

УДК 621.382.8.822

DOI: 10.31471/2304-7399-2019-1(53)-45-58

**РЕТРОГРАДНА БАГАТОЗАРЯДНА ДУАЛЬНА ІМПЛАНТАЦІЯ  
ЕПІ-ШАРІВ GaAs НА МОНО-Si ПІДКЛАДКАХ****С. П. Новосядлий, С. В. Бастрікін, Я. І. Павлюк,  
А. Д. Семенишин***Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;  
м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57; тел. +380(342)59-60-74*

*В статті подані результати експериментальних досліджень з використанням багатозарядної дуальної імплантації іонів різної маси (кремній, сірка, селен) для формування ретроградних концентраційних профілів  $n^+n$  транзисторів ПТШ, які збільшують швидкість ВІС в 2,5-3 рази.*

**Ключові слова:** багатозарядна дуальна імплантація, складний концентраційний профіль  $n^+ - n$  типу, крутизна транзисторів ПТШ, швидкодія ВІС.

У даній статті подано матеріали дослідження технологічних та структурних досліджень формування високолегованих ретроградних шарів GaAs методом багатозарядної імплантації іонів  $Se^{++}$  та сірки  $S^{++}$  та фотонного відпалу в контрольованому середовищі в потоці арсену + водню ( $AsH_3 + H_2$ ), водню + аргону ( $H_2 + Ar$ ). При цьому вивчались особливості багатозарядної імплантації на концентраційні профілі з метою забезпечення високої швидкодії польових транзисторів в субмікронній технології ВІС, зокрема для усунення короткоканальних ефектів з використанням структур  $n^+ - n$ .

Сьогодні значно збільшилась зацікавленість в технології багатозарядної імплантації арсенідгалієвих епітаксійних шарів, що дозволяє локально формувати леговані області  $n^+ - n$  субмікронних структур ВІС із заданою концентрацією і профілем носіїв струму. Особливий інтерес представляє можливість отримання високолегованих  $n^+ - n$  шарів з концентрацією електронів  $10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , які використовуються для формування омичних контактів стік-витоківих областей з дуже малим перехідним опором, які збільшують швидкодію приладів, усуваючи короткоканальні ефекти.

Питання отримання високолегованих  $n^+$ - областей в арсеніді галію методом багатозарядної дуальної іонної імплантації та фотонного відпалу під захисним капсулюючим покриттям завжди приділялась велика увага цілим рядом авторів сучасних досліджень. Встановлено, що найбільш ефективним імплантаційним іоном є саме Se завдяки його дуже низькій дифузійній рухливості, яка дозволяє звести до мінімуму ро-

змиття концентраційних профілів у процесі високотемпературного відпалу.

Нами досліджувались дуальні імплантації  $\text{Se}^{++} - \text{Ga}^{++}$ ,  $\text{Se}^{++} - \text{As}^{++}$ ,  $\text{Se}^{++} - \text{S}^{++}$ ,  $\text{Se}^{++} - \text{Si}^{++}$ ,  $\text{Si}^{++} - \text{S}^{++}$  в GaAs (в тому числі напівізолюючому) з наступним як термічним, так і фотонним відпалом під захисним покриттям  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , що дозволяє формувати іонно-леговані ретроградні (із складним концентраційним профілем) з максимумом кривої розділу концентрації на рівні  $(1,6-12)10^{19} \text{ см}^{-3}$ , що є основою для мінімізації контактної опору стік-витоків областей, а значить різкого підвищення швидкодії структур ВІС на GaAs. Проте застосування захисного капсулюючого покриття із  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , для запобігання термічного розкладу GaAs має ряд суттєвих недоліків:

- труднощі видалення захисних капсульних покриттів, таких як  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , AlN,  $\text{SiO}_2$  без порушень структури імплантаційного шару після проведення операції високотемпературного відпалу;
- поява на межі розділу напівпровідник - захисне покриття термо-механічних напружень, які виникають за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення підкладки і захисної плівки, що веде до перерозділу імплантованої і компенсуючої домішки і значно погіршує стабільність електро-фізичних параметрів ВІС через зміну міжфазного заряду;
- низька теплопровідність GaAs в порівнянні з моно-Si значно погіршує відведення тепла від потужних активних елементів ВІС;
- збільшення радіаційних дефектів, які не повністю відпаюються високо-температурною обробкою в аргонній атмосфері.

Перспективною альтернативою відпалу під захисним покриттям в останні роки стає фотонний відпал іонно-імплантованих структур в контрольованій атмосфері. Проте дослідженням даного типу відпалу практично не досягається отримання високолегованих структур  $n^+ - n$ -типу на GaAs.

Нами досконало вивчено технологічні особливості формування високолегованих шарів в епітаксійному арсеніді галію методом іонної багатозарядної дуальної імплантації селена  $\text{Se}^{++}$  та іншими іонами  $n$ -типу ( $\text{Si}^{++}$ ,  $\text{S}^{++}$ ) з різними дозами та енергіями, що дозволяє ефективно формувати структури  $n^+ - n$  типу, усуваючи короткоканальні ефекти. Відпал проводиться в фотонній установці в атмосфері водню  $\text{H}_2$  та арсену As НЗ("Імпульс-3").

