

13. Kutuzov, S. V. Making the Heat-Insulating Charge of Acheson Graphitization Furnaces More Efficient [Text] / S. V. Kutuzov, V. V. Buryak, V. V. Derkach, E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, G. N. Vasil'chenko, S. V. Leleka, T. V. Chirka, T. V. Lazarev // Refractories and Industrial Ceramics. – 2014. – Vol. 55, Issue 1. – P. 15–16.
14. Панов, Е. Н. Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов [Текст] / Е. Н. Панов, С. В. Лелека, М. В. Коржик // ПиКАД. – 2005. – № 2. – С. 28–30.

**Розроблена технологія виготовлення іонно-легованих структур GaAs. Імплантація іонів кремнію, берилію, цинку проводилась в підкладку із напівізолюючого арсеніду галію марки АГЧП-2а. Імплантація домішки через капсулююче покриття дозволило отримати досить високі значення рухливості носіїв струму в каналах польового транзистора Шотткі (ПТШ), що дозволяє формувати на них КМОН-структури. Застосування багатозарядної імплантації та імпульсного фотонного відпалу для активації  $p^+$ -областей витоку і стоку забезпечило рівень ретроградного легування стік-витоків контактів на рівні  $(2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$**

**Ключові слова:** багатозарядна іонна імплантація, арсенід галію, КМОН технологія, транзистор Шотткі,  $p^+$ - $n$  перехід, варизонний сонячний елемент

**Разработана технология изготовления ионно-легированных структур GaAs. Имплантация ионов кремния, бериллия, цинка проводилась в подложку с полупроводящего арсенида галлия марки АГЧП-2а. Имплантация примеси через капсулирующее покрытие позволило получить достаточно высокие значения подвижности носителей тока в каналах полевого транзистора Шотткі (ПТШ), что позволяет формировать на них КМОП-структуры. Применение многозарядной имплантации и импульсного фотонного отжига для активации  $p^+$ -области истока и стока обеспечило уровень ретроградного легирования сток-истоковых контактов на уровне  $(2-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$**

**Ключевые слова:** многозарядная ионная имплантация, арсенид галлия, КМОП технология, транзистор Шотткі,  $p^+$ - $n$  переход, варизонный солнечный элемент

УДК 537.5

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.54233

## РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ БАГАТОЗАРЯДНОЇ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ GAAS ДЛЯ СУБМІКРОННИХ СТРУКТУР ВЕЛИКИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

**С. П. Новосядлий**  
Доктор технічних наук, професор\*  
E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

**С. І. Бойко**  
Аспірант\*  
E-mail: sergiy1300@gmail.com

**Л. В. Мельник**  
Аспірант\*  
E-mail: lj-3d@rambler.ru

**С. В. Новосядлий\***  
E-mail: nsp@mail.pu.if.ua

\*Кафедра комп'ютерної інженерії і електроніки  
Прикарпатський національний  
університет ім. В. Стефаника  
вул. Шевченка, 57,  
м. Івано-Франківськ, Україна, 76025

### 1. Вступ

Постійно зростаючі вимоги до комп'ютерів та іншої споживчої електроніки роблять необхідним підвищення швидкодії структур великих інтегральних схем. Одним з шляхів досягнення цього є використання арсеніду галію, оскільки він володіє рядом переваг над кремнієм, які дозволяють формувати структури з високою швидкістю та надійністю. Також він являється прямим напівпровідником, що дозволяє ефективно поглинати та виділяти світло. У зв'язку з цим викликає необхідність розробки технології виготовлення іонно-легованих структур GaAs, що включає в себе виготовлення  $p^+$ - $i$ - $n^+$ -шарів,  $p^+$ - $n$ -шарів та  $p^+$ - $n$ - $i$ -структур.

### 2. Огляд літературних джерел та постановка проблеми

Високоенергетична багатозарядна імплантація є необхідним інструментом для формування структур швидкісних ВІС/НВІС на GaAs, оскільки він володіє фізичними властивостями, які дроблять його більш швидкодіючим та енергоефективним ніж кремній [11]. В літературі багато відомостей про технології формування методом іонного легування шарів  $n$ -типу в напівізолюючому арсеніді галію і, зокрема, досліджені електричні властивості шарів і транзисторних структур в залежності від вибору вихідного напівізолюючого матеріалу, дози, енергії та виду імпантованих іонів, від умов термічного відпалу [12–14]. Вже відомі дослідження електричних властивостей шарів  $p$ -типу, сформова-

них імплантацією іонів акцепторних домішок (цинку, кадмію, магнію і берилію) в напівізолюючий арсенід галію [15, 16]. А властивості  $p^+ - n$ -переходів в залежності від умов імплантації (кратності заряду іонів) і відпалу, зокрема, фотонного є менш вивченими [1].

Виготовлення схем підвищеної ступені інтеграції вимагає розробки процесів іонного легування з високими енергіями, таких як:

- легування малими дозами іонів бора з енергією  $E=150-210$  кеВ та іонів фосфора з  $E=250-300$  кеВ для запобігання явища змикання коротко-каналних Si-транзисторів, яке називають глибокою підгонкою;

- легування малими дозами іонів бора з енергією  $E=300-600$  кеВ для формування областей кишень і охоронних областей після напилення польового окисла;

- легування великими дозами іонів з енергією  $E=150-250$  кеВ для формування ретроградних стік-витокових областей [2].

Проте більшість імплантаторів забезпечують максимальну енергію іонів до 180–200 кеВ. Використання багатозарядних іонів, що набирають енергію в  $n$ -раз більшу ( $n$  – кратність іонізації) в порівнянні з однозарядними, дозволяє розробити оригінальні процеси імплантації із підвищеними енергіями на сучасних імплантаторах [3].

Для отримання бажаної продуктивності при індивідуальній обробці як Si, та і GaAs-структур імплантацію багатозарядних іонів доцільно проводити на сильно струмових установках, при цьому можливе деяке забруднення пучка іонів з більш низькими енергіями за рахунок перезарядження частинок в іонному тракті імплантатора.

Даний ефект залежить від умов проведення процесу, конкретної конструкції імплантатора і суттєво обмежує можливість даного методу в субмікронній технології [4].

Основна перевага використання іонної імплантації GaAs – оптимізація профілю легування для активної дії на параметри польових транзисторів Шоттки, які є основою швидкодіючих арсенід-галієвих КМОН-схем [5]. Однією із головних характеристик ПТШ, що визначає його підсилювальні властивості, є звичайно крутизна ВАХ, підвищення (зростання) якої досягається за рахунок як самосуміщеної технології формування структур, так і оптимізації концентраційного профілю легування каналу [6].

### 3. Мета та завдання роботи

Метою даної роботи була розробка технології багатозарядної іонної імплантації GaAs, яка необхідна для створення високошвидкісних структур ВІС.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- дослідити особливості формування іонно-імплантованих  $p^+ - i - n^+$ -шарів в арсеніді галію високоенергетичною багатозарядною імплантацією;

- дослідити використання багатозарядної імплантації арсеніду галію для формування КМОН структур високої швидкодії;

- дослідити багатозарядну імплантацію іонів  $H_2^{++}$ ,  $V_{11}^{++}$ ,  $O_{16}^{++}$  для формування локальних ізольованих шарів в  $p^+ - n - i$ -структурах на GaAs;

- дослідити формування іонно-імплантованих  $p^+ - n$ -шарів в GaAs з використанням двозарядних іонів  $Zn^{++}$ ,  $Be^{++}$  і  $Mg^{++}$  та визначені області їх застосування.

