

## РАДІАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРИ ФОРМУВАННІ СТРУКТУР ВІС

На основі досліджень приладних структур з використанням радіаційної технології іонного легування і  $\alpha$ -опромінення розроблені методи юстування порогових напруг МОН-транзисторів структур ВІС, а також методи формування активних областей високоенергетичною багатозарядною імплантацією іонів бору і фосфору. Досліджена радіаційна стійкість затворної системи структур ВІС до  $\alpha$ -опромінення і на цій основі розроблена математична модель накопичення заряду в підзатворному діелектрику.

In virtue of LSI circuits structures investigations using radiation technology of ion doping and  $\alpha$ -radiation the methods of alignment of gate voltages of MOS-FETs of LSI circuits structures and also methods of forming of active regions of high-energetic multicharged implantation of boron and phosphorus ions have been elaborated. Radiation firmness of gate system of LSI circuits structures to  $\alpha$ -radiation has been investigated and in virtue of this mathematical model of accumulation of charge in the undergate dielectric has been elaborated.

Із підвищенням ступеня інтеграції К-МОН ВІС підвищуються вимоги до прецизійності їх параметрів. Зниження напруги живлення з 5 В до 3 В і нижче вимагає зниження порогових напруг до  $1 \pm 0,1$  В, а при мінімальному розмірі елемента 1,5 мкм - до величини  $0,8 \pm 0,1$  В. Тому прецизійність параметрів високого рівня ВІС розглядають як один з основних принципів системної технології мікроелектроніки.

Для забезпечення бездефектного проектування ВІС на МОН-структурах з використанням високоякісної технології іонного легування виникла гостра необхідність розробки прогресивних методів юстування порогових напруг радіаційною обробкою, а саме: іонним легуванням і  $\alpha$ -опроміненням [1]. Висока точність підгонки вимагає також розробки експресних методів контролю малих доз іонного легування і  $\alpha$ -опромінення.

У сучасній технології високого рівня ВІС використовують 4 основних типи МОН-транзисторів: збагачені і збіднені  $n$ - і  $p$ -типу. Регулюючи провідність каналу, можна в широких межах змінювати рівень порогових напруг. При проектуванні ВІС МОН-транзистори збагаченого типу використовують в якості ключових, а збідненого типу – навантажувальних.

При нульовому зміщенні на Si-підкладці вирази для порогових напруг такі:

$$U_{Tn} = U_{FB} + 2|\Phi_p| + |Q_d|/C_{OX}, \quad (1)$$

$$U_{Tp} = U_{FB} - 2|\Phi_n| - |Q_d|/C_{OX}, \quad (2)$$

де  $U_{FB}$  – напруга плоских зон,  $\Phi_n$ ,  $\Phi_p$  – потенціали в Si-підкладці,  $C_{OX}$  – питома ємність підзатворного оксиду,  $Q_d$  – заряд у збідненій області МОН-структури.

Зазвичай, напруга плоских зон для обох типів транзисторів має завжди від'ємне значення, тому порогова напруга  $p$ -канального ЕМД завжди від'ємна. Однак для  $n$ -канального ЕМД МОН-транзистора, згідно з виразом (1), сума двох складових  $2|\Phi_p| + |Q_d|/C_{OX}$  повинна бути більшою напруги плоских зон  $|U_{FB}|$  для того, щоб  $U_{Tn} > 0$ . Якщо  $|U_{FB}| = 2|\Phi_p| + |Q_d|/C_{OX}$ , то  $U_{Tn} = 0$ . Тоді говорять про так званий "нульовий" транзистор. Отже, змінюючи концентрацію домішки в Si-підкладці, можна в певних межах змінювати порогову напругу як  $n$ -канальних, так і  $p$ -канальних транзисторів.

Порогову напругу можна змінювати не тільки дозою іонного легування Si-підкладки, але й товщиною підзатворного оксиду і величиною заряду в ньому. Так, збільшуючи товщину локального оксиду і підлегуювання Si-підкладки, збільшують до необхідної величини порогову напругу паразитних МОН-транзисторів. Зміна величини і знаку заряду в підзатворному оксиді хлорним оксидуванням або  $\alpha$ -опроміненням також забезпечує регулювання порогової напруги.

Змінювати порогову напругу можна також за допомогою напруги зміщення, що подається спеціально на Si-підкладку. У цьому випадку вираз для порогової напруги  $n$ -канального МОН-транзистора має вигляд:

$$U_{Tn} = U_{FB} + 2|\Phi_p| + \quad (3)$$

$$+ \sqrt{2\epsilon_s q N_B (2\Phi_p + U_{BS}) / C_{OX} + |Q_d| / C_{OX}},$$

де  $\epsilon_s$  – діелектрична стала напівпровідника,  $N_B$  – концентрація домішки,  $U_{BS}$  – напруга зміщення в Si-підкладинці.

У технології високого рівня ВІС (Н-МОН типу) для підгонки порогових напруг і усунення ефекту змикання використовують глибоке іонне легування домішкою Si-підкладинки (каналу). Для цього використовують високоенергетичну багатозарядну імплантацію. Імплантований шар  $p$ -типу запобігає утворенню змикання стік-витоків областей. Крім цього, рівень іонного легування (ІЛ) каналу забезпечує точну підгонку порогової напруги у межах  $\pm 0,1$  В. Як правило, глибина такого ІЛ повинна бути більшою двох глибин стік-витоків областей.

Для усунення явища каналовання іони імплантують через тонкий підзатворний діелектрик товщиною більше 300 Å. У цьому випадку порогова напруга визначається згідно з виразом:

$$U_{Tn} = U_{FB} + |\Phi_p| + |\Phi_{PS}| + qN / C_{OX} + \frac{1}{C_{OX}} \sqrt{2qN_B (|\Phi_{PS}| + |\Phi_p| + U_{BS}) - q^2 x_i N_B N}, \quad (4)$$

де  $\Phi_{PS} = kT/q \cdot \ln[(N_{Bi} + N_B)/n_i]$  – поверхневий потенціал іонно імплантованої області,  $N_{Bi} = N/x_i$  – доза імплантованої домішки;  $N$  – поверхнева концентрація атомів, що проникають у кремній при іонному легуванні. Отже, процес іонного легування каналу впливає на порогову напругу трьома способами: 1) спадом напруги на приповерхневій збідненій області  $|\Phi_{PS}| + |\Phi_p| + U_{BS}$ ; 2) лінійною залежністю від  $qN/C_{OX}$ ; 3) зменшенням заряду збідненої області на величину  $q^2 x_i N_B N$ . Найбільший вплив на зміну порогової напруги здійснює лінійна залежність від поверхневої концентрації атомів домішки іонного легування  $N$ .