Для експериментальних досліджень використовувався епітаксійний та напівізолюючий арсенід галію орієнтації (100). Такі пластини GaAs імплантувались дуально іонами селену  $\text{Se}^{++}$  з різними дозами в межах  $5,0 - 250 \text{ мкКл/см}^2$  і енергією  $50 - 150 \text{ кеВ}$  для отримання структур ( $n^+ - n$ )- типу, тобто дози імплантованих іонів змінювалась від  $10^{13}$  до  $10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

Безпосередньо перед процесом іонної імплантації підкладки арсеніда галію піддавались стандартній хімічній обробці в розчині Каро з фінішною промивкою в деіонізованій воді марки А та центрифужній сушці в атмосфері азоту для видалення забруднень та власного оксиду з поверхні пластин. Іонна імплантація проводилася на установці “Везувій-5”, де формувались двозарядні іони  $Se^{++}$ ,  $S^{++}$ ,  $Si^{++}$  для дуальної імплантації. А відпал імплантованих структур проводився як в епітаксійній установці УНЕС-2ПКА в газовому середовищі  $AsH_3$ , так і в установці фотонного відпалу “Імпульс-3”. Маскою в процесі імплантації використовувались плівки  $SiO_2$  і  $Si_3N_4$  товщини 0,035 мкм, а в ролі підкладок використовувались шари арсеніду галію марки АГЧП-2а, які забезпечували високу термостійкість в умовах вище прийнятої активації домішки. Температура відпалу в імплантаційній установці УНЕС-2ПКА складає  $825^\circ C$  з тривалістю обробки 30 хв. Імпульсний фотонний відпал проводився на установці “Імпульс-3”, що мала два ряди галогенних ламп, які розміщувалися симетрично по два боки від взірця. Відпалювана пластина розміщувалась на кремнієву підкладку – п’єдестал діаметром 75мм і товщиною 0,5 – 0,7 мм планарною стороною вниз для зменшення втрат As в процесі відпалу. Відпал проводився в нейтральній атмосфері аргону водню та водню + арсену, а контроль температурного режиму здійснювався за допомогою фотодіода. Технологічний режим фотонного відпалу задавався опірною напругою живлення галогенних ламп змінної потужності споживання.

Контроль імплантованих  $n^+-n$  структур виконувався методом вольт-фарадних характеристик ртутного бар’єра Шоттки за допомогою електрофізичного профілометра, а вимірювання рухливості за допомогою тестової структури-холлотрона.

Відтворюваність електрофізичних параметрів багатозарядної імплантації оцінювалась за величиною вимірюваного струму насичення тестових польових транзисторів Шоттки та опору тестових резисторів.

Розробка технології багатозарядної дуальної прецезійної імплантації проводилася для двох основних конструкцій ПТШ: використання активної структури  $n^+-n$  - типу та використання локальних  $n^+-n$  - областей, самосуміщених із затвором.

До концентраційного профілю типу  $n^+-n$  ставились наступні вимоги:

- він повинен мати достатні для формування якісних омичних контактів рівень легування та товщину контактного шару;
- спадаючий фронт  $n^+-n^-$  - області, що є робочою областю каналу ПТШ, повинен бути достатньо крутим, щоб забезпечити високе значення крутизни ВАХ ПТШ і достатньо пологим, щоб забезпечити якісну підгонку порогової напруги каналу з необхідною точністю.

Із проведеного аналізу експериментальних досліджень ряду авторів випливає, що ефективність дуальної багатозарядної імплантації, напри-

клад іонів селену  $\text{Se}^{++}$   $\xi$ , як відношення поверхневої концентрації селену до дози імплантованих іонів, залежить також від температури підкладки в процесі імплантації  $T_{\text{імпл}}$ , причому максимум цієї залежності спостерігається при різних температурах для різних іонів та режиму і виду післяімплантаційного відпалу. Проте для фотонного відпалу в контрольованій атмосфері подібні дослідження для багатозарядних іонів не проводились.

Тому для формування дуальних багатозарядних шарів з максимальною концентрацією електронів з використанням фізичного відпалу в контрольованій атмосфері  $\text{H}_2 + \text{AsH}_3$  в даній роботі нами досліджувалась залежність ефективності багатозарядного іонного легування селеном (а також S та Si) епітаксійних та монокристалічних шарів арсеніду галію від температури імплантації. Експерименти показали, що з підвищенням температури  $T_{\text{імпл}}$  росте концентрація вакансії галію і миш'яку в GaAs, якщо парціальний тиск не перевищує тиск залишкових газів в камері установки іонного легування "Везувій-5". Оскільки для переходу селену із проміжного стану в електрично активний іон селену вже необхідно зайняти вузол As, то росте концентрація вакансій As, яка підвищує ймовірність такої події, а ріст концентрацій вакансій галію вже підсилює дифузію селену із однієї кристалічної ґратки в іншу, що також підвищує ймовірність переходу селену із проміжного стану в активний стан. Таким чином, тільки загальний ріст вакансій галію і миш'яку  $\xi$  приводить до росту ефективності багатозарядної дуальної імплантації селену (цей механізм поширюється і на інші іони  $\text{S}^{++}$ ,  $\text{Si}^{++}$ ).

