УДК 621.382.2/3

В.С. ДМИТРІЄВ
Запорізька державна інженерна академія

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ЧИННИКІВ ВПЛИВУ НА ЯКІСТЬ ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ ДО ТОНКОПЛІВКОВОГО НВЧ ПРИЛАДУ НА n-GaAs

При виготовленні напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем на арсеніді галію однією з найважливіших технологічних операцій є формування омічних контактів (ОК). Зниження опору ОК дозволяє зменшити опір пасивних областей і таким чином домогтися зниження коефіцієнта шуму в МІС НВЧ підсилювачів. Особливо ретельно необхідно відпрацювати технологію створення омічних контактів. Наразі найбільш поширені технології виготовлення гетеропереходів метал-арсенід галію на основі золота, однак, перехід до металізації на основі срібла, якому властиві більша порівняно з золотом тепло- та електропровідність та відносно невеликий коефіцієнт дифузії в арсенід галію, має підвищити технічні характеристики виробів. Одним з основних чинників впливу на якість омічних контактів є відпал тонкоплівкових структур. У роботі встановлено, що час та температура відпалу контактної структури істотно впливають на параметри омічного контакту. Омічні контакти Ag-Ge-In/n-n^+GaAs, отримані при температурі відпалу 893 К та часі відпалу 60 с, мають значення питомого перехідного опору $\rho_к$=(5…7)·10^{-5} Ом·$см^2$.

Ключові слова: НВЧ підсилювач, омічний контакт, срібло, арсенід галію, питомий перехідний опір, температура відпалу

В.С. ДМИТРИЕВ
Запорожская государственная инженерная академия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ НА КАЧЕСТВО ОМИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ К ТОНКОПЛЕНОЧНОМУ СВЧ ПРИБОРУ НА n-GaAs

При изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на арсениде галлия одной из важнейших технологических операций является формирование омических контактов (ОК). Снижение сопротивления ОК позволяет уменьшить сопротивление пассивных областей и таким образом добиться снижения коэффициента шума в МИС СВЧ усилителей. Особенно тщательно необходимо отработать технологию создания омических контактов. Ныне наиболее распространены технологии изготовления гетеропереходов металл-арсенид галлия на основе золота, однако, переход к металлизации на основе серебра, которому свойственны большая, по сравнению с золотом, тепло- и электропроводность и относительно небольшой коэффициент диффузии в арсенид галлия, должен повысить технические характеристики изделий. Одним из основных факторов влияния на качество омических контактов является отжиг тонкопленочных структур. В работе установлено, что время и температура отжига контактной структуры существенно влияют на параметры омического контакта. Омические контакты Ag-Ge-In/n-n^+GaAs, полученные при температуре отжига 893 К и времени отжига 60 с, имеют значения удельного переходного сопротивления $\rho_к$ = (5...7)·10^{-5} Ом·$см^2$.

Ключевые слова: СВЧ усилитель, омический контакт, серебро, арсенид галлия, удельное переходное сопротивление, температура отжига

V.S. DMITRIEV
Zaporizhia State Engineering Academy

THE RESEARCH OF THE MAIN INFLUENCE FACTORS ON THE QUALITY OF OHMIC CONTACTS TO A THIN-FILM MICROWAVE n-GaAs-BASED DEVICE

During the semiconductor devices and integrated microcircuits manufacturing on gallium arsenide, one of the most important technological operations is the ohmic contacts (OC) formation. The OC resistance decreasing makes it possible to reduce the passive regions resistance and, thus, to reduce the noise factor in the MIC microwave amplifiers. Especially it is necessary to work out the ohmic contacts manufacture technology. Nowadays, the technology of manufacturing metal-gallium arsenide-based heterojunctions, which based on gold, is one of the most used. However, using the silver-based metallization, which is characterized by a large thermal and electrical conductivity, compared to gold, and a relatively small diffusion coefficient for gallium arsenide must increase devices technical characteristics. One of the main factors affecting the quality of ohmic contacts is thin-film structures annealing. It is established that the annealing time and temperature of the contact structure have significant affect on the ohmic contact parameters. The Ag-Ge-In/n-n^+GaAs ohmic contacts,

gotten at an annealing temperature of 893 K and an annealing time of 60 s, have values for the specific resistance ρ_k=(5...7)·10-5 Ohm·cm^2.