Для забезпечення високої швидкодії у К-МОН ВІС як вхідні транзистори використовують  $n$ -канальні збагачені, а в якості навантажувальних резисторів –  $p$ -канальні збіднені, які забезпечують максимальний перепад напруг, тобто використовують МОН-транзистори з двома, трьома або п'ятьма рівнями порогових напруг.

Збіднені МОН-транзистори одержують із збагачених шляхом зсуву порогової напруги, при якому вона змінює свій знак, використовуючи

процес іонної імплантації домішки протилежного Si-підкладинці знаку. Тому додатна напруга  $n$ -канального збагаченого транзистора зменшується за величиною і стає від'ємною, якщо збільшувати дозу імплантованої домішки  $n$ -типу ( $P^+$ ,  $As^+$ ). Наразі зміна порогової напруги  $\Delta U_{Tn}$  буде від'ємною і дорівнює:

$$\Delta U_{Tn} = -qN / C_{OX}. \quad (5)$$

У  $p$ -канальних МОН-транзисторах іонне легування каналу акцепторною домішкою ( $B^+$ ) відносно його від'ємного значення збільшує порогову напругу  $\Delta U_{Tp}$  на величину:

$$\Delta U_{Tp} = +qN / C_{OX}. \quad (6)$$

Отже, дуже важливим для точного юстування порогових напруг МОН ВІС є розробка способів прецизійного дозування іонно імплантованої домішки та її контроль у процесі іонного легування для забезпечення необхідного рівня порогових напруг.

Для збільшення ступеня інтеграції ВІС дуже широко використовують правила масштабної мініатюризації з незмінним електричним полем. Таке масштабування структур ВІС вимагає прецизійного іонного легування як за дозою, так і за енергією введених іонів, а зменшення розмірів в  $\chi$  разів збільшує щільність компонування структур кристалів ВІС в  $\chi^2$  разів, зменшуючи при цьому затримки в  $\chi$  разів, а потужність розсіяння в  $\chi^2$  разів. Зменшення порогової напруги в  $\chi$  раз дозволяє у стільки ж разів знизити напругу живлення. Відповідно до цього ми розробили низку способів підгонки порогових напруг і методів контролю малих доз ІЛ, що використовуються в системній технології мікроелектроніки ВІС.

1. Застосування трифтористого бору  $BF_3$  ізотоп 10 для формування областей К-МОН структур [2].

При формуванні структур ВІС виникла необхідність зменшення глибини залягання стік-витоків областей  $p$ - $n$ -переходів і кишені К-МОН структур. Завдяки великому радіусу іонів  $BF_3$  ізотопу 10 коефіцієнт дифузії таких іонів зменшується на порядок, що дозволяє формувати переходи на невеликих глибинах (до 1 мкм).

Імплантацію іонів  $BF_3$  в кремнієві пластини КЕФ-4,5 (100) проводили на установці "Везувій 5" з використанням джерела іонів ОТМЗ.152.021. Енергія іонів складала від 20 до 75 кеВ при дозах 0,01-1, 20-60 і 250-750 мкКл/см<sup>2</sup>. Відпал-розгонку на глибину 1 мкм проводили при  $T=950 \div 1050^\circ C$  в атмосфері сухого, вологого кисню і азоту.

Результати досліджень дали можливість використати процес іонного легування для підгонки порогових напруг при малих дозах і формування стік-витоків областей і кишені К-МОН структур, а також прослідкувати за розподілом домішки в структурах кремнію залежно від дози іонного легування, температури і часу дифузії. Отримані температурно-часові залежності поверхневого опору дифузійних шарів від дози ІЛ для різних режимів розгонки домішки.

2. Метод експрес-контролю іонного легування бору і фосфору малими дозами [3].

Для забезпечення точного юстування порогових напруг в системній технології мікроелектроніки ВІС ми розробили експрес-контроль за допомогою вимірювання провідності каналу МОН-транзистора. Для цього використано спеціальну трафаретну систему (ТС), яку формували з використанням шаблону для стік-витоків областей і шаблону для формування каналу. Енергія домішки змінювалась від 20 до 100 кеВ, а доза - від 0,01 до 1,25 мкКл/см<sup>2</sup>. Як підкладки використовували Si-пластини КДБ-80 (100), КДБ-10 (100), КЕФ-4,5 (100), КЕФ-4,5 (111). Розгонку й активацію домішок проводили при  $T=950\div 1200^\circ\text{C}$ .

Результати досліджень дали можливість виявити характер розподілу домішок В<sup>+</sup> і Р<sup>+</sup> у структурах ІС серії 564 залежно від дози іонного легування, яка визначається через поверхневий опір каналу  $R_S$  виразом:

$$D = aR_S^{-b}, \quad (7)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що визначається режимом активації домішки. Рівняння (7) дозволяє розраховувати малі дози ІЛ в діапазоні доз трьох порядків від 0,01 до 10 мкКл/см<sup>2</sup>. Така залежність зображена на рис.1. Експериментально встановлено, що коефіцієнт  $b$  для В<sup>+</sup> дорівнює 1,25, а для Р<sup>+</sup> – 1,07. Для конкретної установки і джерел ІЛ коефіцієнти  $a$  і  $b$  визначали експериментально. Вираз для дози ІЛ залежно від провідності каналу має вигляд:

$$D = (L\sigma/W)^b, \quad (8)$$

де  $L$ ,  $W$  і  $\sigma$  – довжина і ширина каналу (резистора) і його провідність.

Досліджено також температурно-часові залежності провідності каналу і кореляцію навантажувального резистора з провідністю каналу для  $n$ - і  $p$ -канального транзисторів.

Цей метод використовують для експресного контролю малих доз іонного легування В<sup>+</sup> і Р<sup>+</sup> з точністю 3-5%.

