

## РОЗРОБКА КОНКУРЕНТНИХ ДІОДІВ ГАННА НА ОСНОВІ n-InP

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.

Для визначення оптимальної температури формування омичного контакту було проведено серію швидких термічних обробок (ШТО) контактної структури в інтервалі температур  $400-490^\circ\text{C}$ . Для запобігання виходу компонентів контактоутворюючого шару назовні контактної металізації  $\text{Au-TiB}_x\text{-Ge-Au-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$ , застосовувався дифузійний бар'єр  $\text{TiB}_x$ . Встановлено, що із збільшенням температури відпалу відбувається масопереніс Ge у InP, при цьому дифузійний бар'єр  $\text{TiB}_x$  залишається стабільним при всіх температурах відпалу. Квазіаморфна плівка  $\text{TiB}_x$  протидіяла також процесу масоперенесення металу (Au) із верхнього контактного шару вглиб напівпровідника та напівпровідника на зовнішню поверхню контактної металізації.

Після різних режимів ШТО досліджувалися фазові зміни та перерозподіл компонентів шарової металізації при формуванні омичного контакту до  $n\text{-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$ . Показано, що після нанесення контактної металізації формування омичного контакту відбувається під впливом ШТО, внаслідок якої між компонентами контактної металізації та напівпровідником відбуваються твердофазні реакції. Так, при ШТО структури  $\text{Au-TiB}_x\text{-Ge-Au-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$  в діапазоні температур  $400-490^\circ\text{C}$  і більше відбувається утворення бінарних фаз, що підтверджується результатами рентгенівської дифрактометрії тестової контактної структури  $\text{TiB}_x\text{-Ge-Au-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$ .

Досліджувалися вплив товщини золота та германію, що знаходяться під дифузійним бар'єром  $\text{TiB}_x$  в контактній металізації  $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$  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  $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$  під  $\text{TiB}_x$ . Золото та германій при температурах ШТО  $\geq 363^\circ\text{C}$  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. При однаковій товщині шарів Au і Ge менше значення контактної опору досягається, коли товщини шарів Au і Ge становлять по 25 нм кожна. Додаткове зменшення контактної опору досягається ШТО при  $T=450^\circ\text{C}$  тривалістю 20 с. Збільшення товщини шарів золота та германію не дає додаткового

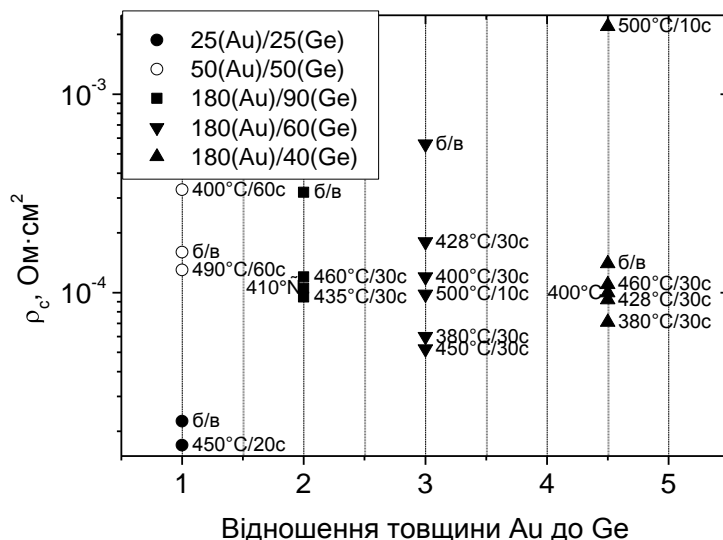


Рис. 1. Залежність  $\rho_c$  при  $300\text{ K}$  від відношення товщини шарів золота та германію, що знаходяться під дифузійним бар'єром в контактній металізації  $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$ .

Досліджувалися вплив товщини золота та германію, що знаходяться під дифузійним бар'єром  $\text{TiB}_x$  в контактній металізації  $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$  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  $\text{Au-TiB}_x\text{-Au-Ge-n-n}^+\text{-n}^{++}\text{-InP}$  під  $\text{TiB}_x$ . Золото та германій при температурах ШТО  $\geq 363^\circ\text{C}$  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. При однаковій товщині шарів Au і Ge менше значення контактної опору досягається, коли товщини шарів Au і Ge становлять по 25 нм кожна. Додаткове зменшення контактної опору досягається ШТО при  $T=450^\circ\text{C}$  тривалістю 20 с. Збільшення товщини шарів золота та германію не дає додаткового

зменшення  $\rho_c$ , проте достатньо ефективним може бути співвідношення (3:1) Au – 180 нм, а Ge – 60 нм (рис. 1).

