

*Описано основи іонного фрезерування, методи іонно-променевої обробки в літографії, переваги та недоліки в порівнянні із іншими методами, отримано структури ВІС на GaAs із другим рівнем металізації, виконаним за допомогою іонно-променевого травлення через маску із фоторезистом. Досліджено ефективність після імплантаційного відпаду іонним пучком в порівнянні із термічним відпадом*

*Ключові слова: арсенід галію, омичний контакт, іонна імплантація, іонне фрезерування, іонно-променево травлення*

*Описаны основы ионного фрезерования, методы ионно-лучевой обработки в литографии, преимущества и недостатки по сравнению с другими методами, получены структуры ВИС на GaAs со вторым уровнем металлизации, выполненным с помощью ионно-лучевого травления через маску с фоторезистом. Исследована эффективность послеимплантационного отжига ионным пучком по сравнению с термическим отжигом*

*Ключевые слова: арсенид галлия, омический контакт, ионная имплантация, ионное фрезерование, ионно-лучевое травление*

# ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МЕТАЛІЗАЦІЇ СУБМІКРОННИХ АРСЕНІД-ГАЛІЄВИХ СТРУКТУР ІОННИМ ФРЕЗЕРУВАННЯМ

**С. П. Новосядлий**  
Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: nsp@pu.if.ua

**Т. П. Кіндрат**  
Аспірант\*

E-mail: kindrat@i.ua

**Л. В. Мельник**  
Аспірант\*

**В. М. Варварук**  
Аспірант\*

\*Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки  
Прикарпатський національний  
університет ім. Василя Стефаника

вул. Шевченка 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000

## 1. Вступ

В останні 20 років створюються субмікронні структури великих інтегральних схем всезростаючої складності. Так як розмір кристалу є обмежений можливостями літографічного процесу і заданим виходом придатних, тому висока степінь інтеграції ( $10^5$ - $10^7$ ) передбачає високу густину компонентів із зменшення мінімальних топологічних елементів. Так як розводка в структурах ВІС займає 50-75% площі кристалу, то першочерговою задачею мінімізації структур є зменшення кроку багаторівневої розводки.

Перехід до виробництва субмікронних структур ВІС зосереджує увагу розробників до технологічних методів, які забезпечують максимальну роздільну здатність і формування елементів малих розмірів (<0,5 мкм) при високому виході придатних. Одним із рішень цієї проблеми є розробка сухих методів травлення, які забезпечують анізотропність переносних конфігурацій елементів у функціональний шар. До останнього часу найбільша увага в технології кремнієвих ВІС придавалась розробці НВЧ-плазмових і реактивно-іонних методів травлення, так як вони дозволяють отримати високі значення селективності та швидкості травлення. Проте можливість здійснення сухого травлення

хімічностійких матеріалів, таких як золото, платина, сплави германій-золото із субмікронним розділенням в арсенідгалієвій технології викликало велику зацікавленість до технології травлення металізованої розводки, основаної на розпиленні, що є фактично цілком фізичним процесом. Дана стаття і присвячена дослідженням цього ракурсу арсенідгалієвої технології.

## 2. Іонно-променево травлення при формуванні багаторівневої розводки в субмікронних арсенідгалієвих структурах ВІС

Іонно-променево травлення може використовуватись в таких випадках, коли чутлива до радіаційних пошкоджень поверхня напівпровідника, зокрема GaAs або межа розділу  $Si-SiO_2$  є покритою пасивуючим діелектричним шаром нітриду кремнію. В технологічному маршруті формування субмікронних структур ВІС відносяться створення другого рівня металізації, та формування контактних вікон. Сама тенденція зменшення топологічних розмірів елементів субмікронних ВІС, відродить інтерес до методу іонного або реактивно іонного травлення для досягнення високої роздільної здатності при формуванні топології структур [1].

