

КАТОДНІ КОНТАКТИ З ДИФУЗІЙНИМИ БАР'ЄРАМИ TiV_x ДЛЯ ДІОДІВ ГАННА НА ОСНОВІ InP

Досліджуються фізичні процеси, що відбуваються під дією зовнішніх впливів у багатошарових омичних контактах до $n-InP$ з дифузійним бар'єром TiV_x . Як зовнішні впливи використовувалися мікрохвильова обробка, швидка термічна обробка (ШТО) та γ -опромінення ^{60}Co . Встановлено, що омичні контакти $Au-TiV_x-Ge-Au-n-n^+-n^{++}-InP$, що сформовані магнетронним напиленням з наступною ШТО при температурі 450 °С, зберігають свою структуру і величину питомого контактного опору при робочих температурах діода Ганна. Вперше була отримана зростаюча температурна залежність питомого контактного опору омичного контакту $Au-Ge-TiV_x-Au$ до $n-n^+-n^{++}-InP$ в діапазоні температур 80–380 К, яка була пояснена струмопроходженням по металевих шунтах, що проросли крізь дислокації і замикають ОПЗ, з урахуванням обмеження протікаючого струму дифузійним підведенням електронів.

Ключові слова: омичний контакт; діод Ганна; фосфід індію; швидка температурна обробка; γ -опромінення; борид титану; мікрохвильова обробка.

Вступ. Постановка проблеми. На сьогодні електромагнітне випромінювання гіга- та терагерцового діапазонів знаходить широке застосування в різних сферах людської діяльності. Зокрема, в медицині терагерцове випромінювання використовується для ранньої діагностики ракового захворювання шкіри. Сканери в аеропортах, що працюють на терагерцових генераторах, дозволяють успішно боротися з контрабандою товарів і тероризмом. Випромінювання цього діапазону також застосовується в системах зв'язку, локації та спеціального призначення. Ці та низка інших перспективних на сьогодні напрямків надвисокочастотної (НВЧ) електроніки потребують розробки надійних і високоефективних генераторів гіга- та терагерцового діапазонів, які можуть бути створені на основі діода Ганна (ДГ). Для створення ДГ на частотний діапазон >100 ГГц використовують фосфід індію. Основна проблема при створенні надійних надвисокочастотних InP ДГ полягає у розробці якісних термостабільних катодних контактів до напівпровідника [1–3].

Викладення основного матеріалу. Тестові епітаксійні $n-n^+-n^{++}$ структури були виготовлені методом газофазної епітаксії в Фізико-технічному інституті ім. А.Ф. Йоффе РАН (м. Санкт-Петербург, Росія). Вони мали активний n -шар завтовшки 2 мкм з концентрацією носіїв заряду $9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, буферний n^+ -шар завтовшки 5 мкм з концентрацією носіїв заряду $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ і n^{++} -підкладку завтовшки 350 мкм з концентраціями носіїв заряду більше $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, орієнтація кристалу InP (100). Кристал ДГ з епітаксійною структурою фосфіду індію та омичний контакт створювалися на технологічній лінійці в державному підприємстві НДІ "Оріон". Там же для визначення оптимальної температури формування омичного контакту було проведено серію швидких термічних обробок (ШТО) контактної структури в інтервалі температур 350–600 °С. Для запобігання виходу компонентів контактоутворюючого шару назовні контактної металізації $Au-TiV_x-Ge-Au-n-n^+-n^{++}-InP$, застосовувався дифузійний бар'єр TiV_x . Вимірювання питомого контактного опору (ρ_c) проводилося за допомогою методу transmission line method (TLM), який найбільш зручний у використанні і достатньо точний для вимірювання малих величин ρ_c [4, 5].

