УДК 621.2/3

В.С. ДМИТРІЄВ
Запорізька державна інженерна академія

ВПЛИВ СПОСОБУ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ GAAS-ПІДКЛАДКИ НА ПИТОМИЙ ПЕРЕХІДНИЙ ОПІР ОМІЧНИХ КОНТАКТІВ НА ОСНОВІ СРІБЛА

В роботі визначався вплив хімічної та термічної обробки пластини арсеніду галію n-типу провідності на питомий перехідний опір омічних контактів Ag-Ge-In/n-n+GaAs. Доведено, що якість омічного контакту поліпшується, якщо GaAs-підкладку після знежирення в суміші толуолу і метилового спирту, хімічної обробки у сірчанокислому травнику витримати у діоксиянтарній кислоті та додатково відпалити у вакуумі.

Ключові слова: омічний контакт, арсенід галію, сплав, срібло, хімічна обробка, відпал.

V.S. DMITRIEV
Zaporizhzhia State Engineering Academy

THE INFLUENCE OF THE GAAS SURFACE TREATMENT METHOD ON THE CURRENT TRANSIT RESISTANSE OF THE SILVER-BASED OCHMIC CONTACTS

A typical process for forming the GaAs boundary section with any material begins with the preparation of a plate surface. It must be cleaned of foreign pollutants in accordance with the requirements adopted in the technology of microelectronics. Processing of the semiconductor surface to eliminate various defects, remove foreign contaminants, obtaining a minimum microrelief leads to the nonplanarity of the metal-semiconductor boundary section. During the semiconductors surface treatment in vacuum with the thermal annealing results to the evaporation of physically and chemically adsorbed gases from the surface, gases and dopants from the near-surface layer, as well as phase transformations in the solid phase and thermochemical reactions. In this case, the surface is subjected to the action of various herbalists and cleansers and, of course, air. The electrophysical parameters of the real semiconductors surfaces after processing by existing methods become heterogeneous along the surface. This affects the value of the specific resistance of the ohmic contacts. So there is a need to develop more effective GaAs surface passivation methods. The purpose of this work was to study the influence of the GaAs surface substrate treatment method on the magnitude of the ohmic contacts Ag-Ge-In/n-n+GaAs specific resistance. To this study, n-n+GaAs (111) B epitaxial monocrystalline with an epitaxial layer thickness of 2 μm, donors concentration in the epitaxial layer $N_D=2\cdot10^{16}$ cm^{-3}, donor concentration in the substrate $n=10^{18}$ cm^{-3}, carriers mobility μ> 5000 cm^2/(B·c) was used. It has been established that the quality of the ohmic contact is improved if the GaAs substrate after chemical treatment in the sulfuric acid endure in the dioxinic acid during $1.2\cdot10^3$ seconds and further annealed in a vacuum not less than $1.2\cdot10^{-6}$ Torr at the 873 K temperature for 60 seconds It is proved that the adhesion, the surface condition of the sprayed film and the value of the specific resistance depend on the method of GaAs pre-processing.

Keywords: ohmic contact, gallium arsenide, alloy, silver, chemical treatment, annealing.