Сучасний розвиток ВІС на арсеніді галію, де металізація в основному використовується золотом чи його сплавами, знову повернувся до методів іонного травлення що забезпечують досить високу роздільну здатність ( $\leq 10$  нм) для забезпечення високої швидкодії. Саме іонно-променеве травлення і було використане для створення швидкодіючих подільників, мультиплексорів, НВЧ-підсилювачів на арсеніді галію, зокрема для отримання топології другого рівня металізації на основі системи Cr-Pt-Au або AuGe. На рис. 1 приведені мікрофотографії структур ВІС на GaAs, які отримані за допомогою растрового електронного мікроскопа. Тут другий рівень металізації структури ВІС виконаний за допомогою іонно-променевого травлення через маску із фоторезистом ФП-051М. На рис. 1, б поданий технологічний прийом профілювання контактних вікон за допомогою зміни кута падіння іонного круга, при цьому слід відзначити, що всі елементи мають дуже точні розміри і не проходить їх підтравку, що дозволяє досягти дуже хорошого перекриття сходинок на різних краях структур.

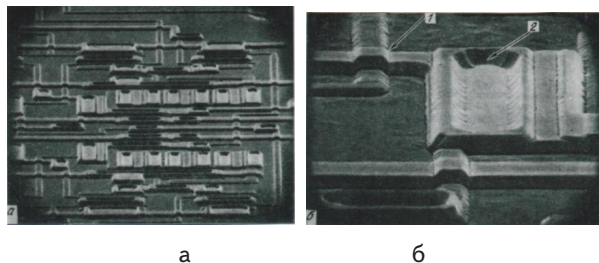


Рис. 1. Мікроструктури ВІС на GaAs: а - травлення через фотомаску, б - профілювання контактних вікон

Сама можливість такого відтворення розмірів процесом ІПТ особливо важлива, коли необхідно забезпечити таке ж за глибиною травлення на підкладках великого діаметру ( $> 150$  мм), наприклад при суміщеній кремнієвій та арсенідгалієвій технологіях, фрагмент формування найтоншого вікна в якій подано на рис. 2.

Збільшення діаметра підкладки до 250-300 мм вимагає створення сучасних кластерних установок для локального іонно-променевого травлення індивідуальної обробки кремній-арсенід-галієвих підкладок. Установа такого типу дозволяє проводити як групову так і індивідуальну витравку пластин заміною тримача підкладок.

Підкладка переміщується по замкненому треку, обертаючись навколо своєї осі, під іонним пучком діаметром 200 мм. Кут падіння пучка регулюється в діапазоні  $0-65^\circ$ . Тут застосований електростатичний прижим підкладки і виключає застосування індю. На даній установці можна теж виконувати і іонно-променеве травлення [2].

Тепер зупинемось на особливостях локалізації арсенід-галієвих структур, основне призначення якої сформувати омичні контакти з низьким опором ( $< 10^{-6}$  Ом/см<sup>2</sup>), їх отримують шляхом збільшення рівня легування поблизу межі розділу метал-напівпровідник до такої степені, щоб збіднений шар, зв'язаний з бар'єром Шотткі став дуже тонким, та забезпечував протікання тунельного струму в режимі польової емсії.

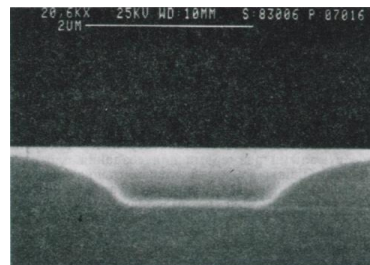


Рис. 2. Фрагмент профілювання штатного вікна через маску фоторезиста

Зонна діаграма об'єкта метал - n<sup>+</sup>GaAs - nGaAs, що підкреслює роль n<sup>+</sup> шару подана на рис. 3.

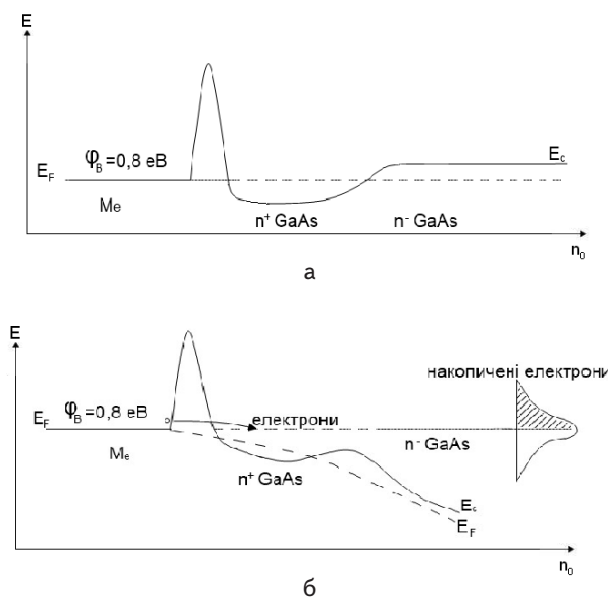


Рис. 3. Зонна діаграма залежності енергії електронів E від концентрації легованої домішки n<sub>0</sub> в активному шарі омичного контакту метал - n<sup>+</sup>-GaAs-nGaAs з бар'єром Шотткі, а - без зміщення б - із зміщенням