### 4. Особливості багатозарядної імплантації кремнію в GaAs для формування $p^+ - n - i$ -структур (ПТШ)

В даній статті подані результати розробки технології багатозарядної іонної імплантації (дво, три, чотиризарядної) GaAs для виготовлення транзисторних структур з бар'єром Шоттки високої питомої крутизни для швидкодіючих структур ВІС. Багатозарядна імплантація виконувалась на установці-імплантаторі «Везувій 5» через капсулююче покриття  $SiO_2$  товщиною маски 0,05 мкм іонами кремнію. В ролі підкладки використовувався арсенід галію марки АГЧП-2а, що відзначається високою термостабільністю в умовах фотонної активації імплантованих домішок. В ролі чистої сполуки для отримання іонів в розрядній камері використовувався тетрахлорид кремнію ( $SiCl_4$ ) кваліфікації ОСЧ.

Для збільшення енергії імплантація виконувалась 4-зарядженими іонами кремнію ( $Si^{++++}$ ). Для активації домішки застосовувався як традиційний відпал під капсулюючим покриттям  $SiO_2$  у відкритій кварцовій трубці в газовому потоці азоту ( $N_2$ ), так і короткочасним імпульсним фотонним відпалом галогенними лампами. Температура відпалу в печі складала 820 °С тривалістю 30 хв. Імпульсний фотонний відпал виконувався на установі «Імпульс-3», що мала два ряди галогенних ламп КТ-220-1010 розміщених симетрично з обох сторін від підкладки. Пластина GaAs, яка відпалювалась, розміщувалась на кремнієву пластину-п'єдестал діаметром 76 мм і товщиною 0,8–1,0 мм, планарною стороною вниз, для зменшення втрат миш'яку та термомеханічних напружень. Зверху з тією ж метою розміщувалась друга кремнієва пластина-екран. Відпал виконується в нейтральному середовищі, контроль температурного режиму здійснювався за допомогою фотодіода. Технологічний режим обробки пластин задавався опорною напругою. На рис. 1, а, б приведена температурно-часова залежність нагріву пластин на установці «Імпульс-3».

Контроль іонно-імплантованих структур виконувався методом вимірювання вольт-фарадних характеристик ртутного бар'єра Шоттки за допомогою електролітичного профілометра (ртутного чи індієвого зонда), а також вимірюванням рухливості на основі ТС-холлотронів. Відтворюваність технології формування шарів оцінювалась за результатами вимірювання струму насичення тестових польових транзисторів (ТПТ) до формування затвора і опору тестових резисторів (ТР) згідно технологічного маршруту формування структури ВІС.

Розробка технології багатозарядної іонної імплантації проводилась для двох основних конструкцій ПТШ: з використанням активної структури  $p^+ - n - i$  типу та з використанням локальної області  $p^+$ -типу, самосуміщеною із затвором нітриду вольфраму (WN).

До форми концентраційного профілю типу  $p^+ - n - i$  висувались такі вимоги:

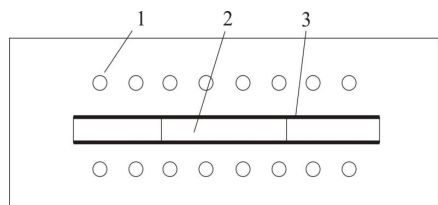
- він повинен мати достатні для формування якісних омичних контактів (ретроградних) рівень легування  $>10^{18}$  см<sup>-3</sup> і товщину контактного шару  $>0,15$  мкм;

- спадаючий фронт  $p^+ - n$ -області, що є робочою областю каналу ПТШ, повинен бути досить крутим для того, щоб забезпечити високу крутизну ВАХ ПТШ, і достатньо пологим, щоб здійснювати підгонку каналу з необхідною точністю  $\pm 3\%$ .

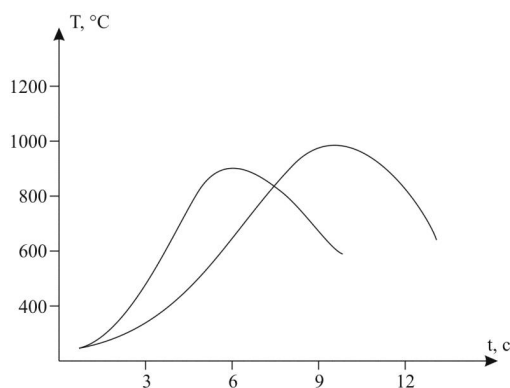
Найбільш повно ці вимоги задовольняються саме шляхом багатостадійної багатозарядної імплантації

Таблиця 1

через капсулююче низькотемпературне покриття SiO<sub>2</sub>. Такий захисний шар дозволяє знизити: рівень радіаційних дефектів на поверхні, можливість забруднення при імплантації і в процесі наступних обробок, збіднення носіями на поверхні напівпровідника [7].



а



б

Рис. 1. Структура установки «Імпульс-3» та температурно-часові залежності нагріву підкладки: а – структура нагрівача на основі лампи КТ-220-1000 (1 – лампи КТ-220-1000, 2 – пластина GaAs розміщена на кремнієвому п'єдесталі, 3 – кремнієва пластина-екран); б – температурно-часові залежності для різних режимів фотонного відпалу

Проведений комп'ютерний розрахунок концентраційного профілю носіїв в GaAs для іонів кремнію (Si<sup>++</sup>, Si<sup>++++</sup>), що поданий на рис. 2, імплантованих в таких режимах:

1. E=4x80=320 кеВ при D=0,4 мкКл/см<sup>2</sup> для Si<sup>++++</sup>.
2. E=4x40=160 кеВ при D=7,5 мкКл/см<sup>2</sup>.

Експериментальні результати по формуванню p<sup>+</sup>-n-і-структури (табл. 1) показують, що спостерігається більш високий коефіцієнт активації домішки і менший питомий опір шару. Використання фотонного відпалу дозволило отримати зменшений розкид електрофізичних параметрів: рухливості з 400 до 300 см<sup>2</sup>/В·с, а питомого опору з 60 до 30 Ом/квадрат.

Експериментально також досліджувався розподіл струму насичення ПТШ до травлення каналу і опір тестового резистора. Досліджувався також традиційний відпал в печі, що входить в базовий технологічний маршрут ПТШ.

Середній струм насичення транзистора з шириною каналу W=75 мкм для партії пластин в 20 шт складав 50,4 мА. Середнє квадратичне відхилення складає <10 % і включає розкид електрофізичних параметрів вихідної активної структури, якість омичного контакту та ухил параметрів шару в результаті різних обробок на маршруті формування ПТШ. Середня величина опору резистора (R), що мав розміри 10x18 мкм складав 1055 Ом, σ(R)=102 Ом (9,6 %).