Постановка проблеми

Одним з основних параметрів, що характеризують якість омічних контактів є контактний опір, який має бути мінімальним. Типовий процес формування межі розділу GaAs з будь-яким матеріалом починається з підготовки поверхні пластини, яка повинна бути очищена від сторонніх забруднень відповідно до вимог [1–7], прийнятих в технології мікроелектроніки. Реальні епітаксійні плівки, які використовують в основному для виготовлення контактів метал-напівпровідник, мають нерівномірний розподіл домішок, що виникає в процесі вирощування плівки. Це призводить до появи механічної напруги та може привести до виникнення дислокацій, тріщин чи дефектів упаковки. Встановлено [2, 3, 6, 8], що обробка поверхні напівпровідника для усунення різних дефектів, видалення чужорідних домішок, отримання мінімального мікрорельєфу призводить до непланарності межі розділу метал-напівпровідник. Також при обробці поверхні напівпровідників у вакуумі за допомогою термічного відпалу відбуваються випаровування фізично та хімічно адсорбованих газів з поверхні, газів і легуючих домішок з приповерхневого шару, а також фазові перетворення в твердій фазі й термохімічні реакції [6–9]. При цьому поверхня піддається дії різних травників і очищуючих складів і, звичайно, повітря. Якщо нанести на чисту поверхню арсеніду галію будь-який матеріал, то властивості перехідної області з боку підкладки повинні відповідати чистому GaAs: рівень Фермі у GaAs на межі розділу повинен знаходитися біля середини забороненої зони. Тому електрофізичні параметри реальних поверхонь напівпровідників після обробки існуючими способами стають неоднорідними уздовж поверхні, а отже потребують розробки більш ефективних методів пасивації поверхні GaAs.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Величина контактного опору омічного контакту $\rho_к$ визначається значною мірою технологією його створення. Результати досліджень [7, 9] дозволили встановити, що для виготовлення омічних контактів необхідно отримувати у поверхні напівпровідника концентрацію домішок 10^{18} см$^{-3}$. Існують різні способи [10, 11] збільшення концентрації носіїв заряду у приповерхневому шарі. Легування поверхні металом [2, 6] відбувається при обробці поверхні напівпровідника у розчинах, що травлять або не травлять, які містять домішки різних металів.

Арсенід галію має іонно-ковалентний зв'язок. Особливість сполук $A^{III}B^{V}$ полягає у різній швидкості розчинення напівпровідників на площині (111) з гранями А і В, які мають різний характер хімічних зв'язків поверхневих атомів підкладки. При однаковому травнику сторона (111) В полірується (гладка, дзеркальна), сторона (111) А – матова з розвинутою мозаїчною структурою [6]. Хімічне полірування напівпровідникової підкладки проводять з метою згладжування нерівностей зі зменшенням шорсткості поверхні. Проведено

порівняльний аналіз відомих поліруючих травників до GaAs.

Для хімічного полірування GaAs-підкладок використовують [12] лужний травник H_2O_2(30%):KOH(10%) = 1:5 та 1:20. Цей травник безпечний у роботі, однак якість $\rho_к$ трохи гірша, ніж у сірчанокислих травниках, особливо при глибині полірування більше 5 мкм.

Для хімічного полірування арсеніду галію широко використовують систему Br_2-метанол [6, 13], яка є універсальною системою травлення для $A^{III}B^{V}$, але значна токсичність її компонентів спонукає вести пошук нових, менш токсичних галогенвмісних та галогенвиділяючих травильних композицій. Задовільні результати хімічного полірування за якістю та станом поверхні пластин GaAs отримані у розчинах метанолу зі змістом брому від 2% до 5%.

Відомі роботи [13, 14], у яких відмовляються від поліруючих травників на основі перекису й сірчаної кислоти [14] та пропонують аміачно-перекисний травник для отримання матованої (шорсткої) поверхні арсеніду галію для покращення адгезії або відзначають [14], що аміачно-перекисний травник ніяк не впливає на характеристики приладів.

В [13] проведено порівняння якості поверхні GaAs при обробці травником складу NH_4:H_2O_2:H_2O (1:20:0) – поверхня хвиляста, $R_z \geq 0{,}06$ мкм, травником H_2O_2:HF:NH_4F (15-26):(4-6):(67-80) – поверхня дзеркальна, R_z=0,07 мкм, травником H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (3:1:1) – дзеркальна поверхня з R_z=0,02 мкм. Таким чином, травлення в сірчанокислому травнику дає якіснішу поверхню.