Із теорії n<sup>+</sup> - n- переходу можна визначити мінімальний контактний опір

$$r_{\text{конт}} = \left( \frac{2\pi m RT}{q^2 n_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{1}$$

де m - ефективна маса, а n<sub>0</sub> - концентрація легованої домішки в активному шарі.

Для GaAs при n=0.067 мс отримаємо:

$$(r_{\text{конт}})_{\text{min}} = 1.55 \cdot 10^{-5} \left( \frac{r}{300} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{10^5}{n_0} \text{ [Ом} \cdot \text{см}^2 \text{]}. \tag{2}$$

Як бачимо, у субмікронних арсенід-галієвих структурах контакти одночасно повинні бути сплавними, імплантаційними, тунельними та гетероперехідними, що є досить складною технологічною процедурою [3]. Загальноприйнятим є використання сплавних омичних контактів, що дозволило створити високоомний шар поблизу поверхні напівпровідника. Але як показа-

ли дослідження, неоднорідність струму через сплавний контакт не дозволяє досягнути в цьому випадку теоретичного значення контактної опору. Як видно із рис. 4, після травлення контактний метал на поверхні GaAs зосереджена нерегулярна острівкова структура [3]. Для створення омичних контактів використовується також іонна багатозарядна імплантація, що дозволяє формувати високолеговані шари поблизу поверхні напівпровідника. Тут концентрація лежучої домішки обмежується розчинністю домішки і може досягти значення  $< 10^{19} \text{ см}^{-3}$  для n-GaAs і  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  для p-GaAs. Саме багатозарядна іонна імплантація дозволяє отримати поблизу поверхні напівпровідника концентрації, які перевищують межу розчинності [4].

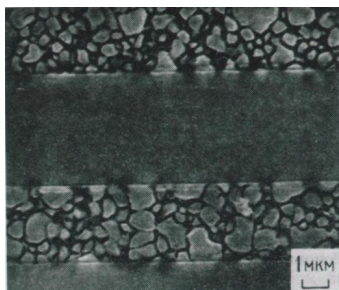


Рис. 4. Нерегулярна острівна структура GaAs після травлення металу в іонному пучку, що містить хлор

Також існує ще один метод формування омичного контакту – епітаксійне нарощування шарів між активним шаром і металевим контактом. Багатообіцяючим варіантом цього методу є вирощування гетероконтакту. Основна ідея цього методу полягає у зменшенні висоти бар'єру і, відповідно, контактної опору за допомогою введення проміжного напівпровідникового (буферного) шару між металом і активним шаром приладу [5]. Експериментально встановлено, що висота бар'єру Шоттки складає 2/3 ширини забороненої зони. Для формування гетероконтактів найбільш підходить шар  $n^+-\text{Ge}$ , який завдяки близькості постійної ґратки можна вирощувати на  $n^+-\text{GaAs}$  використовуючи різні методи епітаксійного нарощування: газову, молекулярно-променеву, НВЧ-епітаксію в реакторах ЕЦР. Висота бар'єру Шоттки для Ge складає всього 0.5 В (а для GaAs - 0.7 - 0.8 eV). Крім того, в епішарі германію можна отримати дуже високий рівень легування (до  $10^{20} \text{ см}^{-3}$ ). Для арсенід-галію легуваного епішарами германію до  $1.5 \cdot 10^{18}$  та  $1 \cdot 10^{17}$  було отримано величину контактної опору  $5 \cdot 10^{-8}$  та  $1.7 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  відповідно [6].

Найбільш технологічним методом формування омичного сплавного контакту є напilenня евентичного сплаву Au-Ge (Ge-12%) з наступним впалюванням його при температурі евтектики. Відповідно формування розводки здійснюється методом іонно-променевого травлення, розглянутого в попередньому розділі статті. Цей метод застосовується доволно широко, а для формування омичних сплавних контактів використовують сплави AgInGe, AuGe, AgAu, In-AuGe, AuGe-Pt. Тут для арсеніду галію атоми германію у підградці галію відіграють роль донорів, які і зменшують активний опір.