З ростом температури імплантації приходить підвищення парціального тиску As над тиском залишкових газів в камері імплантатора. А це приводить до випаровування As з поверхні арсеніду галію і збільшення генерації вакансій As в об'ємі GaAs, що і зумовлює зниження концентрації вакансій галію за законом діючих мас. Таке зменшення концентрації вакансій галію і знижує ефективність багатозарядної імплантації селеном арсеніду галію вище визначеної температури імплантації. Аналогічний ефект відбувається і при використанні іонів сірки  $\text{S}^{++}$  чи кремнію  $\text{Si}^{++}$ . Отриману нами експериментальну залежність ефективності багатозарядної імплантації для іонів  $\text{Se}^{++}$ ,  $\text{S}^{++}$  та  $\text{Si}^{++}$  подано на рис. 1. Як бачимо із графіків для збільшення активації імплантованих двозарядних іонів необхідно збільшувати температуру імплантації відносно до їх атомної і кожний вид іона має свою максимальну температуру імплантації  $\text{Si}^{++}$  - 160 - 170 °C,  $\text{S}^{++}$  - 200 - 210 °C,  $\text{Se}^{++}$  - 230 - 240 °C. Ці графіки можуть змінюватися в сторону більш високих температур при збільшенні дози імплантації. Отже, найбільш ефективними і раціональними є іони кремнію  $\text{Si}^{++}$ .

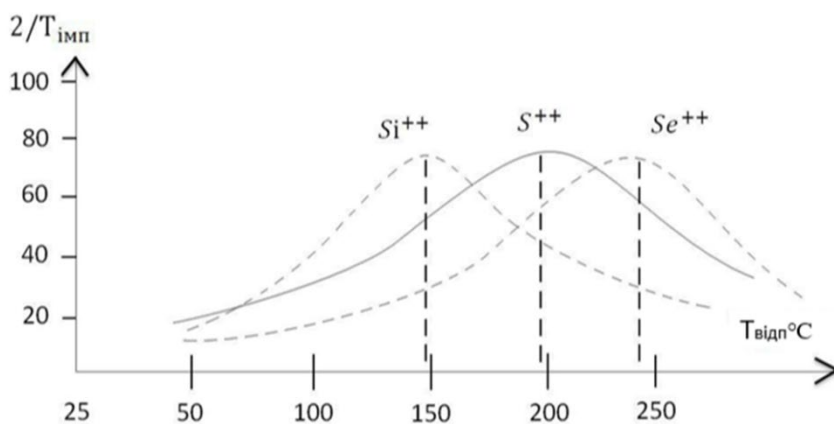


Рис. 1. Залежність ефективності багатозарядної імплантації  $S^{++}$ ,  $Se^{++}$  і  $Si^{++}$  епітаксійного GaAs від температури підкладок в процесі імплантації для режиму  $E = 110$  кеВ,  $D = 10^{14}$  см $^{-2}$ ,  $T_{відп.} = 825^{\circ}C$ ,  $t = 10$ хв,  $P_{AsH_3} = 1000$  Па.

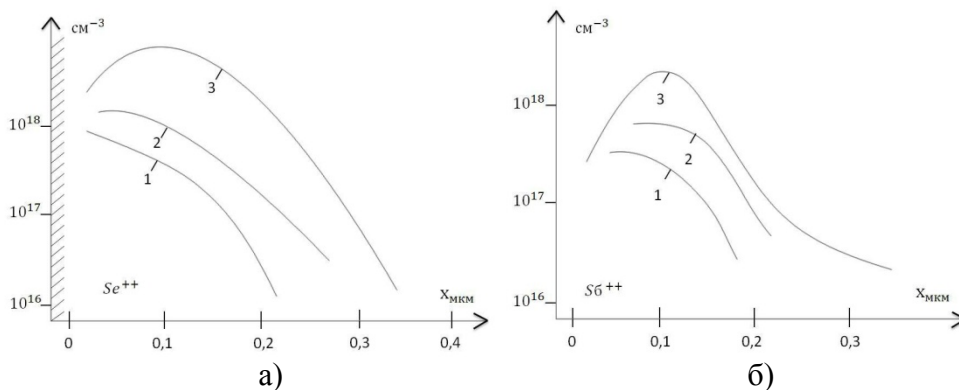


Рис. 2. Концентраційні профілі сигналів за глибиною профілів шарів: а)  $Se^{++}$ , б)  $Si^{++}$  в режимі імплантації  $E_1=110$  кеВ,  $E_2=75$  кеВ,  $D=10^{14}$  см $^{-2}$  (0,4-7,5 мкм(см $^2$ ))  $T_{відп}=820^{\circ}C$  при  $t=15$ хв, при парціальному тиску  $P_{AsH_3}=1000$ Па (1-25 $^{\circ}C$ , 2-100 $^{\circ}C$ , 3-320 $^{\circ}C$ ) температура імплантації.

Цікавими в цьому плані виглядають концентраційні профілі за глибиною в залежності від температури імплантації. Як джерело іонного легування нами використовувались сполуки  $SiCl_4$ ,  $SF_6$ ,  $SeCl_6$ .

Найбільш повно вищевикладеним вимогам відповідають профілі сформовані багатозарядною (дуальною) імплантацією через діелектрик  $Si_3N_4$ , бо такий захисний шар дозволяє визначити рівень радіаційних пошкоджень та можливість забруднення в процесі імплантації.

Електрофізичні параметри тестових структур у вигляді ПТШ подано в табл. 1.

