основних параметрів гетеропереходів Ag/n-n⁺GaAs, виготовлених при різних температурних режимах, наведені у табл. 1.

Встановлено, що підвищення температури відпалу до 803 К дає найбільше значення висоти бар'єру ϕ_b для гетеропереходу Ag/n-n⁺GaAs.

У табл. 2 представлені значення коефіцієнта інжекції γ , розраховані для гетеропереходів з різною висотою бар'єру Шоттки за формулою [11]:

$$\gamma = \frac{qn_i^2 D_p}{N_D L_p A^{**} T^2 \exp(-q\phi_b / kt)}$$

6 ОБГОВОРЕННЯ

Порівняльний аналіз отриманих значень фактора неідеальності η (табл. 1), розрахованих двома різними методами, показав, що для бар'єрних переходів на основі срібла до GaAs з $N_D=10^{16}$ см⁻³, створених при рекомендованому способі термічної обробки ($t_{\text{відп}}=803$ К, $\tau_{\text{відп}}=6 \cdot 10^2$ секунд, $\phi_b = 0,98$ В), найменше значення $\eta=1,104$ отримано у методі розрахунку direct approximation.

У ряді першоджерел [11,18] зазначено, що фактор неідеальності при низькому рівні легування ($N_D=10^{15}$ см⁻³) та температурі 300 К близький до 1, але при зростанні рівня легування ($N_D=10^{16}$ см⁻³) відмінність η від одиниці стає суттєвою.

Дослідження вказують, що для визначення висоти потенційного бар'єру при невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ метод direct approximation є найбільш точним, оскільки він враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$.

Нелінійний характер залежності ϕ_b від прикладеної напруги з'являється у області зміщень, обмеженої

відрізками між 0,44...074 В (рис. 1), що призводить відповідно до зміни фактора неідеальності η .

Для гетеропереходів Ag/n-n⁺GaAs з $\phi_b = 0,78...0,98$ В коефіцієнти інжекції γ змінюються у діапазоні $5,28 \cdot 10^{-12} \dots 1,2 \cdot 10^{-8}$. Розраховані значення коефіцієнта інжекції мають дуже малі значення, тому інжекцією дірок можна знехтувати.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що підвищення температури відпалу до 803 К дає найбільше значення висоти бар'єру ϕ_b для гетеропереходу Ag/n-n⁺GaAs.

Коефіцієнти інжекції γ для бар'єрів Шоттки Ag/n-n⁺GaAs ($N_D=10^{16}$ см⁻³) мають дуже малі значення γ , тому інжекцією дірок можна знехтувати.

При рекомендованому способі термічної обробки бар'єрних переходів Ag/n-n⁺GaAs ($t_{\text{відп}}=803$ К, $\tau_{\text{відп}}=6 \cdot 10^2$ секунд, $\phi_b = 0,98$ В) найменше значення $\eta = 1,087$ отримано за методом розрахунку direct approximation.

Нелінійний характер залежності ϕ_b від прикладеної напруги з'являється в області зміщень, обмеженої відрізками між 0,44...074 В, що призводить відповідно й до зміни фактора неідеальності η .

При невеликій протяжності експонентної ділянки ВАХ для визначення висоти потенційного бар'єру метод direct approximation є найбільш точним, оскільки він враховує послідовний опір і ділянку ВАХ при $V < kT/q$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Белоус А. И. Космическая электроника : в 2 кн. Кн. 2 / А. И. Белоус, В. А. Солoduха, С. В. Шведов. – М. : Техносфера, 2015. – 489 с.
2. 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 к ресурсу: <http://www.novsu.ru/file/1010219>
3. Контакты Шоттки к высокоомным эпитаксиальным слоям GaAs для детекторов частиц и квантов [Электронный ресурс] /

Таблиця 1 – Результати розрахунку параметрів гетеропереходів Ag/n-n⁺GaAs

$t_{\text{відп}}$, К	Метод розрахунку	η	ϕ_b , В	R_s , Ом	e
703	direct approx.	1,254429775274	0,77321028599789	0,219689495861	0,28632938336540
	Rhoderick	1,203635086926	0,78356534807517	–	0,09680402395094
753	direct approx.	1,248802105905	0,80498828767418	0,758142769336	0,31679567002442
	Rhoderick	1,300052105905	0,80048828767418	–	0,44193998683910
803	direct approx.	1,086847282263	0,98360998237566	3,707754611968	0,07486106030244
	Rhoderick	1,104347282263	0,97985998233756	–	0,07418554372183
853	direct approx.	1,328157574655	0,84888672517418	1,025553047657	0,30231278123006
	Rhoderick	1,339593791431	0,84663494074446	–	0,2906834246612