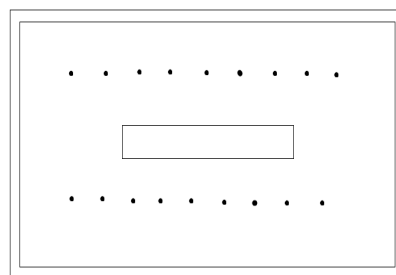
Високо технологічною є система AuGe в комбінації з поверхневим шаром із нікелю, який служить для запобігання каплеутворення в процесі впалювання. Опро-

мінення таких контактів двозарядними іонами кремнію ( $\text{Si}^{++}$ ) з дозою на рівні  $10^{16} \text{ см}^{-2}$  приводить до зниження температури евтектики до  $400^\circ\text{C}$  і величини опору до величини  $6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ . Тобто комбінація методів напilenня іонно-променевого травлення та багатозарядної імплантації дозволяє знижувати контактний опір до  $n^+-\text{GaAs}$  до величини  $1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$  [7].

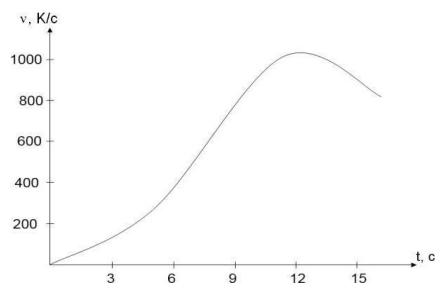
Застосування імпульсної фотонної обробки контактів до GaAs дозволило використати не тільки традиційно використовуваний сплав AuGe, але й інші матеріали. Зокрема омичні контакти з малим опором ( $< 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ) були отримані електронно-променевою обробкою структур Al/GaAs. Дуже перспективною в цьому напрямку є фотонна обробка сформованих контактних структур.

Такий фотонний (імпульсний) відпал (впалювання) використовується на установці "Імпульс 3", яка має два ряди галогенних ламп КГ-220-1000, розміщених симетрично по обидві сторони від джерел (рис. 5, а).

Відпал виконується в нейтральному середовищі - аргоні з контролем температурного режиму за допомогою фотоанода. Потужність, що підводилась до ламп плавно регулювалась шляхом зміни тривалості підключеного стану галогенних ламп до живлення. Загальна тривалість світлового опромінення змінювалась від 50 мс до 15 с шляхом набору певної кількості імпульсів, а густина енергії змінювалась від  $10^2$  до  $4 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{см}^2$  або від 40 до 2000  $\text{Вт} / \text{см}^2$  [8]. Це зумовлювало швидкості нагріву  $\nu$  від  $10^2$  до  $10^4 \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$  при двосторонньому опроміненні (рис. 5, б).



а



б

Рис. 5. Температурно-газова залежність нагріву на фотонній установці "Імпульс 3", а - розміщення лампи; б - залежність швидкості  $\nu$  нагріву підкладки від часу t

### 3. Багатозарядна імплантація

Тепер знову повернемося до іонно-променевої обробки, зокрема багатозарядної імплантації, яку ви-

конують для забезпечення якісних контактів, особливо це є важливим для арсенід-галієвої технології. Традиційний спосіб відновлення та активації впроваджені домішки після іонної імплантації, яка прийшла на зміну дифузійним процесам- стаціонарний термічний відпал (СТВ) - має ряд недоліків, таких як неповне видавлення кристалічної ґратки, температурне розлиття концентраційних профілів, зміна зарядового стану межі напівпровідник-ізолятор, а значить порогових напруг [9]. У зв'язку з цим, тепер ведуться інтенсивні дослідження по розробці нових способів відпалу імплантованих шарів напівпровідника, які б не мали недоліків СТВ. До таких відпалів відноситься і розглянутий нами імпульсний фотонний відпал за допомогою галогенних ламп. Секундний іонно-променевий відпал (ІПВ) при дії інтенсивних іонних пучків на обернену сторону імплантованих напівпровідникових пластин також є ще одним із видів швидкого низько-температурного відпалу-активації [10].