Keywords: microwave amplifier, ohmic contact, silver, gallium arsenide, specific transition resistance, annealing temperature

Постановка проблеми

Вимоги, які пред'являються до пристроїв НВЧ діапазону, диктують необхідність глибокого дослідження впливу різних чинників на основні параметри та характеристики приладів [1-5]. Відомі [5] цифрові елементи на діодах Ганна, два стійких стани в яких обумовлені присутністю або відсутністю генерації. Однак, завдяки присутності реактивностей в ланцюгах, створити на їх основі економічні і мініатюрні ІС не вдається. Більш перспективним є використання в ІС МЕП-приладів (приладів з міждолинним електронним переносом) з керуючими електродами - бар'єрами Шотткі (БШ). У трьохелектродних МЕП-приладах досить добре вивчені [1-5] процеси зародження, стабілізації та захоплення доменів, досліджені різні математичні моделі та запропоновані програми розрахунку деяких параметрів.

Наразі спостерігається підвищена зацікавленість дослідників [3,4] у створенні НВЧ елементів до пристроїв на n-GaAs, зокрема до виготовлення тонкоплівкових НВЧ підсилювачів на МЕП-приладах типу транзистору біжної хвилі, які мають високу швидкодію, широкі функціональні можливості завдяки порівняно простому переналаштуванню режимів їх роботи.

Одним з актуальних завдань при розробці багатоелектродних МЕП-приладів залишається розробка найбільш ефективних технологічних режимів виготовлення гетероструктур метал-арсенід галію. При виготовленні напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем на арсеніді галію однією з найважливіших технологічних операцій є формування омічних контактів (ОК) [3-6]. Зниження опору ОК дозволяє зменшити опір пасивних областей і таким чином домогтися зниження коефіцієнта шуму [3] в МІС НВЧ підсилювачів, зниження прямих втрат у МІС НВЧ перемикачів та фазообертачів. Особливо ретельно необхідно відпрацювати технологію створення омічних контактів. Агломерація, що змінює морфологію та електричні характеристики плівок, сегрегація металу у міжконтактну область, недостатньо низький контактний опір, низька відтворюваність параметрів – це одні з головних проблем формування омічних контактів до GaAs. Одним з найбільш ефективних засобів управління структурою межі розділу є відпал тонкоплівкових структур. Саме тому дослідження впливу режимів термообробки на електрофізичні параметри гетеропереходів метал-GaAs варто виділити у самостійну наукову проблему, вирішення якої може привести до суттєвого уточнення уявлень про процеси у гетеропереходах метал-GaAs та дозволить покращити технічні характеристики та параметри НВЧ приладів з бар'єрами Шотткі на GaAs.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для формування омічних контактів до GaAs n-типу у виробництві традиційно використовують сплави на основі таких металів, як золото, платина або паладій, наприклад, Au-Ge-Ni, Pd-Ge-Mo-Cu**,** Au-Pt-Ti [7], питомий перехідний опір яких є досить низьким (10^{-5} Ом·см^2). Проте собівартість цих виробів є достатньо коштовною, зважаючи на вартість дорогоцінних металів. Широке застосування срібла стримується його великим природним дефіцитом. Сплави на основі срібла відповідають вимогам до матеріалу контакту: значна тепло- та електропровідність, невеликий коефіцієнт дифузії, збереження типу провідності GaAs, невелика температура плавлення, добра змочуваність поверхні GaAs, механічна міцність контакту.