Внаслідок ШТО плівкового пакету Au-Ge в інтервалі температур 400–500 °C виникають зміни в залежності  $\rho_c(T)$ , спричинені перерозподілом елементів контакту та виникненням інтерметалічних сполук і твердих розчинів.

При розкладі фосфіду індію на межі поділу з Au, золото виступає в ролі селективного поглинача індію, створюючи вакансії для германію. Якщо вакансій більше, ніж їх здатні заповнити атоми германію, то ці вакансії можуть бути заповнені атомами Au. В такому випадку може виникнути високоомний шар в приконтактній області, що збільшує контактний опір. В протилежному випадку відбувається приповерхнєве легування *n*-InP германієм. ШТО при  $T=400$  °C приводить до міжфазних взаємодій в контакті Au-InP з утворенням фаз  $Au_3In$  та  $Au_9In_4$ . Після ШТО при  $T=450-500$  °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.

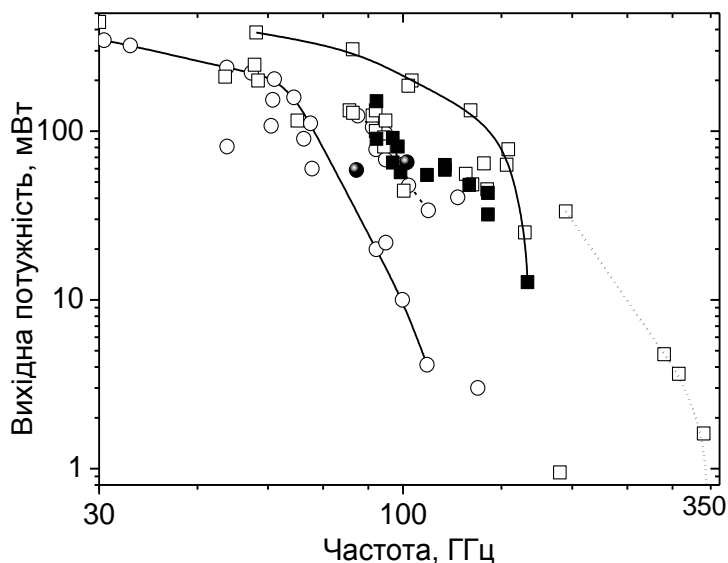


Рис. 2. Експериментальні результати для вихідної потужності в частотному діапазоні 30–400 ГГц для ДГ на основі GaAs (○) та InP (□). Експериментальні результати для вихідної потужності ДГ на основі GaAs (●) та InP (■), отримані на ДП НДІ «Оріон»; основна гармоніка —, друга гармоніка ----.

Показано, що омичний контакт до *n*-InP з використанням контактоутворюючого шару Au-Ge формується в процесі ШТО при температурах  $\geq 400$  °C з тривалістю відпалу 20-30 с. В 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<sup>-3</sup>) із золото-германієвим контактоутворюючим шаром та дифузійним бар'єром із квазіаморфної плівки  $TiV_x$  завтовшки 100 нм, може бути отримане шляхом ШТО при  $T \approx 450$  °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  $\leq 3$  нм залишається термостабільним та хімічно інертним щодо інших компонентів шарів металізації і напівпровідника до температур відпалу 600 °C.

На прикладі тестової структури Au- $TiV_x$ -*n-n<sup>+</sup>-n<sup>++</sup>*-InP перевірялася стійкість дифузійного бар'єру до опромінення  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Co з енергією 1,25 МеВ. Аналіз профілів розподілу компонентів в контактній металізації опромінених до  $10^6$  Гр вихідних і підданих ШТО при  $T=400$  °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.

Катодні контакти з дифузійними бар'єрами  $TiV_x$  для фосфідіндієвих ДГ дозволяють використати основні переваги фосфіда індію порівняно з арсенідом галію. Порівняння параметрів ДГ світових виробників із нашими результатами, що використовуються при розробці ДГ в ДП НДІ «Оріон», показане на рис. 2. Дане технічне рішення захищено трьома патентами України на корисну модель.