Таблиця 2 – Вплив ϕ_b на γ для гетеропереходів Ag/n-n⁺GaAs

ϕ_b , В	0,78	0,82	0,86	0,9	0,94	0,98
γ	$5,28 \cdot 10^{-12}$	$2,48 \cdot 10^{-11}$	$1,16 \cdot 10^{-10}$	$5,45 \cdot 10^{-10}$	$2,56 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$

- [Г. И. Кольцов, С. И. Диденко, А. В. Черных и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2012. – № 8. – С. 1088–1093. – Режим доступа к ресурсу: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7776>
4. Дмитриев В. С. Технологические особенности изготовления усилителя бегущей волны / В. С. Дмитриев, Е. Я. Швец // Сборник материалов 10-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2014» / В. С. Дмитриев, Е. Я. Швец. – Севастополь : СевНТУ, 2014. – С. 158. (ISBN 978-617-612-072).
 5. Дмитрієв В.С. Інжектуючі бар'єрні переходи на основі арсеніду галія для приладів НВЧ діапазону/ В.С. Дмитрієв // Перспективні технології та прилади. – 2017. – Вип. 10 (1). – С. 50–53, ISSN 2313-5352
 6. Hernández M. P. Barrier height determination in homogeneous nonideal Schottky contacts / M. P. Hernández, C. F. Alonso, J. L. Peña // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2001. – Vol. 34, №8. – P. 1157–1162.
 7. Торхов Н. А. Природа прямых и обратных токов насыщения в контактах металл-полупроводник с барьером Шоттки / Н. А. Торхов // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, №6. – С. 767–774.
 8. Chand S. Origin of non-ideal current-voltage characteristics of metal-semiconductor contact: A numerical study [Электронный ресурс] / S. Chand, L. Kamar. // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. – 2000. – Vol. 7, № 5–6. – P. 268–273. – Режим доступа к ресурсу: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24409/1/IJEMS%207%285-6%29%20268-273.pdf>.
 9. Зависимость проводимости от толщины активной области в тонкопленочных диодах Шоттки на GaAs [Электронный ресурс] / [С. А. Зуев, Г. В. Килесса, Э. Э. Асанов и др.]. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 6. – С. 825–829. – Режим доступа к ресурсу: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43212>
 10. Божков В. Г. Влияние нелинейной зависимости высоты барьера от смещения на измеряемые параметры контактов с барьером Шоттки [Электронный ресурс] / В. Г. Божков, А. В. Шмаргунов // Материалы 21-й Межд. Крымской конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо – 2011). Севастополь, 10–14 сентября 2011. – Севастополь : СевНТУ. – 2011. – С. 246–247. – Режим доступа к ресурсу: http://naukainform.kpi.ua/CriMiCo/Crimico/2011/246_247.pdf
 11. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition / S. M. Sze, K. K. Ng. – Hoboken : A John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 815 p.
 12. Dmitriev V. S. The effect of the injected minority carriers on the parameters of Schottky barrier diodes / V. S. Dmitriev, E. Y. Shvets // Зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій». – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 10–11.
 13. On the evaluation of Schottky barrier diode parameters of Pd, Au and Ag/n-GaAs [Электронный ресурс] / P. Jayavel, J. Kumar, P. Ramasam, R. Premanand. // Indian Journal of Engineering and Materials Sciences. – 2001. – Vol. 7, № 5–6. – P. 340–343. – Режим доступа к ресурсу: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24425/1/IJEMS%207%285-6%29%20340-343.pdf>
 14. 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.
 15. Пат. 95094 Україна, МПК Н 01 L 29/47. Спосіб виготовлення контактів з бар'єром Шотки 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.
 16. Дмитриев В. С. Развитие физической модели неоднородных контактов металл-полупроводник / В. С. Дмитриев // Материалы X mezinarodni vědecko-prakticka konference «Moderni vymoženosti vědy – 2014» / В. С. Дмитриев. – Praha: Publishing House «Education and Science», 2014. – Dil 39 «Technicke vědy». – С. 3–5. – (ISBN 978-966-8736-05-6).
 17. Фізическі методи діагностики в мікро- і наноелектроніці / [А. В. Беляев, Н. С. Болговец, Е. Ф. Венгер и др. ; Под ред. проф. Беляева А. Е., проф. Конаковой Р. В.]. – Харьков : ИСМА, 2011. – 284 с.
 18. Rhoderick E. H. Metal-Semiconductor Contacts / E. H. Rhoderick, R. H. Williams. – Oxford : Clarendon Press, 1988. – 252 p.
 19. Methods for determination of Schottky barrier height from I-V curves / [Ya. Ya. Kudryk, V. V. Shynkarenko, V. S. Slipokurov et al] // CriMiCo'2014, September 7–13, 2014. – Sevastopol, Crimea. – P. 673–674.
 20. Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method [Электронный ресурс] / A. Ferhat-Hamida, Z. Ouenoughi, A. Hoffmann, R. Weiss. // Solid-State Electronics. – 2002. – Vol. 46, № 5. – P. 615–619. – Режим доступа к ресурсу: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00337-9)
 21. Karaboga N. The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modified artificial bee colony [Электронный ресурс] / N. Karaboga, S. Kockanat, H. Dogan // Applied Intelligence. – 2013. – Vol. 38, №3. – P. 279–288. – Режим доступа к ресурсу: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10489-012-0372-x>.
 22. Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method [Электронный ресурс] / [A. Ortiz-Conde, Y. Ma, J. Thomson, etc.]. // Solid-State Electronics. – 1999. – Vol. 43, № 4. – P. 845–848. – Режим доступа к ресурсу: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(99\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(99)00044-1)