Таблиця 1. Електрофізичні параметри тестових структур у вигляді ПТШ

№	Спосіб активації	Максимальна концентрація домішки, см <sup>3</sup>	Глибина на рівні, 10 <sup>15</sup> см <sup>3</sup>	Рухливість, см <sup>2</sup> /В-с	Питомий поверхневий опір, Rs/см <sup>2</sup>
1	Термічний відпал	(0,7 – 0,8) 10 <sup>18</sup>	0,25	2950 - 3200	300 - 350
2	Фотонний відпал	(1,2 – 5) 10 <sup>18</sup>	0,26	3500 - 4200	110 - 130

Проведений аналіз концентраційних профілів дуальної багатозарядної імплантації вказує на те, що він є оригінальним інструментом для формування складних концентраційних профілів (ретроградних), що дають можливість збільшити як граничну частоту, так і швидкодію біполярних і польових транзисторів Шоткі субмікронної технології ВІС, причому тут використовувалась зміна енергії і дози легування, ступеня іонізації та маси іона. Прикладом може бути концентраційний профіль елементів в епі-шарах GaAs для 4-зарядних іонів кремнію (Si<sup>++++</sup>) імплантованих в структури n<sup>+</sup>-n в режимі: а) E = 80 кеВ, D = 0.4 мкКл/см<sup>2</sup>; б) E = 45 кеВ, D = 7.5 мкКл/см<sup>2</sup>. Експериментальні результати з формування n<sup>+</sup>-n структури (табл. 1) та (рис. 2) показують саме такий режим імплантації, забезпечуючи найвищий коефіцієнт активації домішок (> 87%) і мінімальний поверхневий опір (< 150 Ом/см<sup>2</sup>) із створенням варізонних областей прискорюючого електричного поля в транзисторних структурах.

Аналіз профілів концентрації елементів за глибиною дуальної багатозарядної імплантації показав, що за оптимальної з точки зору ефективності легування саме при температурі імплантації формуються шари з максимальним градієнтом концентрації на межі розділу іонно-імплантований шар – кремнієва чи арсенідгалієва підкладка, тобто ретроградно, що потребує технологія ПТШ (рис. 2).

В процесі багатозарядної імплантації при підвищенні температури вже проходить частковий відпал радіаційних дефектів у іонно-легованій структурі (бо збільшується степінь активації), але як показали експериментальні дослідження, приведення іонної імплантації при підвищених температурах (250-450°C) вимагає відповідно і більш високих температур та часу відпалу радіаційних дефектів в порівнянні з іонним легуванням при кімнатній температурі. Таку закономірність можна пояснити частковою анігіляцією точкових дефектів, їх стіканням із виникненням більш крупніших дефектів (частково проходить гетерування на кисневому гетері), для повного видалення яких потрібні більш високі температури після імплантаційного відпалу (в тому числі фотонного відпалу). Такий механізм дефектоутворення при підвищеній температурі імплантації T<sub>імпл.</sub> веде до певного зниження ефективності багатозарядного легування в діапазоні температур 250-300°C.

Дослідження впливу температури після імплантаційного відпалу на поверхневу концентрацію елементів, які наведено в даній роботі, показує ріст ефективності багатозарядного легування і максимальної концентрації електронів в шарі при підвищенні температури відпалу до 850-900°C, що демонструє рис. 3. А проведення відпалу при  $T_{\text{відп.}} > 900^\circ\text{C}$  викликає порушення морфології поверхні арсеніду галію, що понижує ефективність легування і вимагає збільшення парціального тиску арсену ( $\text{AsH}_3$ ) в камері відпалу. Цей ефект сильно згладжується при використанні імпульсного фотонного відпалу в діапазоні температур 825-850°C вже протягом 7-12 секунд. Дослідження впливу дози імплантованих іонів  $\text{Se}^{++}$  від  $T_{\text{відпл}}$  всіх типів іонів  $\text{Se}^{++}$  підтверджуються також електрофізичною діагностикою тестових транзисторів ПТШ сформованих з використанням стік-витокових областей у вигляді структур  $\text{n}^+$ - $\text{p}$ -типу імплантованих іонами кремнію ( $\text{Si}^{++++}$ ). При середньому струмі насичення транзисторів ПТШ  $I_n=50,4\text{mA}$  при ширині каналу  $W = 75$  мкм, питома крутизна всіх транзисторів складала 125-140  $\text{mA/V}\cdot\text{мм}$  з максимальною величиною 152  $\text{mA/V}\cdot\text{мм}$  та напругою відсічки в межах  $(-1.5 \div -3.5\text{V})$ . Подальше збільшення крутизни ПТШ на іоннолегованих багатозарядною імплантацією кремнію  $\text{Si}^{++++}$  досягається шляхом застосування локальної  $\text{n}^+$ -імплантації самосуміщеної з положенням затвора, що дозволяє проводити незалежну оптимізацію  $\text{n}^+$ -стік-витокових областей контактів і  $\text{n}$ -каналу.

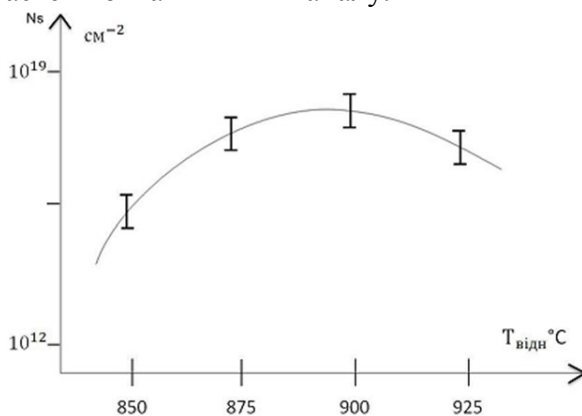


Рис. 3. Залежність поверхневої концентрації електронів від  $T_{\text{відп.}}$  імплантованих іонів  $\text{Se}^{++}$   $E=110$  кеВ,  $D=5 \cdot 10$ ,  $T_{\text{імпл}} = 270^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{AsH}_3} = 10^3 \text{Па}$

Контактні області витоку і стоку повинні мати мінімальний питомий опір шару, який вже досягається багатозарядною іонною імплантацією із змінними параметрами легування:

1.  $E = 180$  кеВ,  $D = 13.5$  мкКл/ $\text{см}^2$ ;

2.  $E = 120$  кеВ,  $D = 3$  мкКл/ $\text{см}^2$ ;

3.  $E = 65$  кеВ,  $D = 2.1$  мкКл/ $\text{см}^2$ . (це можна зробити одним режимом із зміною видів іонів  $\text{Si}$  ( $\text{Si}^{++++}$  -  $\text{Si}^{++}$  -  $\text{Si}^+$ ).