Результати активації домішки

№ п/п	Спосіб активації	Максимальна концентрація домішки (см <sup>-3</sup> )	Глибина шару на рівні 5·10 <sup>16</sup> см <sup>-3</sup> , мкм	Рухливість см <sup>2</sup> /В·с	Питомий поверхневий опір Ом/квадрат
1	Термічний відпал в печі	(0,7–1,0)·10 <sup>18</sup>	0,28	2800–3200	360–420
2	Фотонний відпал на установці «Імпульс-3»	(2–5)·10 <sup>18</sup>	0,27	2300–2600	130–170

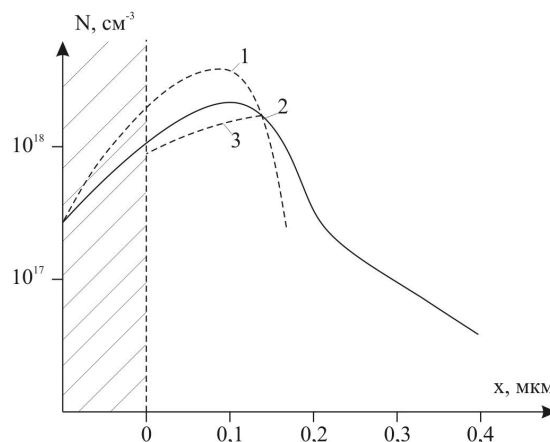


Рис. 2. Концентраційні профілі іонів Si<sup>++++</sup>: 1 – розрахунковий комп'ютерний без відпалу; 2 – розрахунковий комп'ютерний при T<sub>відп</sub>=825 °C; 3 – експериментальний

Висока відтворюваність параметрів тестових елементів дозволяє провести якісну підгонку каналу X для забезпечення напруги відсічки в межах (-1,5 ÷ -3,5 В). Величина пробивної напруги затвор-стік складала 25–35 В і визначається глибиною травлення захованого затвору. Середнє значення питомої крутизни ВАХ ПТШ, сформованих на іонно-легованих p<sup>+</sup>-n-і структурах складає 124±10 мА/В·мм для 130 взірців, а максимальна величина крутизни досягала 150 мА/В·мм. На епі-структурах GaAs отримані ПТШ по такому технологічному методу з крутизною S≤110 мА/В·мм.

Подальше збільшення крутизни ПТШ на іонно-легованих багатозарядною імплантацією кремнію досягається шляхом застосування локальної p<sup>+</sup>-імплантації, самосуміщеною з положенням затвора, що дозволяє проводити вже незалежну оптимізацію p<sup>+</sup>-стік-витоків контактів і n-каналів.

Контактні стік-витоків p<sup>+</sup> області повинні мати мінімальний опір шару, який досягається вже багатократною іонною імплантацією іонів Si<sup>++</sup> із змінними параметрами:

1. E=2x90=180 мВ, D=13 мкКл/см<sup>2</sup>.
2. E=2x60=120 мВ, D=3 мкКл/см<sup>2</sup>.
3. E=1x80=80 мВ, D=2,5 мкКл/см<sup>2</sup>.

Режим формування каналу повинен забезпечити напругу відсікання ПТШ без підгонки каналу в діапазоні (1÷3 В). Він може бути отриманий різним набором параметрів заряд-енергія-доза.

Для реалізації такого варіанту використався так званий комбінаційний спосіб відпаду: слабо легований n-шар калька відпалювався під капсулюючою плівкою SiO<sub>2</sub> в печі, а високолеговані p<sup>+</sup>-стік-витоківі (ретроградні) області контактів відпалювались фотонним відпадом (t=6–10 с).

Середнє значення рухливості носіїв заряду (струму) в каналі складає 3850 см<sup>2</sup>/В·с при середній концентрації носіїв (електронів) в n-шарі складає 2·10<sup>17</sup> см<sup>-3</sup>. Отриманий питомий опір стік-витоківих p<sup>+</sup>-областей складає 110±10 Ом/квадрат. При рівні легування (1–5)·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup>, що є достатнім для формування якісних ретроградних контактів на основі сплаву AuGe–12–Au з питомим контактним опором ρ<sub>к</sub>=(1–2)·10<sup>-6</sup> Ом·см<sup>2</sup>.

Зв'язок напруги відсічки ПТШ від дози легування каналу n-типу подано на рис. 3.

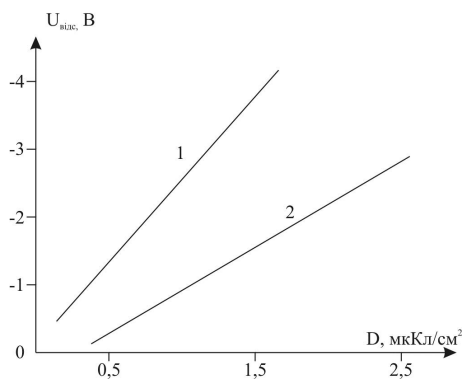


Рис. 3. Залежність напруги відсічки ПЕШ від дози двозарядної імплантації при легуванні n-каналу: 1 – E=2x160=320 кеВ; 2 – E=2x120=320 кеВ

Звідси можна зробити висновок: розроблена технологія багатозарядної імплантації кремнію при формуванні n і p<sup>+</sup>-областей для самосуміщених ПТШ дозволяє отримати питому крутизну ВАХ ПТШ на рівні 150–200 мА/В·мм, а це шлях до побудови КМОН-структур на GaAs з використанням збагачених і збіднених ПТШ для швидкісних структур ВІС і дозволяє формувати концентраційні профілі з високою точністю.

### 5. Високоенергетична багатозарядна імплантація при формуванні охоронних областей і кишень МОН-структур на Si та GaAs

Автори даної статті обґрунтували на основі проведених досліджень можливість багатозарядної імплантації при легуванні малими дозами іонів фосфору, бору і миш'яку для Si-структур на установці «Лада-30».

Відомо, що іонний пучок, що витягнутий із джерела іонів, представляє собою із різної кількості молекул та ізоотопів легуючого матеріалу. Наприклад, газ BF<sub>3</sub> розпадається на іони B<sup>+</sup>, B<sup>2+</sup>, BF<sup>+</sup>, BF<sub>3</sub><sup>++</sup> та ізоотопи <sup>10</sup>B<sup>+</sup>, <sup>11</sup>B<sup>+</sup>. В пучку є присутня деяка кількість іонів, які утворюються від іонізації залишкових газів. Відхилення частинок в магнітному аналізаторі здійснюється за формулою:

$$R = \frac{143,95}{H} \sqrt{\frac{MU}{n}}, \quad (1)$$

де R – траєкторія іона, см, H – напруженість магнітного поля, Тс, U – витягуюча напруга, В, M – маса іона, відн. од., n – кратність заряду іона.

Для контролю якості мас-сепарації та ідентифікації іонів знімалися мас-спектри для певних легуючих сполук. Двозарядні іони з'являються в положенні, які відповідають половині їх маси, а молекули – при подвоєній масі відповідного іона. Наприклад, для отримання іонів фосфору нами використовувались дві легуючі речовини: червоний фосфор і газоподібний п'ятифторидний фосфор PF<sub>5</sub> (рис. 4). Порівняння спектрів показало, що використання в якості легуючого елемента твердої речовини – червоного фосфору – дозволяє отримувати набагато більш чисті сполуки, тобто в пучку є присутні іони тільки легуючого елемента. При використанні в ролі легуючої сполуки газу PF<sub>5</sub> в спектрі є присутня велика кількість домішок, крім фосфору і фтору або їх сполук, які досить важко ідентифікувати. А для отримання іонів бору (B<sup>++</sup>) використовується газ BF<sub>3</sub> (рис. 4).