Відомі [8-11] різні способи формування омічних контактів на основі срібла до GaAs. У [8] запропоновано способи виготовлення омічних контактів Au:Ge/Ni, Ag/In/Ge, In/Au:Ge GaAs, у складі яких 90% Au або 90% Ag, 5% Ge, 5% In або 5% Ni за вагою. Недолік – при температурі 640 ^{0}C починається мікросегрегація та виникнення явища агломерації при подальшому зростанні температури. У [9] описаний спосіб отримання омічних контактів до GaAs n-типу провідності зі сплаву Ag-Ge-In, в якому в якості контактного матеріалу використовують сплав срібло-германій-індій, що містить за вагою 75% Ag, 20% Ge, 5% In. Після напилення контакти відпалюють в вакуумній трубчастій печі при температурі 923 К протягом 10 хвилин. Питомий перехідний опір $\rho_к$=(1,5..2)·10^{-2}...(8…9)·10^{-3} Ом·см^2. Недоліками даного способу є низька термостабільність електричних параметрів контакту, а також недостатньо низький контактний опір. У [10] запропоновано спосіб отримання омічних контактів до GaAs n-типу провідності зі сплаву Ag-Ge-In (75% Ag, 20% Ge, 5% In за вагою відповідно). Напилюють сплав при температурі підкладки 473 К, відпалюють у вакуумі при 873 К протягом 1 хвилини. Питомий перехідний опір складав $\rho_к$=7·10^{-4} Ом·см^2. Недоліки: недостатньо низький питомий контактний опір та порушення морфології поверхні плівки. У [11] спосіб формування багатошарового омічного контакту до напівпровідникових з'єднань GaAs включає послідовне нанесення на поверхню напівпровідника плівок нікелю, металу, вибраного з групи Au, Pd, Pt або Ag, та плівки германію з подальшим відпалом в атмосфері азоту і водню при температурах 673...1023 К протягом часу від декількох секунд до декількох

хвилин. Цей спосіб не дозволяє запобігти ерозії поверхні контакту і неконтрольованому протравленню межі розділу метал-напівпровідник при відпалі контакту.

На підставі вищевикладеного видно, що основні недоліки відомих способів створення срібломістких омічних контактів до арсеніду галію - це недостатньо низький контактний опір, низька термостабільність електричних параметрів контактів, неможливість запобігти ерозії поверхні контакту і неконтрольоване протравлення межі розділу метал-напівпровідник при відпалі контакту. Реальні характеристики і параметри омічних контактів на основі срібла до арсеніду галію залежать від технології їх виготовлення і потребують розробки нових способів створення контактів з поліпшеними параметрами.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи було дослідження впливу температурних режимів формування омічних контактів Ag-Ge-In/n-n^+GaAs на величину питомого перехідного опору.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження використовувався n-n^+GaAs(111)B епітаксійний монокристалічний, товщина епітаксійного шару $d_{еш}$=2 мкм, концентрація донорів в епітаксійному шарі складала $N_D=2\cdot10^{16}$ $см^{-3}$, концентрація донорів у підкладці $n_{підкл}=10^{18}$ $см^{-3}$, рухливість носіїв $\mu>5000$ $см^2/(В\cdot с)$. Контакти виготовляли методом вакуумного випаровування. Високий вакуум в процесі термічного випаровування дозволяє отримати металеві плівки без забруднення та дозволяє у широких межах регулювати швидкість випаровування та температуру підкладки. Товщина плівки отриманого контакту склала 0,5 мкм. Вимірювання опору контакту проводилося компенсаційним методом [12], розрахунок питомого перехідного опору омічного контакту проводився за методом еквівалентних схем [12].

Обробка поверхні напівпровідника для усунення різних дефектів, видалення чужорідних домішок, отримання мінімального мікрорельєфу призводить до непланарності межі розділу метал-напівпровідник. Хімічну обробку пластин GaAs проводили у сірчанокислому травнику H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (3:1:1) з подальшою витримкою впродовж $(1...1,3)\cdot10^3$ секунд у діоксиантарній кислоті, промивали у гарячій, холодній дистильованій та деіонізованій воді та у метиловому спирті. Далі проводили попередній температурний відпал підкладки при температурі 873 К впродовж 60 секунд у вакуумі. Підчас термічного відпалу відбуваються випаровування фізично, хімічно адсорбованих газів з поверхні, газів та легуючих домішок з приповерхневого шару, а також фазові перетворення в твердій фазі та термохімічні реакції [10]. Напилення контактного матеріалу Ag-Ge-In (75% Ag, 20% Ge, 5% In за вагою відповідно) проводилося на попередньо підігріту до 453 К підкладку.