Режим формування каналу повинен забезпечити напругу відсічки ПТШ без підгонки каналу на рівні  $(-1 \div -3\text{В})$ . Необхідний рівень напруги відсічки може бути також досягнутий різним набором параметрів енергія-доза. Для реалізації останнього варіанту використовувався комбінаційний післяімплантаційний відпал і слаболегований  $n$  – шар каналу, який відпалюється під діелектричною плівкою в реакторі при  $T = 825^\circ\text{C}$  (15 хв), а високолеговані  $n^+$  – шари витоку і стоку активізуються вже імпульсним фотонам відпалом при  $T = 825^\circ\text{C}$  (10 с.). В результаті такого режиму активізації отримані  $n$  – шари з високим значенням рухливості носіїв заряду при відпалі під діелектриком  $\text{Si}_3\text{N}_4$  та високим значенням активації ( $> 95\%$ ) домішки при фотонному відпалі. Середнє значення рухливості електронів в каналі становить  $3850 - 4100 \text{ см}^2/\text{Вс}$  при середній концентрації носіїв в каналі  $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а питомий поверхневий опір  $n^+$  – шару склав  $110 - 125 \text{ ом}/\text{см}^2$  при рівні легування  $(2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . А це є достатнім для формування омічних контактів на основі сплаву  $\text{Au-Ge}_{12}$  з питомим контактним опором  $\rho_k = (1 - 2) \cdot 10^{-6} \text{ Ом см}^2$ .

Зв'язок напруги відсічки ПТШ з режимом багатозарядної імплантації каналу іонами кремнію демонструє рис. 4.

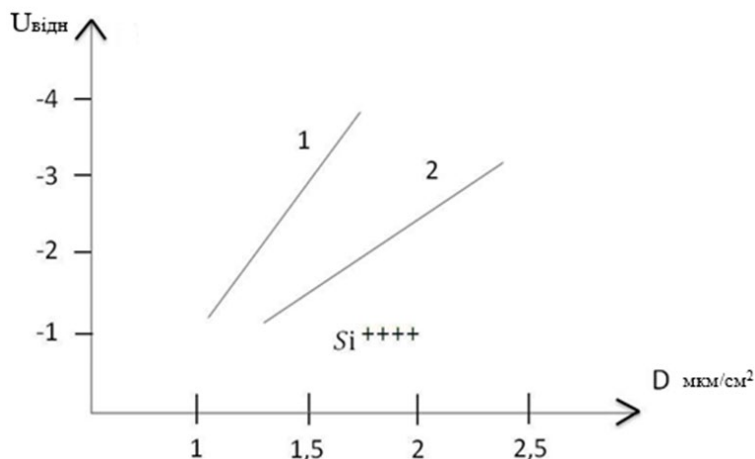


Рис. 4. Залежність напруги відсічки ПТШ від режиму імплантації іонами кремнію: 1- $E=110 \text{ кеВ}$ , 2- $E=75 \text{ кеВ}$ .

Розроблена технологія дуальної багатозарядної імплантації  $n^+$  і  $n$ -областей для самосуміщених ПТШ дозволяє отримати питому крутизну ВАХ ПТШ до  $200 \text{ мА}/\text{В.мм}$ , що збільшує швидкодію як мінімум  $2.5 - 3$  рази. Таку електрофізичну діагностику в потоці напруги відсічки ПТШ демонструє іонна дуальна багатозарядна імплантація більш важких іонів селену ( $\text{Se}^{++}$ ).

Дослідження впливу дози імпантованих іонів на поверхневу імплантацію електронів  $n_s$  показали досить добре узгодження результатів нашого експерименту з даними по іонному легуванню епі-шарів  $\text{GaAs}$ , отриманими як з використанням високотемпературного відпалу під за-



хисним покриттям, так і при фотонному відпалі в контрольованій атмосфері при вибраній дозі  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

Вибір оптимальних температур імплантації та відпалу з багатозарядною імплантацією селеном ( $\text{Se}^{++}$ ) епі-шарів GaAs з використанням фотонного відпалу в контрольованій атмосфері, створеній потоками водню і арсену ( $\text{H}_2 + \text{AsH}_3$ ), дозволяє отримати леговані  $\text{n}^+\text{-n}$ -структури з концентрацією електронів на поверхні  $(1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , що перевищує результати досліджень, отриманих методом іонної імплантації однозарядним селеном ( $\text{Se}^+$ ) і високотемпературного відпалу під захистом покриттям  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , що робить досить перспективним процес багатозарядної іонної імплантації для формування транзисторів субмікронної технології з високою швидкістю.