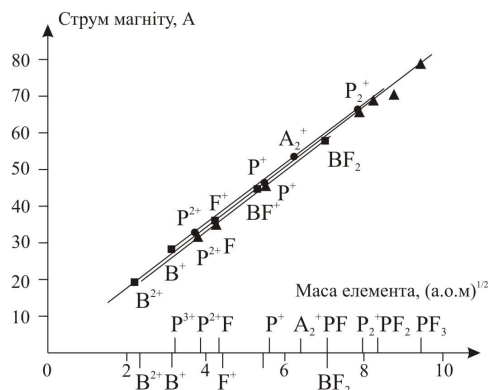


Рис. 4. Спектр іонів за масою при використанні червоного фосфору (●), п'ятифторидного фосфору (▲), трифтористого бору (■) при U<sub>вит</sub>=30 кеВ

Після імплантації та імпульсного фотонного відпаду вимірювались профілі розділу імплантованої домішки за допомогою імпульсних CV-характеристик оберненозміщеного діода Шотткі як тестового елемента. В ролі вихідних пластик кремнію використовували підкладки КЕФ 4,5 (100) для іонів фосфору, миш'яку і КДБ-10 (100) – для іонів бору.

При отриманні багатозарядних іонів використовувались такі співвідношення:

- енергія імплантації багатозарядним іоном E=(U<sub>вит</sub>+U<sub>приск</sub>)·n, де U<sub>вит</sub> – витягуюча напруга джерела, U<sub>приск</sub> – прискорююча напруга, n – кратність заряду іона;
- доза на задатчику D<sub>n</sub>=D·n, де D – необхідна доза легування, іон/см<sup>2</sup>, n – кратність заряду іона;
- струм мас-сепаратора при легуванні багатозарядними іонами I<sub>n</sub>=I<sub>1</sub>/n, де I<sub>1</sub> – струм сепаратора при легуванні однозарядними іонами, n – кратність заряду іона.

В процесі роботи з двозарядними іонами ми встановили, що для отримання пучків без перезарядки в іонному тракті дуже важливе значення мають умови якісної відкачки вакуумних об'ємів з використанням турбомолекулярних чи криогенних насосів.

Результати наших досліджень по легуванню двозарядними іонами P<sup>++</sup> і B<sup>++</sup> приведено на рис. 5. Умови відкачки в цих дослідах відповідають вимогам



ТУ: тиск в джерелі іонів – не гірше  $1 \cdot 10^{-3}$  Па, тиск в приймальній та прискорювальній камері –  $1 \cdot 10^{-4}$  Па. Застосування в дифузійних насосах вакуумного органічного масла ФШ-1 дозволило проводити відкачку із об'ємів до наступних значень тиску: тиск в іонному джерелі  $1 \cdot 10^{-4}$  Па, а тиск в приймальній та прискорювальній камерах –  $6 \cdot 10^{-5}$  Па.

Таким чином, технологія отримання дво- чи три зарядових іонів бору, фосфору і миш'яку дозволяє підвищити енергію імплантації відповідно в 2 і 3 рази, а дозу зменшити в стільки ж разів без конструкторської модернізації імплантаторів. А це суттєво понижує радіаційну дефективність.

Високоенергетична багатозарядна імплантація іонів бору може бути використана для створення  $p^+$ -охоронних областей через польовий оксид і для підгонки порогових напруг ключових транзисторів після формування затвора із полікремнію для кремнієвих структур ВІС. Відсутність тривалої термообробки при вирощуванні польового оксиду на ІЛ-шарах дозволяє підвищити відтворюваність параметрів  $p^+$ -шарів за рахунок зменшення сегрегації бору, а також зменшити так звану піддифузію домішки в стік-витоківих областях.

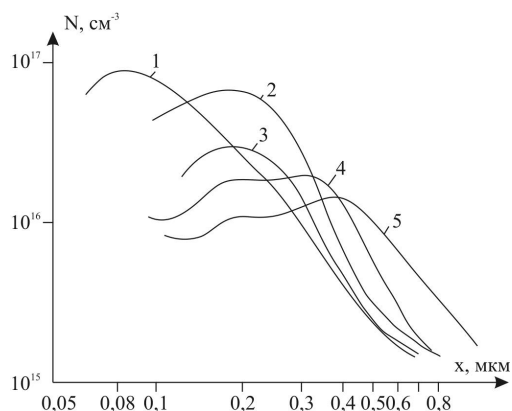


Рис. 5. Концентраційні профілі домішки  $P^{++}$  при різних режимах імплантації: 1 –  $P^{++}$   $E=160$  кеВ,  $D=0,2$  мкКл/см<sup>2</sup>,  $P_n=1 \cdot 10^{-2}$  Па; 2 –  $P^{++}$   $E=160$  кеВ,  $D=0,2$  мкКл/см<sup>2</sup>,  $P_n=1 \cdot 10^{-3}$  Па; 3 –  $P^{++}$   $E=160$  кеВ,  $D=0,1$  мкКл/см<sup>2</sup>,  $P_n=1,5 \cdot 10^{-3}$  Па; 4 –  $P^{++}$   $E=260$  кеВ,  $D=0,1$  мкКл/см<sup>2</sup>,  $P_n=6 \cdot 10^{-3}$  Па; 5 –  $P^{++}$   $E=300$  кеВ,  $D=0,1$  мкКл/см<sup>2</sup>,  $P_n=3 \cdot 10^{-3}$  Па

Таким чином, спосіб формування  $p^+$ -охоронних областей за рахунок багатозарядної імплантації іонів бору після формування польового оксиду дозволяє підвищити ступінь інтеграції ВІС, зменшити площу кристалу та підвищити вихід придатних.

Імплантація високоенергетичними (багатозарядними) іонами бору проводилась на імплантаторі «Везувій 9М». Тестові МОН-структури були виготовлені за типовим маршрутом К-МОН-схем (ВАТ «Родон») за виключенням процесів формування охоронних областей і підгонки порогових напруг ключових транзисторів (рис. 6). Електричні характеристики транзисторів визначались за допомогою характеристографа Л2-56 і цифрового вимірювача ЦУИП. На ключових і паразитних транзисторах вимірювали порогову напругу  $U_t$  і напругу плоских зон  $U_{ff}$  при напрузі стік-витік

$U_{c-b}=5$  В і зміщений на підкладку  $U_{bs}=-2,7$  В і  $U_{bc}=0$  В за рівнем струму стоку  $I_c=1, 5, 10$  мкА.

Вимірювались також значення струмів втрат  $p$ - $n$ -переходів ТС, що імітували різний тип  $p$ - $n$ -переходів, утворених на робочих схемах  $n^+$ -областями стоку-витоку з однієї сторони і  $p^+$ -охоронними областями з другої. Два види  $n$ -областей (прямокутна і гребінна) площею  $0,2$  мм<sup>2</sup> відрізнялись тільки довжиною  $p$ - $n$ -переходу. Із різниці струмів втрат на розвітленій та прямокутній структурах отримували величини струмів втрат, що характеризували як форму так і спосіб формування  $p^+$ -охоронних областей. Додатково на пластинах-супутниках (ТС) КДБ-10 (100) вивчали концентраційні профілі при імплантації іонів бору ( $B^{++}$ ) з енергіями в інтервалі  $2 \times 150=300$  та  $2 \times 250=500$  кеВ за допомогою профілометра на основі ртутного чи індієвого зонда. Після імплантації пластини-супутники відпалювали фотонним імпульсним віддалом протягом 10–15 с.