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

Таблиця 1

Вплив температури та часу відпалу на питомий перехідний опір контактів $\rho_к$

Температура відпалу контакту, К	Час відпалу, С	Питомий перехідний опір контактів $\rho_к$, $Ом\cdot см^2$
693	60	$(7...9)\cdot10^{-2}$
	180	$(1...2)\cdot10^{-1}$
	300	$(7...9)\cdot10^{-1}$
743	60	$(6...7)\cdot10^{-2}$
	180	$(6...9)\cdot10^{-2}$
	300	$(3...5)\cdot10^{-2}$
793	60	$(6...8)\cdot10^{-3}$
	180	$(2...4)\cdot10^{-2}$
	300	$(4...6)\cdot10^{-2}$
843	60	$(6...9)\cdot10^{-4}$
	180	$(1...2)\cdot10^{-2}$
	300	$2\cdot10^{-2}...9\cdot10^{-3}$
893	60	$(5...7)\cdot10^{-5}$
	180	$(6...8)\cdot10^{-3}$
	300	$1,7\cdot10^{-2}...7\cdot10^{-3}$
943	60	$(3...5)\cdot10^{-4}$
	180	$(1...3)\cdot10^{-2}$
	300	$(1...2)\cdot10^{-2}$

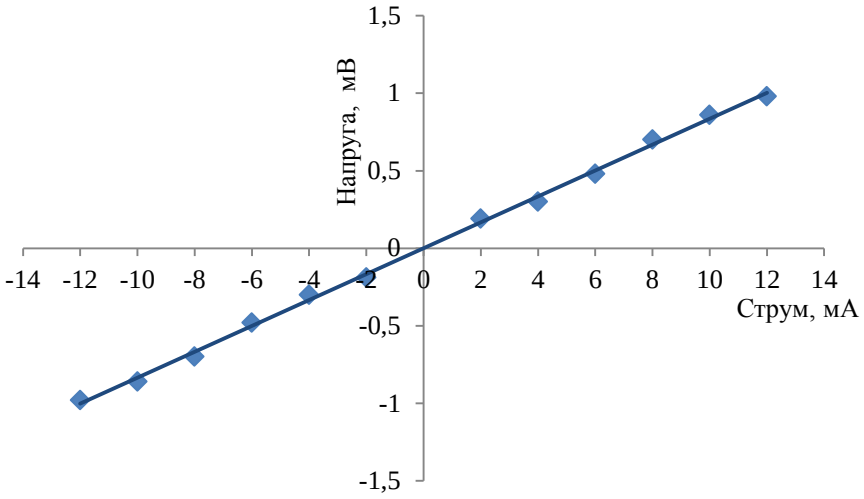

Рис. 1. Вольт-амперна характеристика омічного контакту Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs, $T_{відп}$=893 К, $\tau_{відп}$=60 с

Величина загального опору контактів R_k визначалась з виразу [12]:

$$R_k = \frac{\rho_{нп} a}{b}\left[\frac{\text{cth } aK}{aK}\right],$$

де a - ширина контакту (a=0,15 см), b - довжина контакту (b=0,5 см), $\rho_{нп}$ - поверхневий опір напівпровідника ($\rho_{нп}=2\cdot10^{-3}$ Ом·см).

Питомий перехідний опір контакту $\rho_к$ знаходили за формулою [12]:

$$\rho_k = \frac{R_k b}{K \text{ cth } aK}$$

Значення K, що відповідають значенням $R_к$, отримані за допомогою програми Wise Calculator з графічного розв'язку рівняння $y_1=cKa$, $y_2=\text{cth } Ka$, де $c=R_к\cdot b/(\rho_{нп}\cdot a)$.