Виходячи з отриманих експериментальних досліджень дуальної багатозарядної імплантації та імпульсного фотонного відпалу  $\text{n}^+\text{-n}$ -структур ПТШ з використанням іонів селену, сірки і кремнію, можна визначити наступну модель імплантації: генерація вакансій As в процесі термічного відпалу є аналогічною імплантації Ga у випадку дуальної багатозарядної імплантації Si, S, Se і сприяє значному підвищенню максимальній поверхневій концентрації електронів. При цьому концентраційний профіль електронів є ретроградним за глибиною імплантованого шару  $\text{n}^+\text{-n}$ -структури, що подана на рис. 5.

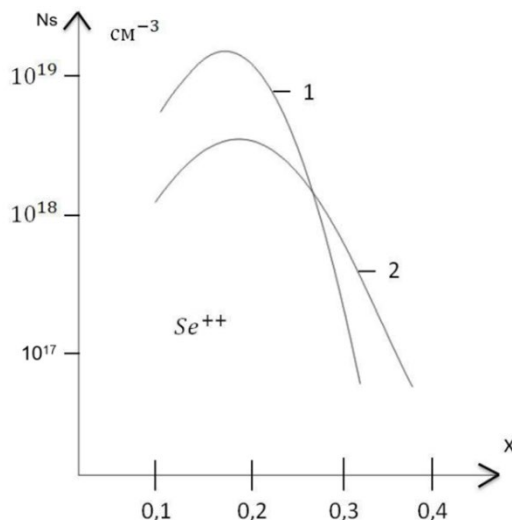
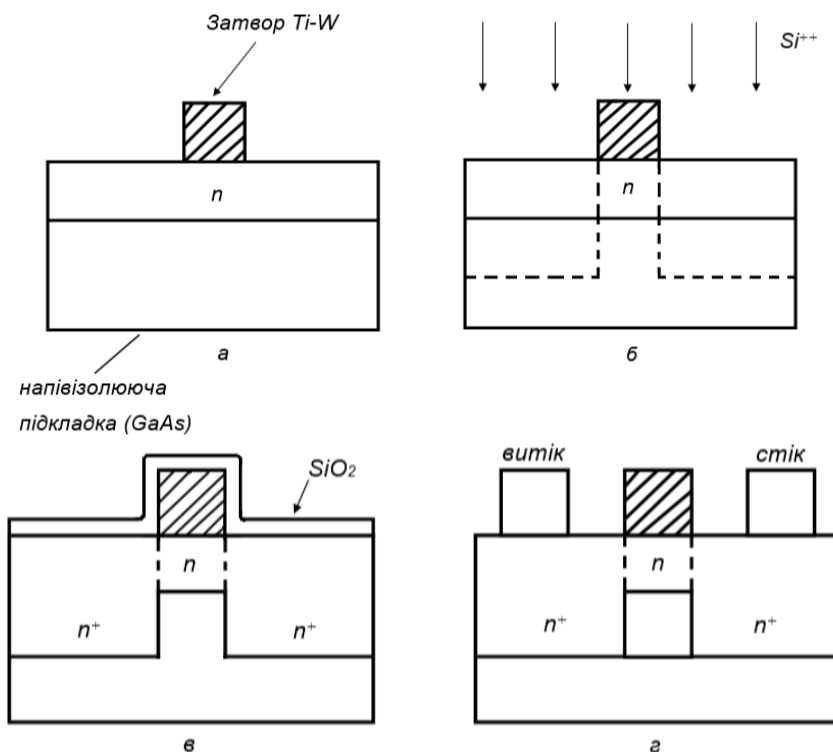


Рис. 5. Поверхнева концентрація профілів електронів, за глибиною профілів струму  $\text{n}^+\text{-n-GeH}_3$  з максимальною концентрацією носіїв струму в епі-шарі. Підвищення дози зменшує концентрацію.

Параметри технологічного процесу L та активації іонів  $\text{Se}^{++}$ :  $T_{\text{імп}} = 230^\circ\text{C}$ ,  $D = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 110 \text{ кеВ}$ ,  $T_{\text{відп.}} = 824^\circ\text{C}$  (10с). Це дозволяє формувати високолеговані стік-витоккові області ПТШ з омичним контактом перехідного опору  $(2-3) \times 10^{-7} \text{ Ом см}^2$ , що є важливим для підвищення швидкодії транзисторів субмікронної технології ВІС.

Тепер розглянемо субмікронну технологію формування самосуміщених структур ПТШ на напівізолюючій підкладці з використанням дуальної багатозарядної імплантації GaAs.

Самосуміщена технологія формування субмікронних структур ВІС на базі ПТШ із застосуванням високо стабільних затворів із тугоплавкого металу (TiW) з добавками Si була також розроблена нами спеціально для структур ВІС (рис. 6), які працюють із швидкістю передачі інформації 10 Гбіт/с. Поперечний розмір елементів ВІС, що формується за самосумісною технологією на різних мікроциклах, подано на рис. 7. Структури ВІС були виготовлені шляхом селективної багатозарядної імплантації  $Si^{++}$  та  $Se^{++}$  в підкладках GaAs діаметром 75мм, зливки яких вирощені методом Чохральського.