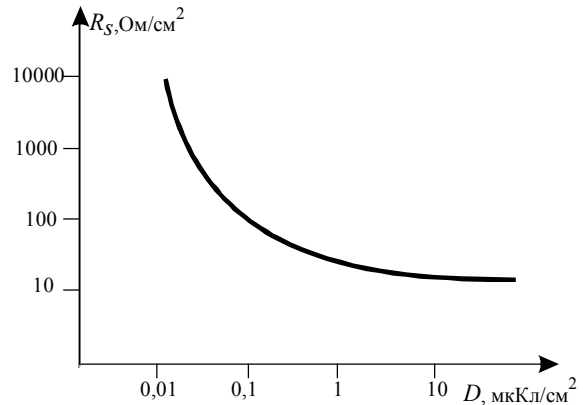


Рис.1. Залежність поверхневого опору каналу МОН-транзистора від дози іонного легування.

3. Спосіб визначення малих доз іонного легування з використанням тестової МОН-структури.

Цей метод використовується безпосередньо в процесі ІЛ малими дозами [4]. Як робочі пластини використовують Si-пластини КДБ-80 (100). Для спостереження і фіксації чіткого мінімуму ємності на імпульсних  $CV$ -характеристиках ці ТС попередньо легують шляхом іонної імплантації домішкою з електронним типом провідності (Р<sup>+</sup>, As<sup>+</sup>). Разом з партією робочих пластин контрольні пластини з ТС проходять операції хімічної обробки, оксидування під затвор до товщини 100 Å, іонного легування Р<sup>+</sup> дозою 0,15 мкКл/см<sup>2</sup> з енергією 100 кеВ, при цьому частина ТС закривалась екраном. Потім на контрольних пластинках проводили відпал-стабілізацію при 900°C з наступним вимірюванням імпульсних нерівноважних  $CV$ -характеристик зі швидкістю розгортки напругою  $10^5\text{-}10^7$  В/с. Для зміщення поверхні у стан інверсії (збіднення) використовували джерело сталої напруги. Малу дозу ІЛ каналів для юстування порогової напруги МОН-транзисторів знаходять із залежності:

$$D = \frac{\Delta U_T C_{OX}}{q}, \quad (9)$$

де  $\Delta U_T$  – величина зсуву порогової напруги на легованій і нелегованій частинах ТС.

На рис.2 зображені нерівноважні імпульсні вольт-фарадні характеристики у випадку фоновішого попереднього легування ТС домішкою з концентрацією, близькою до концентрації Si-підкладки (рис.2а), і з концентрацією значно більшою домішки у Si-підкладці (рис.2б).

4. Спосіб підгонки тонкоплівкових резисторів [5].

При виготовленні прецизійних ВІС для формування резисторів використовують тонкоплівкову технологію на основі легованого  $\beta$ -танталу,

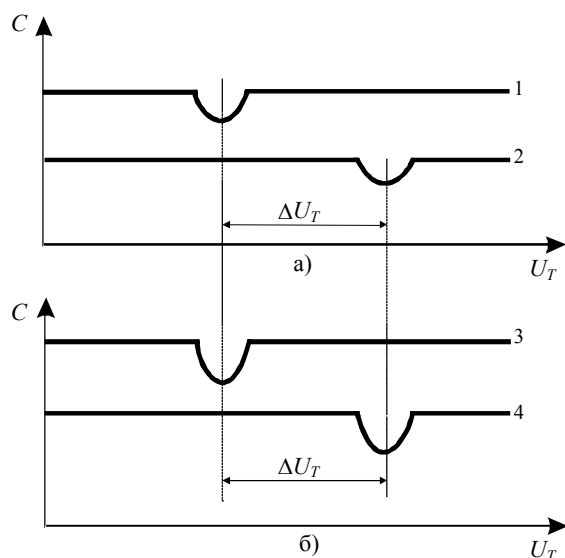


Рис.2. Нерівноважні імпульсні вольт-фарадні характеристики у випадку фонового попереднього легування ТС домішкою з концентрацією, близькою до концентрації Si-підкладки (а), і з концентрацією значно більшою домішки у Si-підкладці (б). ВФХ, заміряні на нелегованій (1,3) і легуваній (2,4) контрольною домішкою частинах ТС.

полікремнію або керметних матеріалів, які осаджуються поверх міжшарової ізоляції перед металізацією структур. Для зміни величини опору тонкоплівкових резисторів як у сторону збільшення, так і в сторону зменшення номіналу і поліпшення температурної стабільності ТКО, підгонку резисторів проводять ІЛ домішки до концентрації 0,01-30% ат. із ряду елементів 1б, Пб, Ш, IV, V, VIa, VIIa, VIIIa. Після ІЛ проводиться термовідпал резисторів при  $T=150-300^{\circ}\text{C}$  в атмосфері повітря або кисню. Визначення дози ІЛ проводиться через величину поверхневого опору резистора згідно з виразом (9).

5. Експресний метод контролю малих доз ІЛ за зміною фізичних параметрів фоторезистивної плівки [6].

Цей метод базується на використанні залежності електрофізичних параметрів плівки резиста від величини і енергії іонного опромінення (доз), що дозволяє з високою точністю визначати дозу ІЛ домішки у структурі ВІС для юстування порогових напруг МОН-транзисторів, зміни електричних параметрів тонкоплівкових резисторів і конденсаторів. Процес опромінення резисту дозою ІЛ приводить до зшиття або перегрупування молекул домішки, що вводиться у фоторезист для підвищення його чутливості і контрастності. Це відповідно приводить до зміни параметрів плівок резисту: швидкість розчинення збільшується, адгезія до кремнію і до  $\text{SiO}_2$  збільшується,

діелектрична проникність збільшується, коефіцієнт заломлення знижується, плазмостійкість підвищується, коефіцієнт пропускання зменшується. Тому, використовуючи графіки залежностей електрофізичних параметрів (наприклад, коефіцієнта пропускання) плівки резисту від дози і енергії імпантованих іонів експресно по ТС, розміщеній на Si-пластині, визначають малі дози ІЛ каналів МОН-транзисторів у межах  $0,04-10$  мкКл/см<sup>2</sup>.

6. Модифікований чотиризондовий метод контролю малих доз іонного легування [7].