Стаття надійшла до редакції 22.09.2017.

Після доробки 28.12.2017.

Дмитриев В. С.

Заведуючий учебно-науочною лабораторією кафедри мікроелектронних інформаційних систем Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ И ИНЖЕКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ Ag/n-n⁺GaAs

Актуальность. В настоящее время исследования и разработку гетеропереходов проводят в направлениях поиска новых композиций металл-арсенид галлия, разработки технологических режимов, которые смогли бы обеспечить воспроизводимость параметров СВЧ приборов с барьерами Шоттки.

Серебро по сравнению с золотом имеет большую тепло- и электропроводность, относительно небольшой коэффициент диффузии в арсенид галлия, позволяющий уменьшить толщину переходного слоя. Переход к металлизации на основе серебра должен повысить технические характеристики изделий. Разработка технологических режимов изготовления улучшенных гетеропереходов к GaAs на основе серебра является актуальной с научной и практической точки зрения.

Цель работы – установление влияния термической обработки на реальные вольт-амперные характеристики и величину коэффициента инжекции гетероперехода Ag/n-n⁺GaAs.

Метод. Метод изготовления гетеропереходов – термическое испарение в вакууме. Расчет параметров гетероперехода методом вольт-амперных характеристик.

Результаты. Рекомендуется режим химической обработки GaAs-подложки. Исследовано влияние термической обработки на параметры и характеристики гетеропереходов Ag/n-n⁺GaAs. Исследовано влияние высоты барьера на величину коэффициента инжекции. Рассмотрены и апробированы различные методы определения высоты барьера Шоттки и фактора неидеальности по вольт-амперным характеристикам.

Выводы. Установлено, что повышение температуры отжига до 803 К дает наибольшее значение высоты барьера Φ_B для гетероперехода Ag/n-n⁺GaAs с концентрацией доноров в эпитаксиальном слое $N_D=2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Установлено, что наиболее точным методом определения параметров гетероперехода по вольт-амперной характеристике является метод direct approximation, учитывающий влияние последовательного сопротивления при определении фактора неидеальности и высоты барьера Шоттки. Рассчитанные коэффициенты инжекции γ для гетеропереходов с разной высотой барьера Шоттки, полученных при различных температурах отжига, имеют очень малые значения, поэтому инжекцией дырок можно пренебречь.

Ключевые слова: барьерный переход, вольт-амперная характеристика, высота барьера, фактор неидеальности, коэффициент инжекции.

Dmitriev V. S.

Head of the Educational and Scientific Laboratory of the Microelectronic Information Systems Department of the Zaporizhzhia State Engineering Academy, Zaporizhzhia, Ukraine

THE THERMAL PROCESSING INFLUENCE ON CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC AND INJECTION PROPERTIES OF Ag/n-n⁺GaAs HETEROJUNCTIONS

Context. Nowadays the research and development of heterojunctions are carried out to search new metal-gallium arsenide compositions, the development of technological regimes which could ensure the microwave devices with Schottky barriers parameters reproducibility.