Досить розповсюдженими поліруючими травниками для GaAs є розчини на основі H_2SO_4:H_2O_2:H_2O_2 [6] зі співвідношенням компонентів від 3:1:1 до 30:1:1, тобто з високим вмістом сірчаної кислоти. Згідно [6] зі збільшенням концентрації сірчаної кислоти у травнику швидкість полірування зменшується з 5-8 до 0,2 мкм/хв.

У [15] описаний спосіб попередньої обробки GaAs-підкладки для отримання омічних контактів Ag-Ge-In/n-GaAs, у якому пластини епітаксійного n-GaAs піддавали хімічному поліруванню в суміші метилового спирту і брому (6:1) (за об`ємом). Питомий перехідний опір отриманих омічних контактів достатньо високий $\rho_к$=(1,5…2)·10^{-2} – (8…9)·10^{-3} Ом·см^2.

У [16] обробка поверхні GaAs проводилась у H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (2:1:50) та HCl:H_2O (1:1), $\rho_к$=1,9·10^{-3}...1,3·10^{-4} Ом·см^2.

У [7] хімічна обробка пластин GaAs у сірчанокислому травнику з різним співвідношенням H_2SO_4 та H_2O_2 (1:2; 4:2; 3:1; 5:1) довела, що найкращі значення $\rho_к$=7·10^{-4} Ом·см^2 отримані при травленні в суміші H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (3:1:1).

Омічні контакти на основі срібла при таких способах обробки GaAs-підкладки мають недостатньо низький питомий перехідний опір.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи було дослідження впливу способу обробки поверхні GaAs-підкладки на величину питомого перехідного опору омічних контактів Ag-Ge-In/n-n^+GaAs.

Викладення основного матеріалу дослідження

Зниження опору омічних контактів (ОК) дозволяє зменшити опір пасивних областей і таким чином домогтися зниження коефіцієнта шуму [17, 18] в МІС НВЧ підсилювачів. Наразі для створення омічних контактів на арсеніді галію використовують подвійні або більш складні сплави на основі міді, срібла, золота, паладію з домішкою металів (кадмію, магнію, алюмінію, індію та ін.), котрі легко окислюються. Опір ерозії цієї групи сплавів базується на захисній дії оксидних плівок, що перешкоджають випаровуванню, але не перешкоджають контактній провідності. Сплави срібла подібного типу досить добре пручаються корозії, зберігаючи низький контактний опір [18].

Для створення контактів у приладах з арсеніду галію повинні використовуватися метали або сплави, які добре розчиняються у ньому або створюють евтектичний сплав. Розчинність металу у GaAs визначає ступінь можливого легування приконтактних шарів напівпровідника. Від розчинності арсеніду галію у металі залежить глибина вплавлення металу, від якої в свою чергу залежить якість отриманого омічного контакту. Цю розчинність можливо визначити з діаграми стану метал-миш'як-галій [19, 20].

У [7, 12, 21, 22] досліджено термічну стабільність тонких срібних плівок, оскільки при підвищенні температури може виникнути агломерація, що проявляється в зміні морфології та веде до зміни електричних характеристик плівок. В [22, 23] було запропоновано для придушення явища агломерації вводити легуючі компоненти, перешкоджаючі зростанню зерен під час відпалу. При цьому важливе значення для Ag-плівок мають не тільки ретельний підбір легуючих елементів, але і їх кількість.

Срібло під дією електричних розрядів окислюється, але оксиди срібла електропровідні та легко дисоціюють (температура дисоціації ~ 573 К). Внаслідок цього окислення майже не позначається на стійкості контактного опору срібних контактів. Срібло володіє схильністю до утворення непровідних плівок сульфіду Ag_2S в результаті взаємодії з сірководнем, сліди якого завжди присутні в атмосфері. Наявність вологи прискорює перебіг реакції. Тому срібні контакти не рекомендується застосовувати по сусідству з гумою, ебонітом чи іншими матеріалами, що містять сірку.