Встановлено, що зі збільшенням температури відпапу відбувається масопереніс Ge у InP , при цьому дифузійний бар'єр TiV_x залишається стабільним при всіх температурах відпапу. Квазіаморфна плівка TiV_x протидіяла також процесу масоперенесення металу (Au) із верхнього контактного шару вглиб напівпровідника та напівпровідника на зовнішню поверхню контактної металізації [6].

Після різних режимів ШТО методом Оже-електронної спектроскопії та рентгенівської дифрактометрії досліджувалися фазові зміни та перерозподіл компонентів шарової металізації при формуванні омичного контакту до $n-n^+-n^{++}-InP$. Після нанесення контактної металізації формування омичного контакту відбувається під впливом ШТО, внаслідок якої між компонентами контактної металізації та напівпровідником відбуваються твердофазні реакції. У вихідних зразках за результатами рентгенівської дифрактометрії були виявлені рефлекси від InP , Au і Ge , що свідчить про шарову структуру металізації. Максимумів від TiV_x виявлено не було в зв'язку з тим, що він знаходиться в рентгеноаморфній фазі. Після відпапу при $T = 400$ °С спостерігалися бінарні фази Au_3In та Au_4In . Виявлено також максимум на $2\theta = 31^\circ$, що вказує на наявність фази $Au_{0.72}Ge_{0.28}$. Внаслідок виникнення сполук Ge і Au з компонентами напівпровідника відбувається руйнування поверхневого шару InP . Після відпапу при $T = 490$ °С тривалістю 30 с значно більша кількість P і In вступає в реакції з Au і Ge . Це виявляється у формуванні фаз, збагачених даними елементами, наприклад, Au_3In_2 , Au_7In_3 , Au_9In_4 , GeP_2 . Фази $Au_{0.72}Ge_{0.28}$ та TiV_x виявлені не були.

Важливим моментом при створенні контактної металізації є співвідношення між товщинами шарів Ge та Au. Залежно від цього співвідношення відсотковий вміст германію буде змінюватися, через що змінюється температура повного розплавлення Au-Ge. Після досягнення температури, за якої у розплав перейде все золото, воно почне збиратися у краплі через погане змочування поверхні TiB_x . Тому додатково досліджувався вплив товщини золота та германію, що знаходяться під дифузійним бар'єром TiB_x в контактній металізації $Au-TiB_x-Au-Ge-n-n^+-n^{++}-InP$ на міжфазні взаємодії між компонентами металізації. Показано, що основними факторами, які регулюють процес фазоутворення, є температура і час ШТО, а також відсоткове співвідношення між Au та Ge, що знаходяться в омичному контакті $Au-TiB_x-Au-Ge-n-n^+-n^{++}-InP$ під TiB_x . Золото та германій за температур ШТО $>363^\circ C$ утворюють золото-германієву евтектику. В тих областях, де склад відповідає евтектичному, процес плавлення починається раніше, ніж в інших. Масоперенесення Ge в InP з області евтектичного складу буде переважаючим по відношенню до оточення, що і буде визначати формування шару n^+ та низькоомного омичного контакту. За однакової товщини шарів Au і Ge менше значення контактної опору досягається, коли вони становлять по 25 нм кожна. Додаткове зменшення контактної опору досягається ШТО при $T = 450^\circ C$ тривалістю 20 с. Збільшення товщини шарів золота та германію не дає додаткового зменшення ρ_c , проте достатньо ефективним може бути співвідношення (3:1) Au – 180 нм, а Ge – 60 нм (рис. 1).