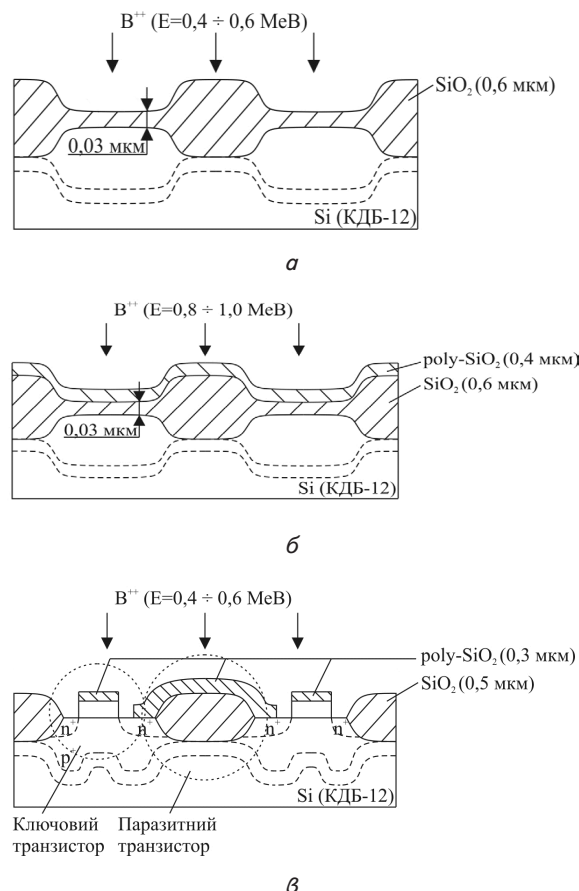


Рис. 6. Формування охоронних  $p^+$  областей за допомогою високоенергетичної багатозарядної імплантації: а – через польовий оксид (варіант 1); б – через шари полікремнію і польового оксиду (варіант 2); в – після формування полікремнієвого затвора (варіант 3)

Однією із важливих проблем, які виникають при масштабуванні структур кристалів ВІС/НВІС, що формуються як на монокремнії, так і на GaAs за К-МОН-технологією, є підвищення стійкості схем до тиристорного ефекту (затикання). А імовірність такого ефекту різко зростає при зменшенні відстані між  $n$  і  $p$  каналними транзисторами.

Як ми знаємо, для підвищення стійкості схем до тиристорного ефекту використовують дію іонізуючого опромінення ( $\alpha$  чи  $\beta$ ) так і легування золотом для зменшення часу життя неосновних носіїв заряду, охоронні кільця навколо приладних структур для зменшення коефіцієнта підсилення паразитного біполярного транзистора або епішар для пониження опору підкладки.

В звичайній традиційній К-МОН-технології розгонка кишені проводиться перед польовим оксидуванням. Для ВІС/НВІС із великою ступінню інтеграції даний метод є непридатним. Тривала термообробка до 4–6 годин при розгонці кишені викликала необхідність отримання глибини  $p-n$ -шару в 4–8 мкм.

При цьому поверхнева концентрація, опір і глибина  $p-n$ -переходу є тісно зв'язані між собою. Так, збільшення опору кишені без збільшення глибини викликає підвищення поверхневої концентрації і порогової напруги МОН-транзистора. Велика глибина кишені і, відповідно, велика величина бічної під дифузії домішки приводить до необхідності розміщення  $p$ - і  $n$ -канальних транзисторів на відстань  $X_{pn}=10-15$  мкм один від одного. Зі зменшенням глибин кишені і збільшенням її опору при постійній поверхневій концентрації різко зростає імовірність відмов схем через виникнення тиристорного ефекту.

В зв'язку з цим нами запропонований спосіб формування кишені невеликої глибини (ретроградної) з низьким опором за допомогою високоенергетичної багатозарядної імплантації (рис. 7).

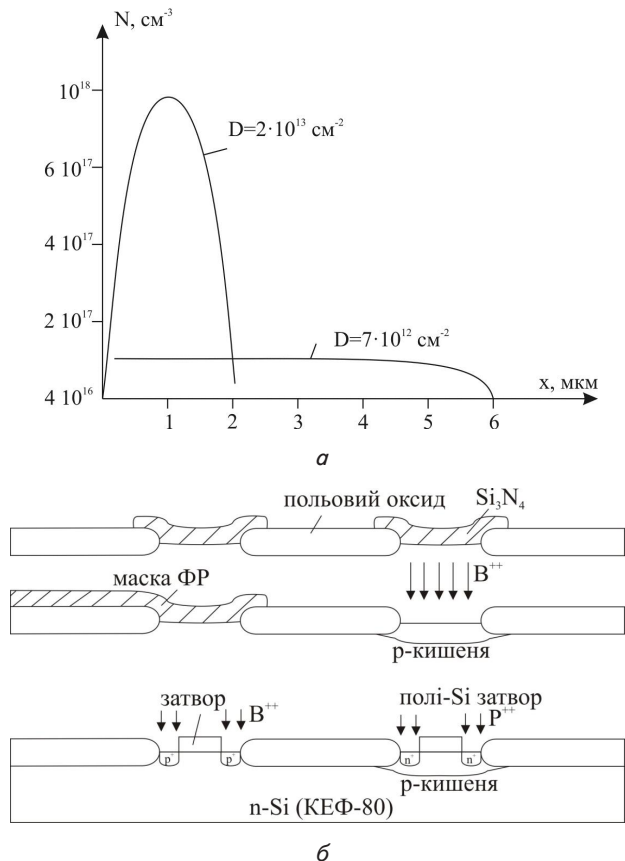


Рис. 7. Формування ретроградних кишень за допомогою іонної імплантації: а – концентраційні профілі для стандартної і ретроградної кишень  $p$ -типу; б – технологія формування КМОН структури з ретроградною кишенею та стік-витоківих областей МОН транзисторів

Переваги даної технології полягають в наступному:  
а) поверхнева концентрація, опір і глибина кишені є незалежними один від одного;

б) багатозарядна імплантація кишені проводиться після вирощування польового оксиду одночасно із формуванням  $p^+$ -охоронних областей;

в) високотемпературна розгонка та відпал виключаються. Це знижує число операцій до 10, а відстань  $X_{pn}$  зменшується до 5–6 мкм.

Всі ці технології можна повторити і для GaAs-структур, що відкриває великі можливості вже арсенідгалієвої К-МОН-технології для формування швидких ВІС та субмікронної топології.

### 6. Технологія формування іонно-імплантованих $p^+$ - $n$ -переходів на GaAs високоенергетичною багатозарядною імплантацією (ВБІ)

В даному розділі подано результати наших досліджень вольт-амперних та вольт-фарадних характеристик переходів, створених багатозарядною імплантацією цинку і берилію в арсенід галію  $n$ -типу.