Методи нанесення металів на напівпровідники за ступенем впливу на властивості поверхні напівпровідника можна розділити на дві групи [24]: методи, що не змінюють властивості поверхні напівпровідника (наприклад, термічне напилення металу у вакуумі при низькій температурі напівпровідника) та методи, що змінюють властивості поверхні напівпровідника (наприклад, катодне

розпилення металу, хімічне та електрохімічне осадження). Хімічне та електрохімічне осадження не використовують для матеріалів високої чистоти через побічні процеси та сторонні домішки в електролітах. Катодне розпилення проводиться у атмосфері газу, що може призводити до забруднення напилених плівок контактного матеріалу.

Контакти виготовляли методом вакуумного випаровування. Високий вакуум в процесі термічного випаровування дозволяє отримати металеві плівки без забруднення. Цей метод [24] дозволяє у широких межах регулювати швидкість випаровування та температуру підкладки. Товщина плівки контакту склала 0,5 мкм.

Для дослідження використовувався n-n^+GaAs(111)B епітаксійний монокристалічний, товщина епітаксійного шару $d_{еш}$=2 мкм, концентрація донорів в епітаксійному шарі $N_D=2\cdot10^{16}$ $см^{-3}$, концентрація донорів у підкладці $n_{підкл}=10^{18}$ $см^{-3}$, рухливість носіїв μ>5000 $см^2/(В\cdot с)$.

Визначення величини питомого перехідного опору контактів ρ_k, як правило, є необхідним для оцінки якості омічних контактів. Існує цілий ряд методів [25], які іноді поділяють за способом визначення перехідного опору контактів. Величина ρ_k є фізичною характеристикою невипрямляючих контактів, яка не залежить від їх площі та геометрії. У зв'язку з розвитком планарної та планарно-епітаксійної технологій інтегральних схем і деяких типів напівпровідникових приладів стає актуальним вимірювання ρ_k контактів, що знаходяться на одній стороні напівпровідникової пластини. Існують різні методи вимірювання перехідного опору омічних контактів до тонких шарів напівпровідника [26]. Значення питомого перехідного опору омічного бар'єрного переходу розраховувалось за методикою, запропонованою у [27]. Тестовий зразок представляв собою структуру з контактами у формі паралельних прямокутників на поверхні тонкого епітаксійного шару, зрощеного на високолегованій напівпровідниковій підкладці Вимірювання опору контакту проводилося компенсаційним методом [27]. Основна похибка вимірів при цьому, виражена в % 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. Розрахунок питомого перехідного опору омічного контакту проводився методом еквівалентних схем [27]. Умова використання методу: тонкий шар напівпровідника з малим питомим опором, на якому нанесено контакт, поверхневий опір металевого контакту менший за поверхневий опір напівпровідника, ширина контакту набагато більше товщини епітаксійного шару.