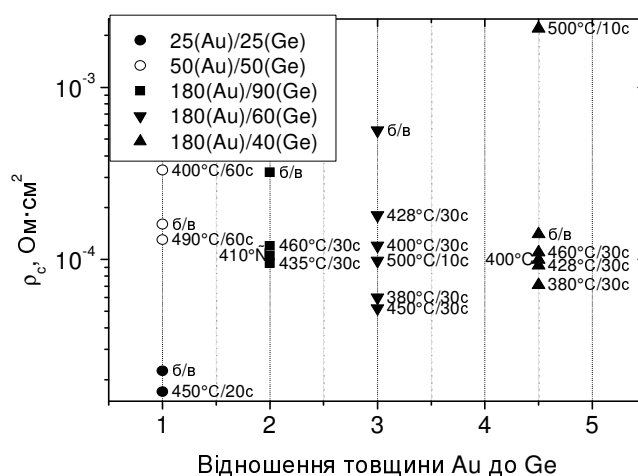


Рис. 1. Залежність ρ_c при 300 K від відношення товщини шарів золота та германію, що знаходяться під дифузійним бар'єром в контактній металізації $Au-TiB_x-Au-Ge-n-n^+-n^{++}-InP$

Внаслідок ШТО плівкового пакета Au-Ge в інтервалі температур 400–500 °C виникають зміни в залежності $\rho_c(T)$, що спричинені перерозподілом елементів контакту та виникненням інтерметалічних сполук і твердих розчинів. При розкладі фосфіду індію на межі поділу з Au золото відіграє роль селективного поглинача індію, створюючи вакансії для германію. Якщо вакансій більше, ніж їх здатні заповнити атоми германію, то вони можуть бути заповнені атомами Au. У такому випадку може виникнути високоомний шар в приконтактній області, що збільшує контактний опір. В протилежному випадку відбувається приповерхневе легування $n-InP$ германієм. ШТО за $T = 400^\circ C$ призводить до міжфазних взаємодій в контакті Au-InP з утворенням фаз Au_3In та Au_9In_4 . Після ШТО за $T = 450-500^\circ C$ між Au, Ge, In та P можливі також реакції з утворенням фаз Au_3In_2 , $Au_{10}In_3$, $AuIn$, $AuGe$, GeP_2 та GeP .

На прикладі тестової структури $Au-TiB_x-n-n^+-n^{++}-InP$ перевірялася стійкість дифузійного бар'єру до опромінення γ -квантами ^{60}Co з енергією 1,25 MeV. Аналіз профілів розподілу компонентів у контактній металізації опромінених до 10^6 Гр вихідних і підданих ШТО при $T = 400^\circ C$ тестових зразків показав, що в ній зберігається шарова структура. Після опромінення до дози $2 \cdot 10^7$ Гр металізація порушується значним збільшенням вмісту кисню.

Діоди Ганна, виготовлені з контактної металізацією $Au-TiB_x-Ge-Au-n-n^+-n^{++}-InP$, генерували НВЧ коливання на другій гармоніці в температурному інтервалі від -40 до $+60^\circ C$. Дані щодо вихідної потужності залежно від частоти випромінювання для ДГ, виготовлених за класичною схемою на ДП НДІ «Оріон», і кращих світових зразків наведені на рисунку 2. Дане технічне рішення захищено трьома патентами України на корисну модель [7–9].

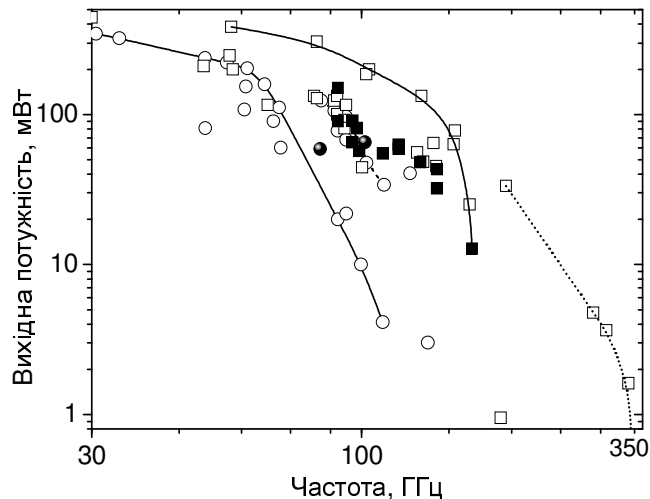


Рис. 2. Експериментальні результати для вихідної потужності в частотному діапазоні 30–400 ГГц для ДГ на основі GaAs (○) та InP (□) [10]. Експериментальні результати для вихідної потужності ДГ на основі GaAs (●) та InP (■), що отримані на ДП НДІ «Оріон»; основна гармоніка —, друга гармоніка ----