У [10,11,13] стверджують, що термообробка впродовж визначеного часу забезпечує дифузію компонентів в області контакту, змінює склад перехідного шару за глибиною в повній відповідності до діаграми стану [14,15]. Для визначення впливу температурних режимів формування омічних контактів Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs на величину питомого перехідного опору напилені контакти відпалювали при температурах 693...943 К впродовж 60...300 с. Вольт-амперна характеристика досліджуваних омічних контактів лінійна (рис. 1). Дослідження показали, що час та температура відпалу контактної структури Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs істотно впливають на якість омічного контакту (табл.1). Кращі результати $\rho_к=(5\ldots7)\cdot10^{-5}$ Ом·см^2 отримані при температурі відпалу 893 К та часі відпалу 60 с.

Висновки

Встановлено, що час та температура відпалу контактної структури істотно впливають на якість омічного контакту.

Омічні контакти Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs отримані при температурі відпалу 893 К та часі відпалу 60 с мають значення питомого перехідного опору не вище $\rho_к=(5\ldots7)\cdot10^{-5}$ Ом·см^2.

Список використаної літератури

1. Дин Р. Новый тип СВЧ-транзистора – усилитель бегущей волны на n-GaAs / Р. Дин, Р. Матарезе. // ТИИЭР– 1972. – Т. 60. №12. – С. 23–43.
2. Kumabe K. GaAs travelling-wave amplifier / K. Kumabe, H. Kanbe. // Int. J. Electronics. – 1985. – Vol. 58. №4. – P. 587–611.
3. 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.

4. Дмитрієв В. С. Технологические особенности изготовления усилителя бегущей волны / В. С. Дмитрієв, Є. Я. Швець // Сборник материалов 10-й международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ - 2014» / В. С. Дмитрієв, Є. Я. Швець. – Севастополь: СевНТУ, 2014. – С. 158. – (ISBN 978-617-612-072).
5. Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition / S. M. Sze, K. K. Ng. – Hoboken: A John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 815 p.
6. Дмитрієв В.С. Багатокомпонентні омічні контакти до GaAs. [Електронний ресурс]/ В.С.Дмитрієв // Наукові праці Вінницького національного технічного університету, Вінниця: ВНТУ. – 2017. - № 3, С. 1-6. [S.l.], n. 3, oct. 2017. ISSN 2307-5376. Режим доступу до ресурсу: https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/517.
7. Милнс А. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник / А. Милнс, Д. Фойхт – М.: Мир, – 1975. – 432 с.
8. 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.
9. Изготовление омических контактов к GaAs n-типа проводимости из сплавов Ag-Sn и Ag-Ge-In. / [О. Д. Баранцева, В. Б. Бердавцев, Т. В. Критская и др.]. // Электронная техника. Серия 1: Электроника СВЧ. – 1975. – №12. – С. 98–104.
10. Спосіб виготовлення омічного контакту до GaAs: пат. 84122 Україна: МПК H 01 L 21/28 (2006.01). №u201304691; заявл. 15.04.13; опубл. 10.10.13, Бюл. №19. 5 с.
11. Каргин Н. И. Формирование омических контактов в транзисторе с высокой подвижностью электронов с метаморфным гетеропереходом на основе арсенида галлия / Н. И. Каргин, А. Л .Кузнецов, Л. А. Сейдман, Н. А. Чашкин, С. А. Шостаченко // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. - Выпуск 1 (232). - С. 75-84.
12. Нисков В. Я. Измерение переходного сопротивления омических контактов к тонким слоям полупроводников / В. Я. Нисков. // Приборы и техника эксперимента – 1971. – №1. – С. 235–237.
13. 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.
14. Мильвидский М. Г. Физико-химические основы получения разлагающихся полупроводниковых соединений / М. Г. Мильвидский, О. В. Пелевин, Б. А. Сахаров. – М.: Металлургия, 1974. – 392 с.
15. Panish M. B. Ternary Condensed Phase Systems of Gallium and Arsenic with Group lB Elements [Електронний ресурс] / M. B. Panish. // Journal of The Electrochemical Society. – 1967. – Vol. 114, № 5. – С. 516–521. – Режим доступу до ресурсу: http://jes.ecsdl.org/content/114/5/516.full.pdf.