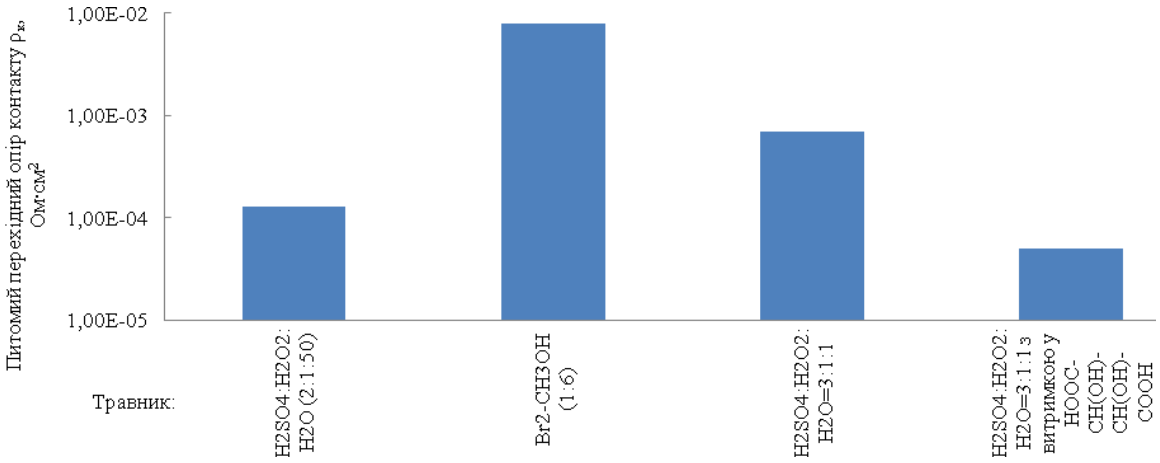

Рис. 1. Вплив хімічної обробки GaAs на питомий перехідний опір омічних контактів на основі срібла

Порівняльний аналіз відомих [6, 7, 13, 16] способів обробки з метою отримання найнижчого $\rho_к$ показав (рис. 1), що за станом та якістю поверхні пластин GaAs кращим травником є H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (3:1:1).

У таблиці 1 наведено результати розрахунків питомого перехідного опору контакту $\rho_к$ для контактів, які до напилення потрійного сплаву були відпалені при різних температурах.

При проведенні дослідження впливу хімічної обробки пластини GaAs на питомий перехідний опір омічного контакту у сірчанокислому травнику H_2SO_4:H_2O_2:H_2O (3:1:1) було рекомендовано додатково витримувати пластину впродовж $(1...1,3)\cdot10^3$ секунд у діоксиянтарній кислоті HOOC-CH(OH)-CH(OH)-COOH, промивати у гарячій, холодній дистильованій та деіонізованій воді та у метиловому спирті. Чистота поверхні контролювалася наступним методом: пари води з невеликого отвору потрапляють на випробовувану поверхню пластини і конденсуються на ній. Якщо на поверхні гідрофобних матеріалів немає, крапельки, що утворилися, змочуватимуть її і розтікатимуться, утворюючи тонку безперервну плівку води. Встановлено, що витримка у діоксиянтарній 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 $5\cdot10^{-5}$ $Ом\cdot см^2$ (рис. 1).

Таблиця 1

Вплив попереднього відпалу на питомий перехідний опір контактів $\rho_к$

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

Досліджено вплив на питомий перехідний опір контакту Ag-Ge-In/n-n$^+$GaAs попереднього відпалу пластин арсеніду галію після хімічної обробки.

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

Висновки

Встановлено, що адгезія, стан поверхні напиленої плівки та значення питомого перехідного опору залежать від способу попередньої обробки GaAs.

Доведено, що якість омічного контакту покращується, якщо GaAs-підкладку після хімічної обробки у сірчанокислому травнику, витримати у діоксиянтарній кислоті впродовж $1{,}2\cdot10^3$ секунд та додатково відпалити у вакуумі не гірше $1{,}2\cdot10^{-6}$ Торр при температурі 873 К впродовж 60 секунд.