Висновки. Показано, що омичний контакт до *n*-InP з використанням контактоутворюючого шару Au-Ge формується в процесі ШТО за температур ≥ 400 °C з тривалістю відпау 20–30 с. У цьому випадку, завдяки масоперенесенню Ge, відбувається приповерхнєве легування InP.

Встановлено, що мінімальне значення питомого контактного опору для омичного контакту до *n*-InP ($n \sim 10^{16}$ см⁻³) із золото-германієвим контактоутворюючим шаром та дифузійним бар'єром із квазіаморфної плівки TiV_x завтовшки 100 нм може бути отримане шляхом ШТО за $T = 450$ °C тривалістю 20–30 с.

Виявлено, що дифузійний бар'єр у вигляді квазіаморфної плівки TiV_x завтовшки 100 нм з розмірами упорядкованих ділянок в плівці ≈ 3 нм залишається термостабільним та хімічно інертним щодо інших компонентів шарів металізації і напівпровідника до температур відпау 600 °C.

Автор вдячний за обговорення результатів співробітникам ДП НДІ «Оріон» Іванову Володимиріу Миколайовичу та Ковтонюку Віктору Михайловичу.

Список використаної літератури:

1. Eisele H. Submillimeter-Wave InP Gunn Devices / H.Eisele, R.Kamoua // IEEE Trans. Microw. Theory Techn. – 2004. – V. 52, № 10. – P. 2371–2378.
2. High Power Gunn Diode Oscillators / M.Gaskill, D.Headland, J.Higginbotham et al. – Department of Electrical Engineering and Electronics, UMIST. – 2003. – 95 p.
3. Новицький С.В. Омические контакты к фосфиду индия / С.В. Новицький // Петербургский журнал электрон. – 2012. – № 1. – С. 24–40.
4. Шеремет В.Н. Метрологические аспекты измерения сопротивления омических контактов / В.Н. Шеремет // Изв. высш. учеб. завед. Радиоэлектроника. — 2010. — Т. 53, № 3. — С. 3–12.
5. Новицький С.В. Методологические аспекты измерения удельного контактного сопротивления TLM методом с линейной и радиальной геометрией контактов / С.В. Новицький // Петерб. журн. эл. — 2013. — № 3. — С. 59–70.
6. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов / О.А. Агеев, А.Е. Беляев, Н.С. Болтовец и др. – Х. : НТК «Институт монокристаллов», 2008. – 385 с.
7. Пат. 61621 Україна, МПК H01L 21/268. Спосіб створення омичних контактів до широкозонних напівпровідників / О.Є. Беляєв, М.С. Болтовец, Р.В. Конакова, В.В. Міленін, Я.Я. Кудрик, В.М. Шеремет, С.В. Новицький ; заявник та правовласник ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ. — № u 2010 15698 ; заявл. 27.12.2010 ; опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14.
8. Пат. 65725 Україна, МПК H01L 21/66. Спосіб контролю якості кожного контакту діодів Ганна / О.Є. Беляєв, В.М. Іванов, Г.М. Веремійченко, В.М. Ковтонюк, Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик, В.В. Міленін, В.М. Шеремет, С.В. Новицький, О.В. Бобиль, І.С. Тарасов, І.М. Арсентьев ; заявник та правовласник ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ. — № u 2011 06930 ; заявл. 01.06.2011 ; опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23.