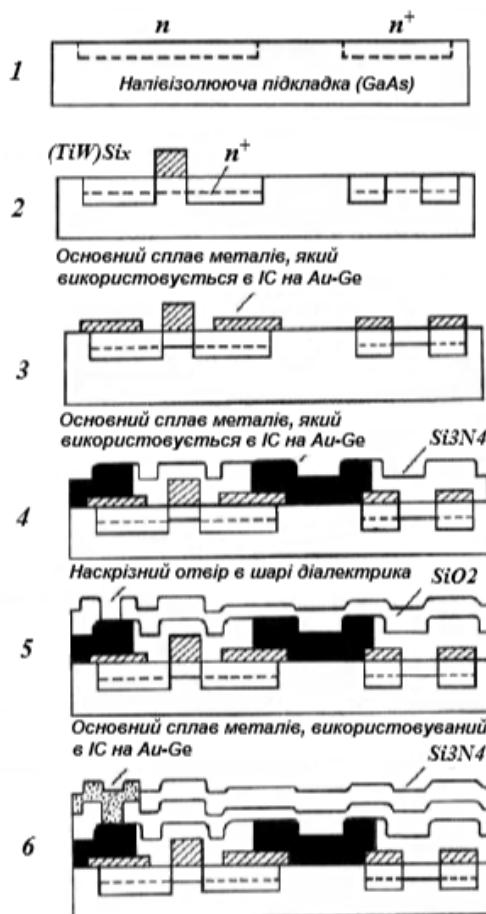


а – формування металізації електрода затвору (для отримання бар'єру Шоткі до GaAs, який витримує високі температури, використовується сплав TiW);  
 б – проведення іонної імплантації для створення n<sup>+</sup>-областей Si<sup>++</sup> під омичні контакти; в – нанесення шару SiO<sub>2</sub> та відпал; г – формування омичних контактів (AuGe)

Рис. 6. Технологічний процес виготовлення ПТШ на GaAs за методом самосуміщення

Іонно-імплантовані стік-витоківі області каналу ПТШ були відпалені з використанням захисного шару Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> імпульсним фотонним методом на установці "Імпульс-3". Після відпалу захисний шар видалився, а потім проводилось магнетронне напилення сплаву тугоплавкого металу з

кремнієм (TiW з Si) для формування затвора; топологія затворів створювалась за допомогою реактивного іонного травлення (фрезеруванням). При цьому метал затвора використовувався в ролі маски під час іонної імплантації високоактивної домішки ( $\text{Si}^{++}$  та  $\text{Se}^{++}$ ) для формування  $n^+$ - $n$ -областей витоку і стоку. Утворені імплантовані  $n^+$ -області відпалювались фотонним відпалом з використанням захисного шару  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .



1 – іонна імплантація в напівізолюючу підкладку; 2 – формування електроду затвора та іонна імплантація для отримання самосуміщених з затвором контактних  $n^+$  областей; 3 – формування омичних контактів; 4 – нанесення першого рівня металізації; 5 – нанесення міжшарового діелектрика і травлення в ньому наскрізних отворів; 6 – формування другого рівня металізації

Рис. 7. Схематичне зображення поперечного сечення елементів субмікронної структури ВІС на основі арсенідгалеївої ПТШ із самосуміщеним затвором на різних етапах технологічного процесу її виготовлення

Виготовлення структур завершилось формуванням омичних контактів на основі сплаву Au-Ge-12 методом вибухової фотолітографії. Формування металізації розведення починається з осадження шару

$\text{Si}_3\text{N}_4$ , що використовується в подальшому матеріалом для оберненої маски. Потім осаджується сплав на основі золота (товщиною 500 – 600нм) і видаляється в необхідних локальних місцях методом вибухової фотолітографії за допомогою плазмового травлення діелектрика. Формування між'єднань другого рівня комутації проходить аналогічно. Поверхневий опір між'єднань обох  $R \epsilon < 0,07 \text{ Ом/см}^2$ . Для приладів ПТШ з довжиною затвора 0,7 мкм отримано значення крутизни ПТШ на рівні 210-225 мСм/мм. У виготовлених тестових структурах кільцевих генераторів було досягнуто час переключення 25 – 30 Пс та величини енергії переключення 1,1 – 1,2 фДж, а логічні схеми, які виконували функцію ділення на 4, вже працювали до частоти 5 ГГц і споживали потужність 1,18 мВ/вент.

### Висновки

Дослідження технологічних особливостей формування високолегованих шарів  $n^+$ - $n$ -типу методом дуальної багатозарядної імплантації іонів  $\text{Si}^{++}$ ,  $\text{S}^{++}$ ,  $\text{Se}^{++}$  в епі-шарі GaAs і наступного фотонного відпалу в контрольованій атмосфері ( $\text{H}_2 + \text{AsH}_3$ ), дозволяють реалізувати транзистори високої швидкодії в субмікронній технології ВІС.

При цьому:

- оптимальний інтервал температур імплантації складає 160 – 230°C і визначається масою іона та тиском залишкових газів в камері імплантатора;
- залежність ефективності легування в температурі та тривалості фотонно імпульсного відпалу  $T = 825^\circ\text{C}$  (10с) є високою і не зумовлює деградаційної межі розділу напівпровідник-діелектрик;
- отримані  $n^+$ - $n$  – шари на епітаксійному арсеніді галію, що сформовані дуальною багатозарядною імплантацією, відкривають можливість підвищення швидкодії субмікронних структур ВІС/НВІС на Si – підкладках в 2-3 рази.