Література

1. Фелдман Л. Основы анализа поверхности и тонких пленок / Л. Фелдман, Д. Майер ; [пер. с англ. В. А. Аркадьев ; пер с англ. Л. И. Огнев ; ред. В. В. Белошицкий]. – М. : Мир, 1989. – 344 с.
2. 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. 19–22.
3. Электрически активные дефекты монокристаллического арсенида галлия, вызванные обработкой / П. Н. Петров, Н. А. Калашникова, О. Д. Жукова, О. Д. Ермилов // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1989. – № 6 (240). – С. 54–57.
4. 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.
5. 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.
6. Физико-химические методы обработки поверхности полупроводников / [Б. Д. Луфт, В. А. Перевощиков, Н. М. Возмилова и др.]. – М. : Радио и связь, 1982. – 136 с.
7. Пат. № 84122 Україна, МПК H 01 L 21/28 (2006.01). Спосіб виготовлення омічного контакту до GaAs / Дмитрієв В. С., Швець Є. Я., Дмитрієва Л. Б. ; заявник і патентовласник Запорізька державна інженерна академія. – № u201304691 ; заявл. 15.04.13 ; опубл. 10.10.13, Бюл. № 19.
8. Бондаренко В. Б. Анализ естественных неоднородностей потенциала у поверхности примесного полупроводника / В. Б. Бондаренко, М. В. Кузьмин, В. В. Кораблев // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35, № 8. – С. 964–968.
9. Іващук А. В. Формування омічних контактів з одночасним очищенням поверхні арсеніду галію і її легуванням атомами германію / А. В. Іващук. // Наукові вісті НТУ КПІ. – 2000. – № 2. – С. 5–8.
10. 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.).
11. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью δ-легирования:расчет и эксперимент для Al/GaAs / В. И. Шашкин, А. В. Мурель, В. М. Данильцев, О. И. Хрыкин // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36, № 5. – С. 537–542.
12. Thermal stability of Ag films in air prepared by thermal evaporation / [L. Jing, L. Fachun, L. Limei and other] // Applied Surface Science. – 2007. – Vol. 253, № 17. – P. 7036–7040.

13. Штейнгарт А. П. Применение метода поверхностной фото-ЭДС для анализа процесса химической обработки GaAs / А. П. Штейнгарт // Вестник Новгородского государственного университета. – 2004. – №26. – С. 173–174.

14. Пат. 2063095 Российская Федерация, МПК H 01 L 21/306. Травитель для арсенида галлия / Возмилова Л. Н., Малярова В. Г. ; заявитель Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, патентообладатель Завод при Научно-исследовательском институте полупроводниковых приборов. – № 93026208/25 ; заявл. 07.05.93 ; опубл. 27.06.96, Бюл. № 17-2000.

15. 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.

16. Huo P. 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 : http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-4432-6

17. 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 : http://www.novsu.ru/file/1010219.

18. Дмитриев В. С. Технологические особенности изготовления СВЧ прибора с барьерами Шоттки / В. С. Дмитриев, Л. Б. Дмитриева, Е. Я. Швец // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2018. – Т. 61, № 2. – С. 108–116.

19. Мильвидский М. Г. Физико-химические основы получения разлагающихся полупроводниковых соединений / М. Г. Мильвидский, О. В. Пелевин, Б. А. Сахаров. – М. : Металлургия, 1974. – 392 с.

20. 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 : http://jes.ecsdl.org/content/114/5/516.full.pdf.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. Майссела Л. Технология тонких пленок / Л. Майссела, Р. Гленга. – Москва : Сов. радио, 1977. – Т. 1. – 662 с.

25. Чистяков Ю. Д. Анализ методов определения величины переходного сопротивления невыпрямляющих контактов / Ю. Д. Чистяков, В. В. Баранов, А. П. Достанко. – М. : ЦНИИ «Электроника», 1973. – 64 с. – (Обзоры по электронной технике. Полупроводниковые приборы ; вып. 7(143)).

26. Каганович Э. Б. Методы измерения контактного сопротивления полупроводниковых планарных структур (обзор) / Э. Б. Каганович, С. В. Свечников // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. – 1991. – Вып. 21. – С. 1–11.

27. Нисков В. Я. Измерение переходного сопротивления контактов на тонких слоях полупроводника / В. Я. Нисков, В. В. Заддэ, А. К. Зайцева, В. И. Стрельцова // Приборы и техника эксперимента – 1971. – № 2. – С. 240–242.

References

1. Feldman L. Osnovy analiza poverhnosti i tonkih plenok [Tekst] / L. Feldman, D. Majer ; [per. s angl. V. A. Arkadev ; per s angl. L. I. Ognev ; red. V. V. Beloshickij]. – M.: Mir, 1989. – 344 s.

2. Markin B. V. Vliyanie himicheskoj obrabotki na sostav poverhnosti GaAs [Tekst] / B. V. Markin, V. V. Chikun. // Elektronnaya tehnika. Seriya 1. Elektronika SVCh. – 1990. – №4. – S. 19-22.