Методологія методу полягає у використанні лінійної залежності питомого опору від щільності радіаційних дефектів, утворених імпантованими домішками певної дози. Для цього використовують ТС у вигляді контрольних пластин-супутників КЕФ-4,5 (100) або КДБ-45 (100) відповідно до легуючих домішок  $\text{P}^+$ ,  $\text{As}^+$  або  $\text{B}^+$ . Для отримання високої відтворюваності експериментальних даних необхідно усунути вплив ІЛ шару. Цього досягають за рахунок технології подвійного іонного легування.

Контроль дози здійснюють двома етапами ІЛ. На першому етапі порівняно велику дозу  $D_1$  ( $10-100$  мкКл/см<sup>2</sup>) імпантують у підкладку протилежного типу провідності й активують для створення *p-n*-переходів на відносно невеликій глибині ( $0,5-0,8$  мкм) з використанням чотиризондового методу для вимірювання поверхневого опору  $R_{S1}$ .

На другому етапі визначають малу дозу  $D_2$  ( $0,05-1,0$  мкКл/см<sup>2</sup>). Тут виконують імпантацію домішки дозою  $D_2$  протилежної провідності у підготовлену Si-підкладку (з попереднім легуванням) і вимірюють поверхневий опір  $R_{S2}$  без проведення активації. При малих дозах іонного легування щільність утворених радіаційних дефектів пропорційна дозі опромінення. На цьому етапі визначають зміну поверхневого опору  $\Delta R_S = R_{S2} - R_{S1}$ , а питомий опір опроміненого матеріалу буде лінійно зростати зі збільшенням дози іонного легування  $D_2$ . Для одержання достатньої чутливості й відтворюваності результатів необхідно виконати умову  $E_1 > E_2$  на 10-20%, а доза легування  $D_1 > D_2$  на два порядки. На рис.3 зображений графік лінійної залежності  $\Delta R_S(D_2)$  для певних значень доз  $D_1$ , за яким і визначаються малі дози ІЛ. Таке подвійне легування ТС забезпечує високу точність визначення малої дози ІЛ (3-5%), що відповідає точності підгонки порогових напруг  $0,9 \pm 0,1\text{В}$ .

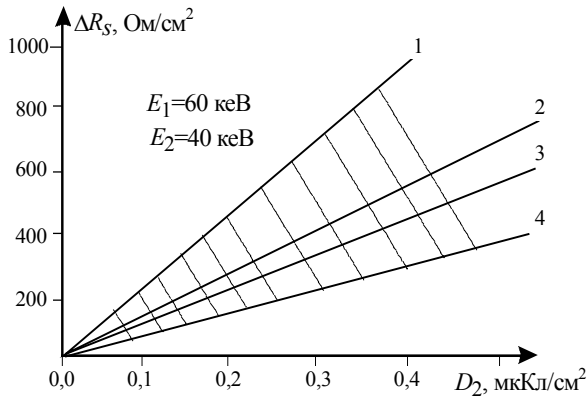


Рис.3. Залежність зміни поверхневого опору від іонного легування дозою  $D_2$ .

$D_1=15$  мкКл/см<sup>2</sup> (1),  $D_1=20$  мкКл/см<sup>2</sup> (2),  
 $D_1=25$  мкКл/см<sup>2</sup> (3),  $D_1=30$  мкКл/см<sup>2</sup> (4).

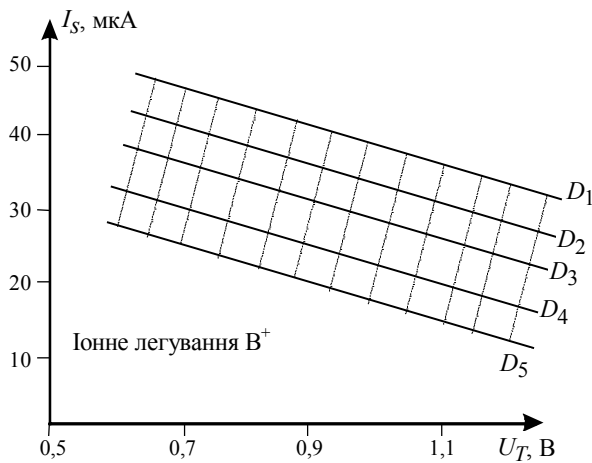


Рис.4. Залежність струму стоку при різних дозах ( $D_5 > D_4 > D_3 > D_2 > D_1$ ) імплантації каналу МОН-транзистора збідненого типу комплементарної пари.

7. Підгонка порогової напруги комплементарної пари МОН-транзисторів [7].

В елементну базу сучасних МОН ВІС входять комплементарні пари МОН-транзисторів збагаченого і збідненого типу. Такі МОН-транзистори обох типів провідності виготовляються в єдиному технологічному циклі і тільки для МОН-транзистора збідненого типу проводять додаткову іонну імплантацію для створення вбудованого каналу. Як правило, таку комплементарну пару збагаченого і збідненого транзисторів ( $n$ - або  $p$ -типу) використовують у  $n$ - або  $p$ -канальних МОН ВІС із захованим контактом. МОН-транзистори збагаченого типу використовують як вхідні, а збідненого типу забезпечують відповідне навантаження. Це означає, що між пороговою напругою вхідного транзистора  $U_T$  і струмом стоку  $I_c$  навантажувального транзистора існує залежність.

Дослідження залежності  $I_c(U_T)$  показує, що коефіцієнт кореляції між  $I_c$  та  $U_T$  складає 0,98-0,99, а

це вказує на сильну параметричну залежність між ними. Параметри лінійного рівняння  $I_c=A-B|U_T|$  оцінені методом найменших квадратів:  $A=100$  мкА,  $B=44$  мкА/В. Залежність  $I_c(U_T)$  має такий вигляд:

$$I_c = \frac{W}{L} \mu C_{OX} (U_1^2 \pm 2U_1U_T), \quad (10)$$

де  $\mu$ ,  $U_1$  – рухливість і напруга відсічки навантажувального МОН-транзистора. Тобто, струм стоку збідненого транзистора  $I_c$  лінійно залежить від порогової напруги збагаченого транзистора  $U_T$  і для різних доз ІЛ спостерігається паралельний зсув прямих на певну величину струму стоку (рис.4).