В ролі вихідних для виготовлення  $p^+$ - $n$ -структур брались підкладки GaAs леговані телуrom і які мали концентрацію  $n$ -носіїв  $N=10^{17}$   $cm^{-3}$  з орієнтацією (111) або (100), вирощені методом Чохральського. Після хіміко-динамічного травлення товщина підкладок зменшувалась до  $250 \pm 10$  мкм. Перед термічним відпалом імплантовані пластини покривались з двох сторін діелектричними (капсулюючими) плівками  $SiO_2$  і  $Si_3N_4$  (сендвіч) в реакторі РПТ та ВЧ-магнетронним розпиленням Si-мішені в азотній плазмі товщиною 0,14–0,25 мкм. Термічний фотонний відпал проводився при  $T=820$  °C протягом 10 с в атмосфері осушеного аргону. Після зняття діелектрика, на нижню (тильну) сторону підкладок хімічно напилявся контакт Au–Ni, а на імплантовану  $n$ -сторону – Au-покриття із розчину золотохлористоводневої кислоти  $H(AuCl_4)$ . Температура впаювання контактів  $T=450$  °C в атмосфері азоту (аргону). Межа-травленням отримували  $p^+$ - $n$ -структури діаметром  $200 \pm 10$  мкм. Вольтамперні характеристики вимірювались по постійному струму на характерографі Л2-56, а вольт ємнісні – на частоті сигналу 465 кГц за допомогою вимірювача ємностей Л2-7.

Дослідження енергетичного положення і концентрації глибоких рівнів в збідженій області  $p^+$ - $n$ -переходу проводилось на обернено зміщених переходах методом нестационарної ємнісної спектроскопії (НЕСГР) в інституті мікроприладів (м. Київ). Структура іонно-легованого шару вивчалась на стоншених до 250 мкм підкладках GaAs за допомогою електронного мікроскопа EM-200.

Оцінка електричних властивостей імплантованих шарів виконувалась методом вимірювання рухливості на тестових структурах-холлотронах та методом електрофізичного діагностування на основі кремнієвої технології САПР.

Прямі ВАХ іонно-легованих структур достатньо добре описувались рівнянням  $I=I_0 \exp(eU/\beta kT)$  де  $\beta$  – фактор ідеальності  $p^+$ - $n$ -переходу.

На рис. 8, а, б подані ВАХ і CV-характеристики  $p^+$ - $n$ -структур, отриманих багатозарядною імплантацією цинку ( $Zn^{++}$ ). У структурах які відпалені фотонним відпалом при  $T=750$  °C під  $Si_3N_4$   $\beta=2,05$  для всього діапа-

зону прямих зміщень 0,2–1,0 В. Значення  $\beta$  вказує на те, що пряма ВАХ обумовлена рекомбінацією носіїв на глибоких центрах в шарі в області об'ємного просторового заряду.

Перехід при відпалі до SiO<sub>2</sub> і зниженню температури відпалу викликає збільшення діодного коефіцієнта  $\beta \geq 3$ . Аналогічна тенденція має місце і для р<sup>+</sup>–п-структур з імплантацією берилію Be<sup>++</sup>.

Вольтемнісні характеристики імплантованих меза-діодів (ТС) в області обернених зміщень описуються залежністю виду  $(1/C)j \approx (U_k - U_f)$ , де  $U_k$  – контактна різниця потенціалів,  $U_f$  – напруга плоских зон. На рис. 8, б в двійному логарифмічному масштабі подані CV-характеристики при імплантації Be<sup>++</sup>. Коефіцієнт  $j$  тут має значення 2,7 і 4,4 для температур відпалу 750 і 650 °С відповідно. Тобто р<sup>+</sup>–п-переходи при імплантації берилієм є майже плавними ( $j=3,0$ ) або надплавними ( $j \geq 3,0$ ) [8].

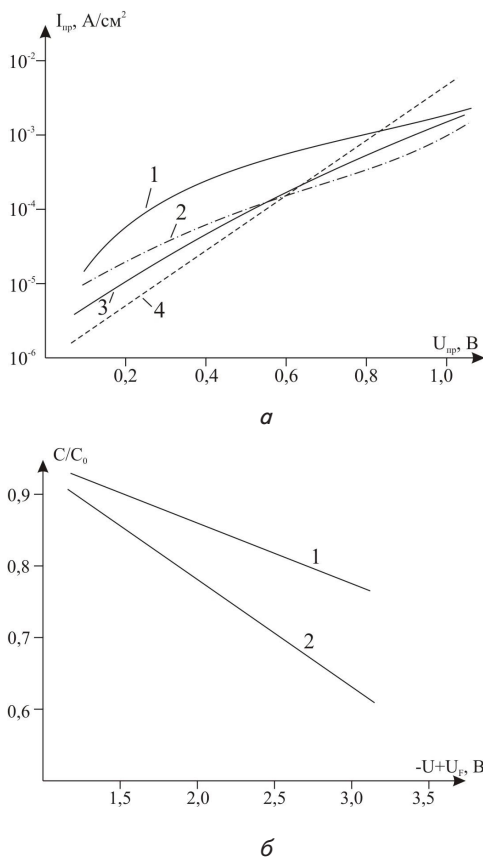


Рис. 8. ВАХ і CV-характеристики р<sup>+</sup>–п-структур, отриманих багатозарядною імплантацією цинку: а – прямі ВАХ структур р<sup>+</sup>–п, отриманих двозарядною імплантацією Zn<sup>++</sup> з енергією 60 кеВ і D=5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> при температурі відпалу 500 °С (1, 2) 750 °С (3, 4) під шаром SiO<sub>2</sub> (1, 3) і Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (2, 4); б – CV-характеристики структур р<sup>+</sup>–п-отриманих імплантацією Zn<sup>++</sup> з енергією 60 кеВ і D=5·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> покритого SiO<sub>2</sub> при температурі відпалу (фотонного) 600 °С (1) 750 °С (2)

Різкі р<sup>+</sup>–п-переходи ( $j=2,0$ ) отримуються при імплантації: Zn<sup>++</sup> з дозою D=5·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> при температурі фотонного відпалу T=750 °С (10 с). Зі збільшенням дози іонів та зменшенням температури відпалу значення  $j$  збільшується. Перехід від різкого переходить до

плавного. Додаткова імплантація іонів миш'яка (As<sup>++</sup>) майже не змінює CV-характеристик. Цільовим в цих дослідженнях представляють глибокі рівні, що визначені методом НЕСГР. В табл. 2 подані параметри (енергетичні рівні, січення захоплення  $\sigma$  і концентрація N<sub>i</sub>), глибоких рівнів при різних режимах іонної імплантації. Тут виявлено п'ять видів ГР. Очевидно, що всі вони зв'язані з присутніми радіаційними дефектами в області просторового заряду р<sup>+</sup>–п-структур, так як при T<sub>відп</sub> ≥ 750 °С (10 с) концентрація їх падає і зникає, що говорить про їх анігіляцію при відпалі. Із цих 5 видів ГР з літературних джерел можуть бути співвіднесені тільки 4 рівня.