Comparing to gold, silver has a large thermal and electrical conductivity, a relatively small diffusion coefficient to gallium arsenide, which makes it possible to reduce the transition layer thickness. The transition to silver-based metallization should improve the products technical characteristics. The technological regimes development for manufacturing improved silver-based heterojunctions to GaAs is relevant from scientific and practical points of view.

Objective. The goal of the work is to determine the heat treatment influence on real current-voltage characteristics and the injection coefficient value of the Ag/n-n⁺GaAs heterojunction.

Method. The heterojunctions manufacturing method is vacuum thermal evaporation. The calculation of the heterojunction parameters was made by the current-voltage characteristics method.

Results. The GaAs-substrate chemical treatment regime is recommended. The heat treatment effect on the Ag/n-n⁺GaAs heterojunctions parameters and characteristics is studied. The barrier height influence on the injection coefficient value was investigated. Various methods for determining the Schottky barrier height and the nonideality factor for the current-voltage characteristics have been examined and tested.

Conclusions. It is established that the annealing temperature increase up to 803 K gives the highest barrier height for the Ag/n-n⁺GaAs heterojunction with a donor density of $N_D=2 \cdot 10^{16}$ cm⁻³ into epitaxial layer. It has been established that the most accurate method for the heterojunction parameters determining using the current-voltage characteristic is the direct approximation method, which takes into account the effect of the series resistance in determining the nonideality factor and the Schottky barrier height. The calculated injection coefficients for heterojunctions with different Schottky barrier heights, obtained at different annealing temperatures, have very small values, therefore, hole injection can be neglected.

Keywords: barrier transition, current-voltage characteristic, barrier height, non-ideality factor, injection coefficient.

REFERENCES

1. Belous A. Y., Solodukha V. A., Shvedov S. V. Kosmycheskaya elektronika : v 2 kn. Kn. 2. Moscow, Tekhnosfera, 2015, 489 p.
2. Platonov S. V., Permyakov N. V., Seleznev B. Y. i dr. Maloshumyashchye arsenyid-hallyevye uslytely pry vozdeystvyi elektromahnytnykh pomekh povyshennykh yntensyvnostey [Elektronny resurs], *Vestnyk Novhorodskoho hospodarstvennoho unyversyteta*, 2012, No. 67, pp. 29–32. Rezhym dostupa k resursu: <http://www.novsu.ru/file/1010219>
3. Kol'tsov H. Y., Dydenko S. Y., Cherny'kh A. V. i dr. Kontakty Shottky k vysokoornym epytaksyal'nym sloyam GaAs dlya detektorov chastyts y kvantov [Elektronny resurs], *Fyzyka y tekhnika poluprovodnykov*, 2012, No. 8, pp. 1088–1093. Rezhym dostupa k resursu: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/7776>
4. Dmytryev V. S., Shvets E. Ya. Tekhnolohycheskye osobennosty yzhotovlenyya uslytelya behushchey volny, *Sbornyk materyalov 10-y mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsyy «Sovremennye problemy' radyotekhniky y telekommunikatsyy «RT-2014»*. Sevastopol', SevNTU, 2014, P. 158. (ISBN 978-617-612-072).
5. Dmytryev V. S. Inzhektuyuchi bar'yerni perekhody na osnovi arsenidu haliya dlya priladiv NVCH diapazonu, *Prohresivni tekhnolohiyi ta pryklady*, 2017, Vyp. 10(1), pp. 50–53, ISSN 2313-5352
6. Hernández M. P., Alonso C. F., Peña J. L. Barrier height determination in homogeneous nonideal Schottky contacts, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, Vol. 34, No. 8, pp. 1157–1162.
7. Torkhov N. A. Priroda pryamykh i obratnykh tokov nasyshcheniya v kontaktakh metall-poluprovodnik s baryerom Shottki, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2010, Vol. 44, No. 6, pp. 767–774.
8. Chand S., Kamar L. Origin of non-ideal current-voltage characteristics of metal-semiconductor contact: A numerical study [Elektronny resurs], *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 2000, Vol. 7, No. 5–6, pp. 268–273. Rezhim dostupa do resursu: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24409/1/IJEMS%207%285-6%29%20268-273.pdf>.
9. Zuyev S. A., Kilessa G. V., Asanov E. E. i dr. Zavisimost provodimosti ot tolshchiny aktivnoy oblasti v tonkoplnochnykh diodakh Shottki na GaAs [Elektronny resurs], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*, 2016, Vol. 50, No. 6, pp. 825–829. Rezhim dostupa do resursu: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43212>
10. Bozhkov V. G., Shmargunov A. V. Vliyaniye nelineynoy zavisimosti vysoty baryera ot smeshcheniya na izmeryaemye