9. Пат. 83664 Україна, МПК H01L 21/268. Спосіб створення омичного контакту до InP та GaAs / О.Є. Беляєв, О.В. Бобиль, В.М. Іванов, Р.В. Конакова, Я.Я. Кудрик, С.В. Новицький, А.В. Саченко ; заявник та правласник ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ. — № u 2013 03026 ; заявл. 11.03.2013 ; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18.
10. Millimetre wave Gunn diode technology and applications / *N.Priestley, N.Farrington* : UK Automated RF & Microwave Measurm. Soc. Conf. (Milton Hill House, London, England, 19–20 April 2010). – London, 2010. – P. 1–10.

НОВИЦЬКИЙ Сергій Вадимович – кандидат фізико-математичних наук, старший викладач кафедри фізики Житомирського державного університету імені Івана Франка.

Наукові інтереси:

– фізика напівпровідникових приладів;

– технологія і діагностика омичних контактів до напівпровідникових приладів.

E-mail: serg_nov@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 31.10.2014

Новицький С.В. Катодні контакти з дифузійними бар'єрами TiB_x для діодів Ганна на основі InP
Новицкий С.В. Катодные контакты с диффузионными барьерами TiB_x для диодов Ганна на основе InP.
Novitskii S.V. Cathode contact with diffusion barriers TiB_x for Gunn diodes based on InP.

УДК 621.328.2

Катодные контакты с диффузионными барьерами TiB_x для диодов Ганна на основе InP / С.В. Новицкий

Исследованы физические процессы, происходящих под влиянием внешних воздействий в многослойных омических контактах к n-InP с диффузионным барьером TiB_x . В качестве внешних воздействий использовались быстрая термическая обработка (БТО), γ -облучение ^{60}Co и микроволновая обработка. Установлено, что омические контакты Au- TiB_x -Ge-Au-n-n⁺-n⁺⁺-InP, сформированные магнетронным напылением с последующей БТО при температуре 450 °С, сохраняют свою структуру и величину ρ_c при рабочих температурах диода Ганна (ДГ).

Под действием γ -облучения ^{60}Co до дозы 10^7 Гр в контактах, предварительно прошедших БТО при $T = 400$ °С, наблюдаются процессы деградации вследствие диффузии кислорода сквозь пленку TiB_x . Впервые была получена растущая температурная зависимость удельного контактного сопротивления омического контакта Au-Ge- TiB_x -Au к n-n⁺-n⁺⁺-InP в диапазоне температур 100–380 К, которая была объяснена токопрохождением по металлическим шунтам, проросшим сквозь дислокации и замыкающим ОПЗ, с учетом ограничения протекающего тока диффузионным подводом электронов.

Ключевые слова: омический контакт; диод Ганна; фосфид индия; быстрый температурный отжиг; борид титана; микроволновая обработка.

УДК 621.328.2

Cathode contact with diffusion barriers TiB_x for Gunn diodes based on InP / S.V. Novitskii

The investigation of physical processes in multilayer ohmic contacts to n-InP with TiB_x diffusion barrier subjected to external actions, such as microwave irradiation, rapid thermal annealing (RTA) and ^{60}Co γ -irradiation. It was found that Au- TiB_x -Ge-Au-n-n⁺-n⁺⁺-InP ohmic contacts formed using magnetron sputtering followed by RTA at a temperature of 450 °С retain their structure and contact resistivity value at Gunn diode operating temperatures. The contacts subjected to RTA at $T = 400$ °С followed by ^{60}Co γ -irradiation up to a dose of 10^7 Gy demonstrated degradation processes caused by oxygen diffusion through the TiB_x film.

For the first time, a growing temperature dependence of contact resistivity was obtained for Au-Ge- TiB_x -Au ohmic contact to n-n⁺-n⁺⁺-InP in the 80–380 K temperature range. This was explained by current flow through metal shunts associated with dislocations that short-circuit space-charge region, with allowance made for current limitation by diffusion supply of electrons.

Keywords: ohmic contact; Gunn diode; indium ohmic contact; rapid thermal annealing; titanium boride; microwave treatment.