Таблиця 2

Параметри глибоких рівнів в імплантованих р<sup>+</sup>–п переходах і фотонним відпалом T=550 °С (10 с)

Тип іона	D, см <sup>-2</sup>	E <sub>c</sub> -0,32 еВ		E <sub>c</sub> -0,38 еВ		E <sub>c</sub> -0,61 еВ		E <sub>c</sub> -0,80 еВ		E <sub>v</sub> + (0,07÷0,10) еВ	
		σ <sub>n</sub> , см <sup>2</sup>	N <sub>i</sub> , см <sup>-3</sup>	σ <sub>n</sub> , см <sup>2</sup>	N <sub>i</sub> , см <sup>-3</sup>	σ <sub>n</sub> , см <sup>2</sup>	N <sub>i</sub> , см <sup>-3</sup>	σ <sub>n</sub> , см <sup>2</sup>	N <sub>i</sub> , см <sup>-3</sup>	σ <sub>p</sub> , см <sup>2</sup>	N <sub>i</sub> , см <sup>-3</sup>
Zn <sup>++</sup>	5·10 <sup>14</sup>	–	–	присутні		–	–	–	–	–	–
Be <sup>++</sup>	5·10 <sup>15</sup>	–	–	6·10 <sup>-14</sup>	3·10 <sup>15</sup>	2·10 <sup>-13</sup>	6·10 <sup>15</sup>	–	–	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>15</sup>
As <sup>++</sup> Zn <sup>++</sup>	5·10 <sup>15</sup>	10 <sup>-15</sup>	2·10 <sup>14</sup>	–	–	–	–	2·10 <sup>-13</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>-16</sup>	10 <sup>15</sup>
As <sup>++</sup> Be <sup>++</sup>	5·10 <sup>15</sup>	10 <sup>-15</sup>	6·10 <sup>13</sup>	–	–	2·10 <sup>-14</sup>	10 <sup>14</sup>	присутні		–	–

Рівень E<sub>c</sub>–(0,78÷0,80) еВ має в літературі позначення EL2, для якого прийнято говорити що він зв'язаний з присутністю антиструктурного дефекта AsGa і даний дефект є стійким до відпалу при T ≤ 500 °С і його концентрація стає помітною при додатковому легуванні As\*, що вказує на його ідентифікацію як AsGa.

Рівні E<sub>c</sub>–(0,58÷0,61) еВ і E<sub>c</sub>–(0,37÷0,38) еВ – це, найбільш імовірно, є пастки електронів EL3 і EL5 відповідно, а діркова пастка E<sub>v</sub>+ (0,07÷0,10) еВ – це антиструктурний дефект GaAs. Електронну пастку E<sub>c</sub>–0,32 еВ називають ще А-дефектом, явно зв'язана з додатковим легуванням миш'яком. Отримані дані дозволяють зв'язати дефект EL5 з галієвими вакансіями (або їх комплексами) які є присутні в імплантованих цинком шарах і щезають при додатковій імплантації миш'яком As<sup>++</sup>, перетворюючись в антиструктурний дефект AsGa (пастка EL2).

Тут слід вважати, що імплантовані іонами акцепторних домішок області GaAs представляють після відпалу при T ≤ 500 °С структуру типу р<sup>+</sup>–і–п, про що говорять великі значення діодного коефіцієнта  $\beta$  і  $j$  та високі концентрації ГР. Зі збільшенням температури T > 500 °С радіаційні дефекти переміщуються, переходячи в неактивний стан [9].

Хороші характеристики р<sup>+</sup>–п-переходів отримуються при малих дозах імплантованих двозарядних іонів Zn<sup>++</sup> і Be<sup>++</sup> і T<sub>відпалу</sub> ≥ 750 °С. Тут важливим є також підбір капсулюючих шарів-масок до іонного легування, взамін SiO<sub>2</sub> та Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Позитивний ефект – це збільшення кратності заряду іона та імпульсного фотонного відпалу, що забезпечують анігіляцію даних дефектів і можливість формування КМОН структур ВІС на GaAs.

**7. Електрофізичні характеристики шарів р-типу в GaP і GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> сформованих двозарядною імплантацією В<sup>++</sup> і Mg<sup>++</sup> для варізонних ФЕП**

Для створення напівпровідникових приладів (фоточутливих приладних структур СЕ) на основі матеріалів А<sup>III</sup>В<sup>V</sup> методом багатозарядної імплантації необхідно знати, який вплив мають режими імплантації і після-імплантаційного фотонного відпалу на електрофізичні параметри і характеристики приладних структур. В даному підрозділі статті розглядаються електрофізичні властивості іонно-легованих шарів після фотонного відпалу під маскуючою плівкою діелектрика.

Вихідні дані підкладок представляли собою епітаксійні шари n-типу, леговані телуrom (Te) з концентрацією електронів 10<sup>16</sup>–10<sup>17</sup> см<sup>-3</sup> товщиною 10<sup>-16</sup> мкм, які вирощені на n<sup>+</sup>-GaAs або GaP-підкладці.

Для імплантації двозарядних іонів В<sup>++</sup> і Mg<sup>++</sup> використовували імплантант НВЕ-350 (НДІ мікроприладів, м. Київ), що дозволяв достатньо точно контролювати енергію та дозу легування.

Для запобігання випаровування легколетучих компонентів Ge, As, P при відпалі поверхню підкладок захищали капсулюючими діелектриками. Для цього використовувались піролітичні плівки (вирощені в реакторі РПТ) SiO<sub>2</sub>, плазмохімічні плівки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, магнетронні плівки Si<sub>x</sub>O<sub>y</sub>N<sub>z</sub> і AlN. Температура підкладки при формуванні діелектрика не перевищувала 300 °С.

Фотонний відпал проводили на установці «Імпульс-3» при температурі Т=750–850 °С протягом 8–12 с. Найкращими характеристиками по стійкості при термофотонній обробці володіли плівки нітриду алюмінію, сформовані магнетронним осадженням шляхом розпилення мішені АКГо-1-1. Після відпалу і зняття діелектричної плівки взірці розрізали і на них напиляли контакти InNiZn (Ni – 3 %, Zn – 1 %) через спеціальну маску електронним променем.

При легуванні використовувались двозарядні іони В<sup>++</sup> з енергією 2x40=80 кеВ і Mg<sup>++</sup> з енергією 2x60=120 кеВ з дозами 5·10<sup>13</sup>–5·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>.

Виявилось що для формування р-шарів в GaP необхідно імплантувати Mg<sup>++</sup> з дозами >10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>, а В<sup>++</sup> з дозами >5·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>. Використання менших доз не приводить до утворення р-шарів. В GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> при тих же режимах імплантації і відпалу провідність р-типу вже спостерігалась при дозі 5·10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup>, тобто ефективність багатозарядної імплантації при вказаних режимах у фосфіду галію є нижчою.

На рис. 9, а, б представлені залежності концентрацій дірок в шарах GaP та GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>, імплантованими іонами В<sup>++</sup> (Е=2x40 кеВ) і Mg<sup>++</sup> (Е=2x60 кеВ) від дози легування та температури відпалу.

Таким чином, імплантація іонів В<sup>++</sup> в GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> і GaP приводить до утворення певного числа точкових радіаційних дефектів, які сприяють активації іонів В<sup>++</sup>, при цьому немає амортизації напівпровідникового шару і в той же час імпульсний фотонний відпал при Т=820 °С (10 с) повністю відновлює кристалічну ґратку.

Двозарядний іон Mg<sup>++</sup> є менш ефективним легуючим іоном, проте можна вибрати певні режими легування і відпалу для забезпечення необхідних параметрів р-шару в GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> і GaP.

Дана технологія може бути успішно використана при конструюванні варізонних структур сонячних елементів [10].