- parametry kontaktov s baryerom Shottki [Elektronny resurs], *Materialy 21-y Mezhd. Krymskoy konf. "SVCh tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo – 2011). Sevastopol, 10–14 sentyabrya 2011.* Sevastopol, SevNTU, 2011, pp. 246–247. Rezhim dostupu do resursu: http://naukainform.kpi.ua/CriMiCo/Crimico/2011/246_247.pdf
11. Sze S. M., Ng K. K. *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd Edition. Hoboken, A John Wiley & Sons, Inc., 2007, 815 p.
 12. Dmitriev V. S., Shvets E. Y. The effect of the injected minority carriers on the parameters of Schottky barrier diodes, *Zb. tez dopovide- mizhnar. nauk.-tekhn. konf. «Fundamental'ni ta prikladni problemi suchasnikh tekhnolohi-»*. Ternopil, TNTU, 2015, pp. 10–11.
 13. Jayavel P., Kumar J., Ramasam P., Premanand R. On the evaluation of Schottky barrier diode parameters of Pd, Au and Ag/n-GaAs [Elektronny resurs], *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2001, Vol. 7, No. 5–6, pp. 340–343. Rezhim dostupu do resursu: <http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/24425/1/IJEMS%207%285-6%29%20340-343.pdf>
 14. Weber E. R., Washburn J. *Structure and reliability of Metal contacts to GaAs*. Berkeley, CA: Office of naval research AD-A259 184, Department of Materials Science and Mineral Engineering University of California, 1991, 41 p.
 15. Dmstriyev V. S., Dmstriyeva L. B.; zayavnyk i patentovlasnsk Zaporiz'ka derzhavna inzhenerna akademiya. Pat. 95094 Ukrainy, MPK H 01 L 29/47. Sposib vihotovlennya kontaktiv z bar'yerom Shotky na arsenidi haliyu. № u201407081; zayavl. 23.06.14; opubl. 10.12.14, Byul. № 23/2014.
 16. Dmytryev V. S. Razvytye fizycheskoy modely neodnorodnykh kontaktov metall-poluprovodnyk, *Materialy X mezinardni v'edecho-prakticka konferencie «Moderni vymoženosti v čdy-2014»*. Praha, Publishing House «Education and Science», 2014, Dil 39 «Technicke vědy», pp. 3–5. (ISBN 978-966-8736-05-6).
 17. Belyaev A. V., Boltovets N. S., Venger Ye. F. i dr. Pod red. prof. Belyaeva A. Ye., prof. Konakovoy R. V. *Fizicheskiye metody diagnostiki v mikro- i nanoelektronike*. Kharkov, ISMA, 2011, 284 p.
 18. Rhoderick E. H., Williams R. H. *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford, Clarendon Press, 1988, 252 p.
 19. Kudryk Ya. Ya., Shynkarenko V. V., Slipokurov V. S., Bigun R. I., Kudryk Ya. Ya. Methods for determination of Schottky barrier height from I–V curves, *CriMiCo '2014, September 7–13, 2014.* Sevastopol, Crimea, pp. 673–674.
 20. Ferhat-Hamida A., Ouennoughi Z., Hoffmann A., Weiss R. Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method [Elektronny resurs], *Solid-State Electronics*, 2002, Vol. 46, No. 5, pp. 615–619. Rezhim dostupu do resursu: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00337-9)
 21. Karaboga N., Kockanat S., Dogan H. The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modified artificial bee colony [Elektronny resurs], *Applied Intelligence*, 2013, Vol. 38, No. 3, pp. 279–288. Rezhim dostupu do resursu: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10489-012-0372-x>.
 22. Ortiz-Conde A., Ma Y., Thomson J. etc Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method [Elektronny resurs], *Solid-State Electronics*, 1999, Vol. 43, No. 4, pp. 845–848. Rezhim dostupu do resursu: [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(99\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(99)00044-1)