### Література

1. Новосядлий С.П. Суб- і наномікронна технологія структур ВІС. Монографія. – Івано-Франківськ.: Місто-НВ, 2010. – 456 с.
2. Новосядлий С.П., Терлецький А.І. Діагностика субмікронних структур ВІС. Монографія. – Івано-Франківськ.: Сімик, 2016. – 478 с.
3. Новосядлий С.П. Радіаційна технологія при формуванні субмікронних структур ВІС. Металофізика і новітні технології. – 2002. – №4. – С. 1003-1013.
4. Новосядлий С.П. Активізація домішок в субмікронній технології формування структур великих інтегральних схем. Металофізика і новітні технології. – 2002. – №6, Т24. – С. 777-794.
5. Новосядлий С.П. Поліміідні композиції в субмікронній технології формування структур великих інтегральних схем. Металофізика і новітні технології. – 2005. т. 27, №5. – С. 635-642.

6. Новосядлий С.П., Бережанський В.М. Мезоепіпланарна технологія як основа реалізації субмікронних суміщених Ві-К-D-МОН-структур ВІС. Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2007. – Т 25, №1.– С. 40-45.
7. Новосядлий С.П., Бережанський В.М. Багатозарядна іонно-імплантаційна обробка при формуванні кишені і металізації субмікронних структур ВІС. Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2007. – Т 29, №7. – С. 857-866.
8. Новосядлий С.П., Варварук В.М. Технологічні особливості епітаксійного формування шаруватих наноструктур. Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2008. – №4.– С. 32-36.
9. Новосядлий С.П., Варварук В.М. Формування МОН – транзисторів ВІС з ізоляцією активних елементів окисленням пористого кремнію. ТКЕА. – 2009. – №3 (8). – С. 35-39.
10. Бондарева Т.К., Манухина Ф.Ф. Технологія іонної імплантації арсеніду галію // Електротехніка. – 1990. –№5 (162). – С. 32-36.
11. Новосядлий С.П., Варварук В.М., Сорохтей Т.Р. Особливості формування SOI – структур для субмікронних ВІС з використанням багатозарядної іонної імплантації. Східноєвропейський журнал провідних технологій. – 2011. – №4(3). – С. 30-43.
12. Новосядлий С.П. Сорохтей Т.Р. Польові транзистори з бар'єром Шоттки на основі напівізолюючих підкладок GaAs, імплантованих ретроградно- багатозарядними іонами селена. Металофізика і новітні технології. – 204. – №2 (4). – С. 17-19.
13. Новосядлий С.П., Мельник Л.В. Фізико-технологічні аспекти багатозарядної імплантації арсенід галію в структурах приладів і схем. Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2013. – №5 (65). – С. 29-36.
14. Новосядлий С.П., Кіндрат Т.П. Варізонні напівпровідники та їхнє застосування. Східноєвропейський журнал передових технологій (спец випуск). «Технологічний аудит і резерви виробництва. Матеріали науково-практичної конференції «Наукового результату». – 2013. – №6/5(16). – С. 24-27.
15. Новосядлий С.П., Мельник Л.В. Особливості технології кремній та арсенід галію на ізоляторі. Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2014. – №6/5(72). – С. 34-39.
16. Новосядлий С.П., Марчук С.М., Варварук В.М., Мельник Л.В. Моделі напівізолюючих шарів арсеніду галію при їх формуванні багатозарядною іонною імплантацією. Фізика і хімія твердого тіла. – 2014. – Т. 15, №4. – С. 872-878.
17. Новосядлий С.П., Босацький А.М. Варізонна технологія формування структур швидкодіючих GaAs – транзисторів як основа сучасних ВІС. Фізика і хімія твердого тіла. – 2014. – Т. 16, №1. – С. 221-229.

18. Новосядлий С.П., Терлецький А.І., Фрик О.Б. Формування КМОН схем на GaAs із самосуміщеними нітридними та силіцидними затворами. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 420-424.
19. Новосядлий С.П., Бойко С.І. Мельник Л.В., Новосядлий С.В. Розробка технології багатозарядної іонної імплантації GaAs для субмікронних структур великих інтегральних схем. // Східноєвропейський журнал провідних технологій. – 2015. – № 6(5). – С. 32-40.
20. Новосядлий С.П., Луцький І.М. Шляхи підвищення швидкодії GaAs-польових транзисторів Шоттки (ПТШ) та селективнолегованих гетеротранзисторів (СЛГТ) для формування сучасних НВЧ-схем. Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 413-419.
21. S. Novosyadlyj, B. Dzundza, V. Gryga, Sv. Novosyadlyj, M. Kotyk, V. Mandzyuk. Research into constructive and technological features of epi-taxial gallium-arsenide structures formation on silicon substrates // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2017. – N3/5 (87). – pp. 54 – 71.
22. Новосядлий С.П., Терлецький А.І., Фрик О.Б. Фізико-технологічні аспекти моделювання низькотемпературної епітаксії шаруватих структур кремнію та галію арсеніду // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2018. – № 1(37). – С. 92-102.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 20.09.2019 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Мойсишиним В.М.**, д.т.н., професором **Олійником А.П.***

## **RETROGRADE MULTI-CHARGE DUAL IMPLANTATION OF GaAs EPIC LAYERS ON MONO-Si SUBSTRATES**

**S. P. Novosyadlyy, Y. I. Pavliuk, S.V. Bastrykin,  
A. D. Semenyshyn**

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University;  
76018, Ivano-Frankivsk, Shevchenko str., 57;  
ph. +380 (342) 59-60-74*

*The article presents the results of experimental studies using multi-charge dual implantation of ions of different masses (silicon, sulfur, selenium) for the formation of retrograde concentration profiles of  $n + n$  of Schottky transistors, which increase the speed of LIC by 2.5-3 times.*

**Key words:** *multi-charge dual implantation, complex concentration profile of  $n + - n$  type, steepness of Schottky transistors, speed of LIC.*