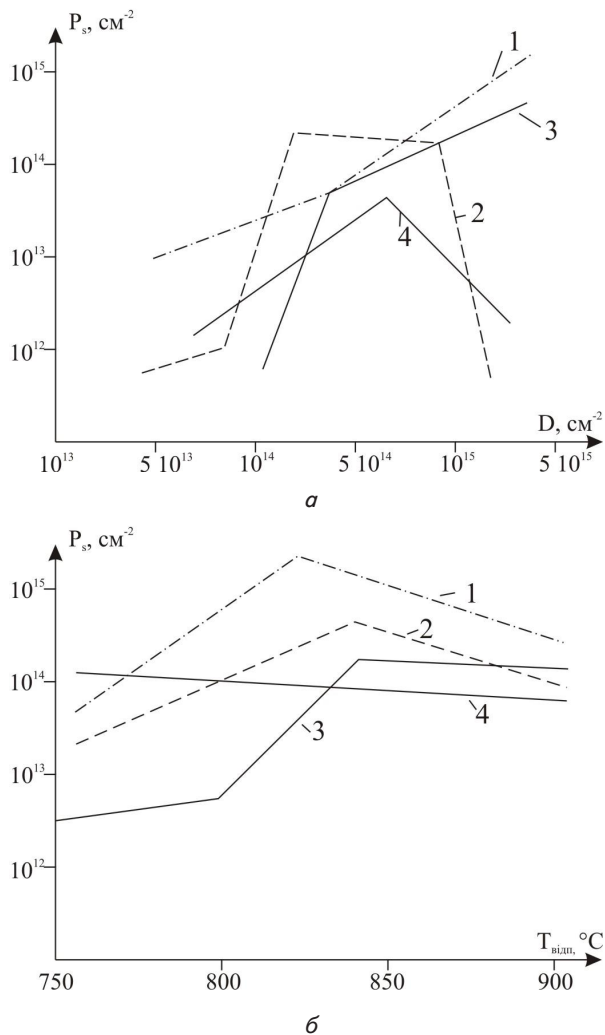


Рис. 9. Залежність шарової концентрації дірок в шарах GaP та GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> імплантованими іонами В<sup>++</sup> і Mg<sup>++</sup> від: а – дози легування при Т<sub>відп</sub>=750 °С; б – температури відпалу при дозі D=5·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>; 1 – GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> В<sup>++</sup>, 2 – GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> Mg<sup>++</sup>, 3 – GaP В<sup>++</sup>, 4 – GaP Mg<sup>++</sup>

**8. Висновки**

1. Досліджені особливості формування складних іонно-імплантованих р<sup>+</sup>–і–n<sup>+</sup>-шарів в арсеніді галію високоенергетичною багатозарядною імплантацією, яка підвищує точність та відтворюваність концентраційних профілів та зменшує дефектність.

2. Використання багатозарядної імплантації в арсенідгалієвій технології субмікронних структур дозволяє реалізувати КМОН структури ВІС високої швидкодії, бо дає можливість формувати складні концентраційні профілі, зокрема ретроградні стік-витокові області, що дозволяє знизити контактні опори.

3. Багатозарядна імплантація іонів Н<sub>2</sub><sup>++</sup>, В<sub>11</sub><sup>++</sup>, О<sub>16</sub><sup>++</sup> забезпечує формування локальних ізольованих шарів в n<sup>+</sup>–n–і-структурах на GaAs, що повністю виключає



ізоляцію р–п-переходами, в результаті чого в два рази збільшується щільність компоновки елементів.

4. Дослідження особливості формування іонно-імплантованих р<sup>+</sup>–п-шарів в GaAs з використан-

ням двозарядних іонів Zn<sup>++</sup>, Be<sup>++</sup> і Mg<sup>++</sup> та визначені області їх застосування в арсенід галієвій технології формування структур ВІС та сонячних елементів з використанням стандартних імплантаторів.

#### Література

1. Риссел, Х. Ионная имплантация : пер. с нем. [Текст] / Х. Риссел, И. Руге; под ред. М. И Гусевой. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
2. Van Tuyl, R. L. Manufacturing process for analog and digital gallium arsenide integrated circuits [Text] / R. L. Van Tuyl, V. Kumar, D. C. D'Avanzo, T. W. Taylor, V. E. Peterson, D. P. Hornbuckle, R. A. Fisher, D. B. Estreich // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1982. – Vol. 29, Issue 7. – P. 1031–1038. doi: 10.1109/t-ed.1982.20830
3. Новосядлий, С. П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС [Текст] / С. П. Новосядлий. – Івано-Франківськ : Місто НВ, 2010. – 455 с.
4. 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. – 2004. – Т. 29, № 7. – С. 857–866.
5. Новосядлий, С. П. Моделі напівізолюючих шарів GaAs при їх формуванні багатозарядною іонною імплантацією [Текст] / С. П. Новосядлий, С. М. Марчук, В. М. Варварук, Л. В. Мельник // Фізика і хімія твердого тіла. – 2014. – Т. 15, № 4. – С. 872–878.
6. Симонов, В. В. Оборудование ионной имплантации [Текст] / В. В. Симонов, Л. В. Корнилов. – М. : Радио и связь, 1988. – 354 с.
7. Болтакс, Б. И. Глубокие центры в GaAs, связанные с собственными структурными дефектами [Текст] / Б. И. Болтакс, М. Н. Колотов, Е. А. Скоретина // Известия вузов. Физика. – 1983. – 10 с.
8. Афанасьев, В. А. Оборудование для импульсной термообработки полупроводниковых материалов [Текст] / В. А. Афанасьев, М. П. Духновский, Г. А. Крысов // Электроника СВЧ. – 1984. – С. 56–58.
9. Окамото, Т. Устройства ионной имплантации [Текст] / Т. Окамото // Саймицу кикай. – 1985. – С. 1322–1325.
10. Черилов, А. В. Исследование электрофизических характеристик ионно–легированных слоев [Текст] / А. В. Черилов // Электронная техника. – 1984. – С. 8–12.
11. Einspruch, N. G. VLSI Electronics: Microstructure Science. Heterostructures and Quantum Devices [Text] / N. G. Einspruch, W. R. Frensley. – San Diego : Academic Press, Inc., 1994. – 452 p.
12. Mishra, S. Strain buildup in GaAs due to 100 MeV Ag ion irradiation [Text] / S. Mishra, S. Bhaumik, J. K. Panda, S. Ojha, A. Dhar, D. Kabiraj, A. Roy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2013. – Vol. 316. – P. 192–197. doi: 10.1016/j.nimb.2013.09.010
13. Koumetz, S. D. A computational study of ion-implanted beryllium diffusion in gallium arsenide [Text] / S. D. Koumetz, J.-C. Pesant, C. Dubois // Computational Materials Science. – 2008. – Vol. 43, Issue 4. – P. 902–908. doi: 10.1016/j.commatsci.2008.02.003
14. Pribat, D. Ion implantation of silicon in gallium arsenide: Damage and annealing characterizations [Text] / D. Pribat, D. Dieumegard, M. Croset, C. Cohen, R. Nipoti, J. Siejka, G. G. Bentini, L. Corraera, M. Servidori // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1983. – Vol. 209-210, Part 2. – P. 737–742. doi: 10.1016/0167-5087(83)90876-1
15. Hutchinson, S. Acceptor profile control in GaAs using co-implantation of Zn and P [Text] / S. Hutchinson, R. Gwilliam, M. J. Kelly, B. J. Sealy, A. Chew, J. Stephens // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B : Beam Interactions with Materials and Atoms. – 1999. – Vol. 148, Issue 1–4. – P. 459–462. doi: 10.1016/s0168-583x(98)00674-0
16. Jayavel, P. The effect of nitrogen implantation on structural changes in semi-insulating GaAs [Text] / P. Jayavel, K. Santhakumar, S. Rajagopalan, V. S. Sastry, K. Balamurugan, K. G. M. Nair // Materials Science and Engineering : B. – 2002. – Vol. 94, Issue 1. – P. 66–70. doi: 10.1016/s0921-5107(02)00086-7