Для експериментального дослідження було вибрано іонне джерело «Радикал», яке формує іонні пучки потужністю від 5 до 15 Вт/см<sup>2</sup> і масі відпалювальних іонів 20-60 а.о.м. Рекристалізація аморфного шару при заданій потужності іонного аргонного пучка проходить в інтервалі 7-15 с опромінення з тильної сторони підкладок, що вказує на зміну температури поверхні підкладки (миттєве значення) від 530<sup>0</sup> до 650<sup>0</sup>С, що дозволяє прийняти його відповідно по чисто термічному механізму (рис. 6).

Результати електрофізичних досліджень показали високу ефективність післяімплантаційного відпалу іонним пучком і за своїми характеристиками зміни концентраційних профілів значно перевищує термічний. Це особливо є актуальним для відпалу арсенід-галієвих підкладок, бо забезпечує високу стабільність зарядового стану межі напівпровідник-діелектрик при багатозарядній імплантації германію в контактні вікна.

Дана технологія дозволяє понизити величину контактного імплантованого опору для GaAs до величини  $< (1-5) \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ .

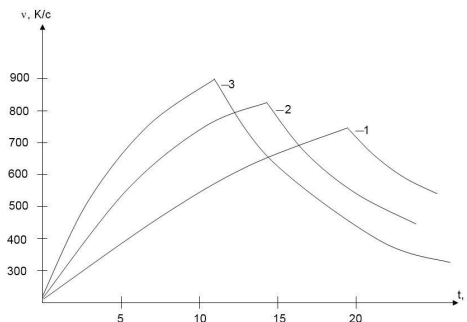


Рис. 6. Залежність швидкості нагріву  $v$  Si-підкладки імплантованої фосфором ( $P^{++}$ ) товщиною 400 мкм ( $\phi 150$  мм) при дії іонних пучків з густиною потужності 5 (1), 10 (2) і 15 (3) Вт/см<sup>2</sup> від часу  $t$

#### 4. Висновки

1. Іонно-променеве фрезерування є особливо ефективним для профілювання контактних вікон багаторівневої розводки структур ВІС.

2. Для суб- і наноелектронної технології арсенід-галієвих структур доцільно розробити кластерне обладнання іонно-променевої обробки, яке б включало позиції осадження шарів, їх травлення та післяімплантаційного відпалу.

3. Іонно-променева обробка секундної тривалості може бути з успіхом використана замість термічного відпалу при формуванні тонких імплантованих шарів в арсеніді галію для їх активації.

#### Література

- Новосядлий, С. П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий // Івано-Франківськ, Місто НВ. – 2010. - 254с.
- Шур, М. Современные приборы на арсениде галлия [Текст]/ М. Шур. – М.: Мир. - 1991.- 628 с.
- Афанасьев, В. А. Оборудование для импульсной термообработки ПД нейтронная техника Сер 1 [Текст] / В. А. Афанасьев, М. П. Духновский. Т. А. Крысев Электроника СВЧ. - 1984. - Вып. 12. - С. 24-29.
- Новосядлий, С. П. Технологічні особливості, формування шаруватих наноструктур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2008, № 44. – С. 32 - 38.
- Новосядлий, С. П. Джерела іонів для формування шаруватих структур [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Бережанський // Прикарпатський вісник НТШ. – 2008 – № 1. – С. 151– 158.
- Ди Лоренцо, Д. В. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления БИС [Текст] : пособие / Под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. Пер. с англ. – М: Радио и связь. - 1988. - 49с.
- Новосядлий, С. П. Моделирование субмікронної та нанотехнологій на основі ТС [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Вівчарук, С. М. Вергепний // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2009. – № 117 С. –26-29.
- Новосядлий, С. П. Багатозарядна радикальна імплантація при формуванні SOI- структур [Текст] / С. П. Новосядлий В. М. Вівчарук // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т9, № 3. - С. 659-667.
- Новосядлий, С. П. Багатозарядна іонно-імплантаційна обробка при формуванні кишень і металізації субмікронних структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий, В. М. Бережанський // Металофізика і новітні технології. – 2007. - т. 29, №7. - С. 857-866.
- Авас, Н. А. Основы микроэлектроники [Текст] : учеб. / Н. А. Авас, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. –М: Радио и связь. – 1999. - С. 64-67.