Отже, статистичний аналіз кореляційної залежності струму стоку збідненого транзистора і порогової напруги збагаченого типу в комплементарній парі тестових МОН-транзисторів, а також запропонована модель  $I_c(U_T)$  дозволяють оптимізувати допуски за малою дозою ІЛ на основі статистичних параметрів МОН-транзисторів. При заданих межах розкиду струму стоку  $\Delta I_c=10 \pm 2$  мкА можна забезпечити 5% точність за малою дозою іонного легування.

#### Формування активних елементів ВІС багатозарядними іонами бору і фосфору

Останніми роками дослідження і модернізація процесів іонного легування поширились в область високих енергій 0,15-1,0 МеВ. Виготовлення структур ВІС високого ступеня інтеграції вимагає як розробки нових процесів іонної імплантації, так і нових джерел ІЛ, а саме:

- легування малими дозами іонів  $B^+$ ,  $P^+$  з енергіями 150-300 кеВ для запобігання явищу змикання короткоканальних МОН-транзисторів, так звана "глибока підгонка" при реалізації Н-МОН технології;
- легування малими дозами іонів  $B^+$  з енергією 200-300 кеВ для формування ретроградної області кишені і охоронних областей локального оксиду з метою усунення явища пташинного дзьобу;
- легування великими дозами іонів  $B^+$  і  $P^+$  через оксид з енергією 150-300 кеВ для формування стік-витоків областей МОН-транзисторів;
- легування великими дозами для формування захованого шару, бази, глибокого колектора і емітера;
- високоенергетичної імплантації кисню для створення ізоконцентраційної домішки при прискореному прооксидуванні полікристалічного Si.

Проте існуюче обладнання іонної імплантації може забезпечити максимальну енергію іонів лише до 150-200 кеВ. Тому використання багатозарядних іонів бору і фосфору, які забезпечують збільшення енергії за рахунок використання багаторазової іонізації атомів, забезпечує реалізацію таких процесів на існуючому обладнанні іонної імплантації.

У цій роботі досліджено можливості використання установок іонного легування "Везувій 8" і "Лада 30" при легуванні багатозарядними іонами бору і фосфору дозами  $0,05 \div 800$  мкКл/см<sup>2</sup>. Така технологія відкриває широкі можливості формування структур ВІС.

Для контролю якості сепарації іонів і їх ідентифікації одержували мас-спектри для червоного фосфору і трифтористого бору при  $U_{\text{вит}}=30$  кеВ на установці "Лада 30". Для одержання *n*-зарядних іонів використовували такі співвідношення: енергія імплантації  $E=(U_{\text{вит}}+U_{\text{приск}}) \cdot n$ ; доза легування  $D_n=D \cdot n$ ; струм мас-сепаратора  $I_n=I_1 \sqrt{n}$ .

Використання двозарядних іонів бору  $B^{++}$  і фосфору  $P^{++}$  дозволяє вже при енергії  $E=120$  кеВ забезпечити глибину залягання домішки у кремнієвих пластинах КЕФ 4,5 (100) і КДБ 10 (100) при дозі  $0,2$  мкКл/см<sup>2</sup>  $0,2-0,35$  мкм з максимальною концентрацією  $N_{\text{max}}=10^{17}$  см<sup>-3</sup> (рис.5). Тобто технологія легування двозарядними іонами бору і фосфору дозволяє підвищити енергію імплантації у два рази без доробки прискорюючої системи установки "Лада 30" і використати дані процеси для глибокої підгонки порогових напруг транзисторів у Н-МОН технології високого рівня ВІС, а також удосконалити технологію формування кишени і локального оксиду в структурах К-МОН ВІС. Таке глибоке іонне підлегкування каналів *n*-каналних транзисторів домішкою *p*-типу ( $B^{++}$ ) на глибину більшу в 1,5 рази стік-витоківих

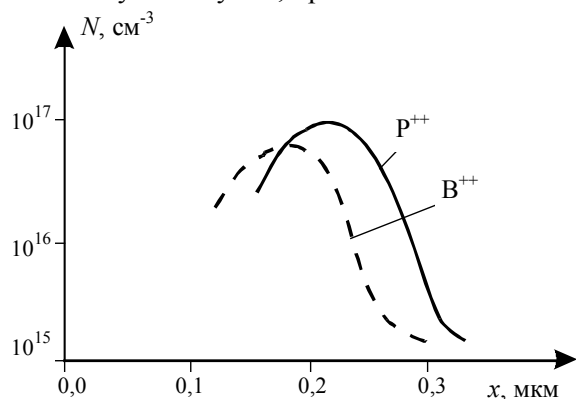


Рис.5. Концентраційні іонно-імплантовані профілі двозарядних іонів  $B^{++}$  і  $P^{++}$  при  $E=120$  кеВ,  $D=0,2$  мкКл/см<sup>2</sup>.

областей дозволило усунути явище змикання каналів при формуванні структур пам'яті КР 132 РУ5, РУ8, РУ9 з використанням Н-МОН технології.

Однією із важливих проблем, які виникають при масштабуванні структур ВІС з використанням К-МОН технології, є забезпечення стійкості структур до явища тиристорного ефекту із зменшенням віддалі між *n*- і *p*-каналними транзисторами.

Для забезпечення стійкості ВІС до цього ефекту використовують кисневе гетерування чи гетерування золотом для зменшення часу життя неосновних носіїв і коефіцієнта підсилення латерального транзистора *p-n-p* типу або епітаксійний легований шар для зниження опору Si-підкладки. Проте з використанням цих технологічних прийомів збільшується кількість операцій, цикл виготовлення структур та їх дефектність.

В існуючій технології К-МОН ВІС розгонка кишени проводиться перед формуванням локального оксиду і триває 10-15 годин при  $T=1150^\circ\text{C}$  при глибині кишени 6-8 мкм. Для системної технології високого рівня ВІС такий процес необхідно замінити низькотемпературним. При формуванні кишени у кремнії на такій глибині необхідно точно витримати поверхневу концентрацію напруги МОН-транзистора. Значна глибина кишени і велика величина латеральної дифузії вимагає розміщення *p*- і *n*-каналних транзисторів на віддалі більше 10 мкм, що веде до збільшення площі кристала і введеної дефектності. Зі збільшенням глибини кишени та її поверхневого опору при сталій поверхневій концентрації домішки різко зростає ймовірність появи тиристорного ефекту.