3. Elektricheski aktivnyye defekty monokristallicheskogo arsenida galliya. vyzvannyye obrabotkoy [Tekst] / P. N. Petrov. N. A. Kalashnikova. O. D. Zhukova. O. D. Ermilov. // Elektronnaya tekhnika. Seriya 1. Elektronika SVCh. – 1989. – №6 (240). – S. 54–57.

4. Pat. 2402103 Rossijskaya Federaciya, MPK H 01 L 21/316. Sposob passivacii poverhnosti GaAs. / Erofeev E. V., Ishutkin S. V., Kagadej V. A., Nosaeva K. S.; zayavitel i patentoobladatel ZAO «Nauchno-proizvodstvennaya firma Mikran». – №2009133993/28; zayavl. 10.09.09; opubl. 20.10.10, Byul. №29.

5. Pat. 2319798 Rossijskaya Federaciya, MPK H 01 L 21/302. Sposob polucheniya atomno-gladkoj poverhnosti podlozhki arsenida galliya / Bezryadin N.; N., Kotov G. I., Starodubcev A. A., Strygin V. D., Arsentev I. N.; zayavitel i patentoobladatel GOUVPO Voronezhskaya gosudarstvennaya tehnologicheskaya akademiya. – №2006116830/15; zayavl. 16.05.06; opubl. 20.03.08, Byul. №8.

6. Fiziko-himicheskie metody obrabotki poverhnosti poluprovodnikov / [B. D. Luft, V. A. Perevoshikov, N. M. Vozmilova i dr.]. – M.: Radio i svyaz, 1982. – 136 s.

7. Pat. № 84122 Ukraina, MPK H 01 L 21/28 (2006.01). Sposib vyhotovlennia omichnoho kontaktu do GaAs / Dmytriiev V. S., Shvets Ye. Ya., Dmytriieva L. B.; zaiavnyk i patentovlasnyk Zaporizka derzhavna inzhenerna akademiia. – №u201304691; zaiavl. 15.04.13; opubl. 10.10.13, Biul. №19.

8. Bondarenko V. B. Analiz estestvennyh neodnorodnostej potenciala u poverhnosti primesnogo poluprovodnika / V. B. Bondarenko, M. V. Kuzmin, V. V. Korablev. // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 2001. – T. 35, №8. – S. 964–968.

9. Ivashchuk A. V. Formuvannia omichnykh kontaktiv z odnochasnym ochyshchenniam poverkhni arsenidu haliiu i yii lehuvanniam atomamy hermaniiu / A. V. Ivashchuk. // Naukovi visti NTU KPI. – 2000. – №2. – S. 5–8.

10. Dmitriyev V. S. Tehnologicheskie osobennosti izgotovleniya usilitelya begushej volny / V. S. Dmitriyev, Ye. Ya. Shvec // Sbornik materialov 10-j mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii «Sovremennye problemy radiotehniki i telekommunikacij «RT - 2014» / V. S. Dmitriyev, Ye. Ya. Shvec. – Sevastopol: SevNTU, 2014. – S. 158. – (ISBN 978-617-612-072.).

11. Upravlenie harakterom tokoperenosa v barere Shottki s pomoshyu d-legirovaniya:raschet i eksperiment dlya Al/GaAs / V. I. Shashkin, A. V. Murel, V. M. Danilcev, O. I. Hrykin. // Fizika i tehnika poluprovodnikov. – 2002. – T. 36, № 5. – S. 537-542.

12. Thermal stability of Ag films in air prepared by thermal evaporation / [L. Jing, L. Fachun, L. Limei and other]. // Applied Surface Science. – 2007. – Vol. 253, №17. – P. 7036–7040

13. Shtejngart A. P. Primenenie metoda poverhnostnoj foto-EDS dlya analiza processa himicheskoj obrabotki GaAs / A. P. Shtejngart // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2004. – №26. – S. 173–174.