Технологія іонного легування багатозарядними іонами дозволяє формувати кишеньку невеликої глибини з низьким опором з повним пригніченням тиристорного ефекту. У зв'язку з цим важливим є дослідження процесу формування кишени невеликої глибини багатозарядними іонами бору  $B^{++}$  або  $B^{+++}$ . Переваги такої технології такі:

- поверхнева концентрація, що визначає порогову напругу, опір і глибина *p-n*-переходу можуть змінюватись незалежно один від одного при зміні дози і енергії імплантованих іонів;
- імплантацію кишени проводять після формування локального оксиду одночасно з формуванням охоронних  $p^+$ -областей, що практично усуває латеральну дифузію бору в охоронних

областях, не змінюючи розмірів активних зон транзисторів;

- унікаємо високотемпературної і довготривалої розгонки кишени, зменшуємо введenu дефектність.

Багатозарядна технологія іонної імплантації спрощує технологічний процес формування структур К-МОН ВІС майже на вісім операцій і дозволяє зменшити віддаль між  $p$ - $n$ -переходами кишени і витоковою областю до 5 мкм (у два рази). Таку технологію досліджували на ТС комплементарних пар  $n$ - і  $p$ -каналних транзисторів. ТС формувались на Si-пластинах КЕФ 4,5 (100).  $P$ -кишені й  $p^+$  охоронні області локального оксиду формували одночасно після локального оксидування на глибину 0,8 мкм. Для надійного маскуванню двозарядних іонів бору використовували поліамідну маску. Імплантацію іонів бору  $B^{++}$  проводили на установці "Лада 30" у режимі  $E=300$  кеВ і дозі  $D=1\div 5$  мкКл/см<sup>2</sup>. Залежності коефіцієнта підсилення латерального транзистора  $V_{CT}$  і поверхневого опору  $p$ -кишені  $R_S$  зображені на рис.6,7. Видно, що технологія формування

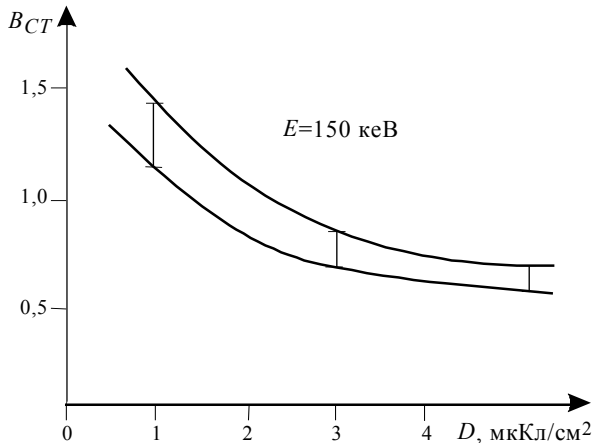


Рис.6. Залежність коефіцієнта підсилення латерального  $p$ - $n$ - $p$  транзистора від дози легування  $B^{++}$ .

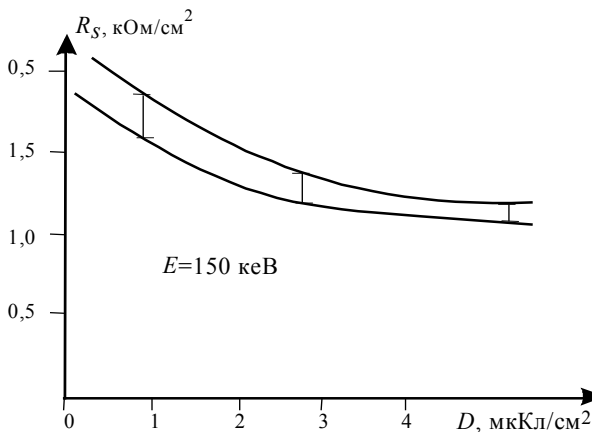


Рис.7. Залежність поверхневого опору  $p$ -кишені від дози іонного легування  $B^{++}$ .

К-МОН структур багатозарядними іонами є реальною. Для цього необхідно лише розробити високоенергетичні установки іонної імплантації на глибину 2-3 мкм. Великий розкид параметрів  $U_T$ ,  $V_{CT}$ ,  $R_S$  пов'язаний з неоднорідністю ІЛ, що зумовлено недостатньою сепарацією іонів  $B^{++}$  і чистотою вакуумної системи.

Дана технологія є унікальною для формування структур НВІС, особливо тривимірних, бо не потребує використання високотемпературних операцій розгонки кишени й охоронних областей та утворення пташинного дзьобу. Це дозволяє підвищити не тільки степiнь інтеграції ВІС, але й значно покращити електричні характеристики приладних структур і уникнути явища тиристорного ефекту завдяки зниженню коефіцієнта підсилення латерального  $p$ - $n$ - $p$  транзистора. На рис.8 представлені варіанти формування кишени й охоронних областей в К-МОН структурах з використанням іонного легування багатозарядними іонами  $B^{++}$  через локальний і підзатворний оксиди (рис.8а), через оксид і полікремній (рис.8б), після формування полікремнієвої затворної системи (рис.8в).

Отже, використовуючи багатозарядні іони  $B^{++}$ ,  $V^{+++}$  і фосфору  $P^{++}$ ,  $P^{+++}$  можна забезпечити не тільки надійну локальну ізоляцію ( $U_T$  паразитного транзистора більше 25 В), але й формувати Н-МОН і К-МОН структури ВІС, які стійкі до тиристорного ефекту і змикання стік-витокових областей. Високоенергетична імплантація кисню забезпечує прискорене анізотропне прооксидування легованого полікремнію. Для освоєння такої технології у серійному виробництві необхідні високоенергетичні імплантатори, які забезпечують енергію  $E=200$  кеВ÷1 МеВ, і надійна маска з поліамідних композицій. Для системної технології мікроелектроніки ВІС необхідно удосконалити математичну модель імплантації багатозарядними іонами.

### Радіаційний метод підгонки порогових напруг МОН-транзисторів $\alpha$ -опроміненням

На всіх етапах виробництва і випробувань напівпровідникових приладів та інтегрованих схем опромінення приводить до утворення і відпалу дефектів структури, а також до релаксації нерівноважних атомних конфігурацій і активації різних квазіхімічних реакцій [9].

Опромінення монокристалічного кремнію  $\alpha$ -,  $\beta$ - чи  $\gamma$ -променями дає можливість впливати на зміну електрофізичних параметрів приладних структур ВІС.

Коли при взаємодії випромінювання з матеріалами структури ВІС відбувається іонізація, то випромінювання називають іонізуючим. До іонізуючих випромінювань належать потоки легких частинок і електромагнітних квантів. Серед них –  $\gamma$ -,  $\beta$ -,  $\alpha$ -, рентгенівське, ультрафіолетове випромінювання, потік позитронів. У випадку кремнію основною дією іонізуючого випромінювання є генерація нерівноважних електронно-діркових

пар, які змінюють електрофізичні параметри структур ВІС.

При виготовленні НВІС у системній технології мікроелектроніки використовують радіаційні технології: електронну, іонну і рентгенівську літографію, іонну імплантацію, ультрафіолетове експонування, електронно-променеве наплення металів, плазмохімічне осадження діелектриків та металів, підгонку порогових напруг іонним

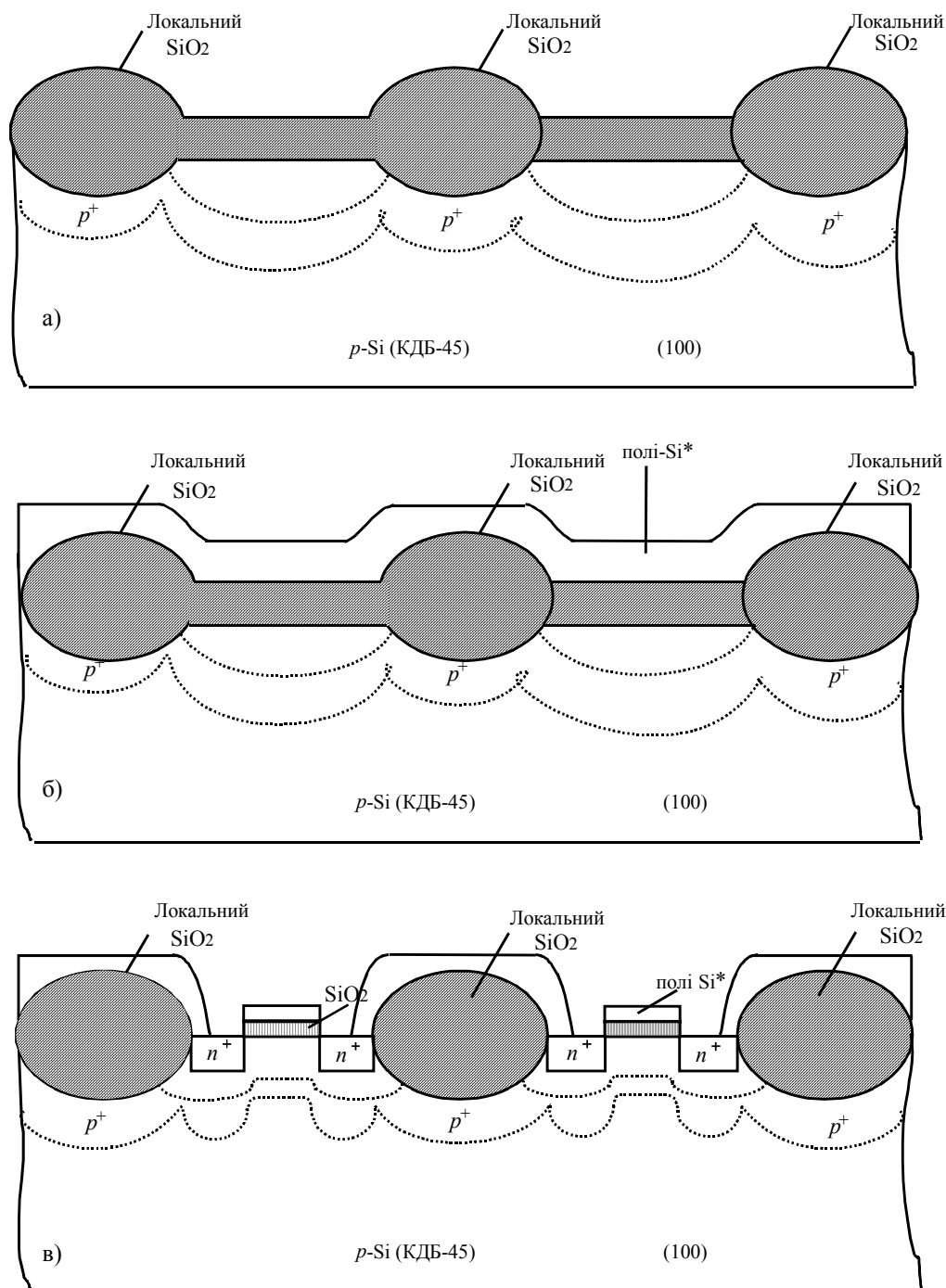


Рис.8. Формування активних зон МОН ВІС ІЛ багатоза-рядними іонами бору  $\text{B}^{++}$ : через локальний оксид (а), через локальний оксид і полі  $\text{Si}^*$  (б), після формування локального оксиду і полікремнієвого затвору (в).



легуванням або  $\alpha$ -опроміненням. Величина дози поглинання  $D_n$  іонізуючого випромінювання за один технологічний цикл складає  $10^4 \div 10^6$  рад. Оскільки довжина вільного пробігу електронів і  $\alpha$ -частинок, що використовуються в таких процесах, складає 2-8 мкм, то частина електронів або  $\alpha$ -частинок обов'язково буде іонізувати як діелектрик, так і напівпровідник. У випадку рентгенівської або електронної літографії глибина проникнення складає 5-16 мкм. Надзвичайно важливою для радіаційної технології є розробка математичної моделі накопичення заряду в діелектрику і зміни концентрації носіїв в області просторового заряду  $p$ - $n$ -переходу чи МОН-структури.

Отже, актуальною задачею є розробка фізико-математичної моделі накопичення заряду в діелектрику МОН-структури, а також дослідження впливу  $\alpha$ -опромінення на електрофізичні параметри приладних структур ВІС.