14. Pat. 2063095 Rossijskaya Federaciya, MPK H 01 L 21/306. Travitel dlya arsenida galliya / Vozmilova L. N., Malyarova V. G.; zayavitel Nauchno-issledovatelskij institut poluprovodnikovyh priborov, patentoobladatel Zavod pri Nauchno-issledovatelskom institute poluprovodnikovyh priborov – №93026208/25; zayavl. 07.05.93; opubl. 27.06.96, Byul. № 17-2000.

15. Izgotovlenie omicheskih kontaktov k GaAs n-tipa provodimosti iz splavov Ag-Sn i Ag-Ge-In. / [O. D. Baranceva, V. B. Berdavcev, T. V. Kritskaya i dr.]. // Elektronnaya tehnika. Seriya 1: Elektronika SVCh. – 1975. – №12. – S. 98–104.

16. Huo P. Ti/Pd/Ag Contacts to n-Type GaAs for High Current Density Devices [Elektronnyi resurs] / P. Huo, I. Rey-Stolle. // Journal of Electronic Materials. – 2016. – Vol. 45, №6. – P. 2769–2775. – Rezhym dostupu do resursu: http://dx.doi.org/10.1007/s11664-016-4432-6

17. Maloshumyashie arsenid-gallievye usiliteli pri vozdejstvii elektromagnitnyh pomeh povyshennyh intensivnostej [Elektronnyj resurs] / [S. V. Platonov, N. V. Permyakov, B. I. Seleznev i dr.]. // Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2012. – №67. – S. 29–32. – Rezhim dostupa k resursu: http://www.novsu.ru/file/1010219.

18. Dmitriev, V. S. Tehnologicheskie osobennosti izgotovleniya SVCh pribora s barerami Shottki / V. S. Dmitriev, L. B. Dmitrieva, E. Ya. Shvec. // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika. – 2018. – T.61, №2. – S. 108–116.

19. Milvidskij M. G. Fiziko-himicheskie osnovy polucheniya razlagayushihsya poluprovodnikovyh soedinenij / M. G. Milvidskij, O. V. Pelevin, B. A. Saharov. – M.: Metallurgiya, 1974. – 392 s.

20. Panish M. B. Ternary Condensed Phase Systems of Gallium and Arsenic with Group lB Elements [Elektronnyi resurs] / M. B. Panish. // Journal of The Electrochemical Society. – 1967. – Vol. 114, № 5. – C. 516–521. – Rezhym dostupu do resursu: http://jes.ecsdl.org/content/114/5/516.full.pdf.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. Majssela L. Tehnologiya tonkih plenok / L. Majssela, R. Glenga. – Moskva: Sov. radio, 1977. – T. 1. – 662 s.

25. Chistyakov Yu. D. Analiz metodov opredeleniya velichiny perehodnogo soprotivleniya nevypryamlyayushih kontaktov [Tekst] / Yu. D. Chistyakov, V. V. Baranov, A. P. Dostanko. – M.: CNII «Elektronika», 1973. – 64 s. - (Obzory po elektronnoj tehnike. Poluprovodnikovye pribory ; vyp. 7(143)).

26. Kaganovich E. B. Metody izmereniya kontaktnogo soprotivleniya poluprovodnikovyh planarnyh struktur (obzor) / E. B. Kaganovich, S. V. Svechnikov // Optoelektronika i poluprovodnikovaya tehnika. – 1991. – Vyp. 21. – S. 1–11.

27. Niskov V. Ya. Izmerenie perehodnogo soprotivleniya kontaktov na tonkih sloyah poluprovodnika / V. Ya. Niskov, V. V. Zadde, A. K. Zajceva, V. I. Strelcova // Pribory i tehnika eksperimenta – 1971. – №2. – S. 240–242.

Рецензія/Peer review : 16.03.2018 р. Надрукована/Printed :22.05.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Критська Т.В.