Наявність границь розділу між шарами приладних структур, які мають різні механічні, оптичні, електрофізичні властивості визначають особливі електрофізичні характеристики всієї системи і конкретну специфічну чутливість до радіаційної обробки, яка проявляється в ефектах: утворення позитивного заряду  $Q_f$  у діелектрику; накопичення заряду поверхневими станами  $Q_{SS}$  на границі розділу діелектрик-напівпровідник; формування точкових радіаційних дефектів в напівпровіднику.

У МОН-структурах, які сформовані на монокремнію при малих дозах радіації до  $10^5$  рад в основному проходить утворення позитивного заряду в підзатворному діелектрику  $\text{SiO}_2$ . При дозах, що більші  $10^5$  рад проявляються поверхневі стани, які змінюють заряд  $Q_{SS}$ . Точкові радіаційні дефекти в кремнію з'являються при дозах, більших  $10^7$  рад.

Оскільки рухливість дірок менша рухливості електронів у кремнію, електрони виходять із діелектрика, а дірки захоплюються пастками й утворюють позитивні заряди. Накопичення позитивного заряду в  $\text{SiO}_2$  суттєво змінює порогову напругу МОН-транзисторів і спричиняє збільшення струмів втрат між стік-витоківими областями. У випадку МДН-елементів пам'яті це змінює рівень запису і злічення інформації. У ВІРІС, утворений заряд поблизу переходу емітер-база підсилює рекомбінаційні процеси неосновних носіїв у базі, що призводить до зменшення коефіцієнта підсилення біполярних транзисторів.

При опроміненні кремнію зарядженими частинками високих енергій ( $\alpha$ -частинки) утворюється неоднорідний по глибині розподіл радіаційних дефектів, які можна використати для локальної зміни параметрів напівпровідника і створених на його основі приладних структур [7].

Радіаційну обробку приладних структур ВІС проводили на спеціалізованій установці АОИС-17Б з радіонуклідними джерелами  $\alpha$ -опромінення  $^{238}\text{Pu}$ , яка забезпечує стабільність параметрів поля випромінювання, можливість зміни режимів радіаційної обробки, високу технологічність, безпеку й простоту експлуатації. Установка  $\alpha$ -опромінення АОИС-17Б виконана на базі напилювальної установки УВН-75Р2 і містить опромінювач з  $\alpha$ -джерелом, камеру опромінення з вікном для візуального спостереження, систему вакуумного відкачування, тримач приладних структур (Si-пластин) з системою обертання і підігрівання, пульт управління з радіометричним приладом і датчиком детектування  $\alpha$ - і  $\gamma$ -випромінювання. Попередньо установку калібрували з допомогою робочих дозиметричних (полімерних) плівок типу ЦДП-4-2, у яких після  $\alpha$ -опромінення за допомогою спектрометра СФ-26 вимірювали оптичну щільність у залежності від інтегрального потоку  $\alpha$ -частинок для конкретних джерел АИПЕЛ-3, АИПЕЛ-4.

Кремнієві пластини зі структурами ВІС опромінювали на установці АОИС-17Б незфокусованим потоком  $\alpha$ -частинок з енергією 5,5 МеВ від джерела  $^{238}\text{Pu}$  при кімнатній температурі. Для одержання необхідних величин електрофізичних параметрів густина потоку складала  $5 \cdot 10^7$  см<sup>2</sup>/(В·с), доза  $1,2 \cdot 10^{10} \div 1,4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>. Висока рівномірність і стабільність опромінення досягається за рахунок термостабілізації  $\alpha$ -джерела і обертання підкладкотримача.

Ми дослідили вплив  $\alpha$ -опромінення на характеристики  $p$ - $n$ -переходів ТС і МОН-структур, а на цій основі розробили технологію юстування порогових напруг Н-МОН і К-МОН структур ВІС (серії КР580, КР132, КР1830) і фізико-математичну модель накопичення заряду в підзатворному діелектрику.

**Фізико-математична модель накопичення заряду в підзатворному діелектрику і дослідження впливу  $\alpha$ -опромінення на електрофізичні параметри приладних структур ВІС**

Накопичення об'ємного заряду в підзатворному діелектрику – головний фізичний ефект, що виникає у МОН-структурі при дії стаціонар-

ного випромінювання і приводить до зміни напруги плоских зон. Воно зумовлене дефектами структури і наявністю різних домішок у діелектрику, які можуть бути як пастками для електронів і дірок, так і центрами рекомбінації. У підзатворному діелектрику SiO<sub>2</sub>, товщиною 100-500 Å переважають дефекти, які створюють донорні рівні (пастки для дірок) у забороненій зоні. Внаслідок іонізуючої дії α-частинок у підзатворному діелектрику накопичується позитивний заряд, який концентрується поблизу границь розділу з кремнієм і електродом затвора.

Модель Мітчела [9] передбачає, що накопичення заряду в діелектрику МОН-структури відбувається тільки в одній області поблизу катода; дірки миттєво захоплюються пастками і стають нерухомими; фотострум зумовлений тільки дрейфом електронів і лінійно залежить від електричного поля; інжекція носіїв з электродів відсутня.

Однак ця модель не пояснює накопичення заряду в діелектрику при відсутності електричного поля. Необхідно створити таку фізико-математичну модель, яка б описувала накопичення заряду при іонізуючому α-опроміненні. Вважатимемо, що заряд може накопичуватись одночасно у двох областях діелектрика, як зі сторони напівпровідника, так і зі сторони затворного електрода. Модель враховує два типи дефектів, які приймають участь у рекомбінаційних процесах (донорний і акцепторний), різну рухливість електронів і дірок, дрейфову і дифузійну складові струму в діелектрику. Для побудови моделі визначимо допустимі межі її використання:

1. Рекомбінація електронів і дірок характеризується часом їх життя, усередненим в об'ємі діелектрика.

2. Концентрація донорних і акцепторних рівнів в області об'ємного заряду настільки велика, що час життя електронів і дірок не залежні один від одного.

3. Об'ємний заряд вільних електронів і дірок, що генерується α-опроміненням, малий порівняно з об'ємним зарядом, що захоплений пастками.

4. Висота потенційного бар'єра на міжфазних границях настільки велика, що носії, які досягли цих границь, покидають діелектрик.

5. Час встановлення дифузійно-дрейфової рівноваги більший часу встановлення рекомбінаційної рівноваги.

6. Спад напруги на напівпровіднику і фіксований поверхневий заряд на міжфазній межі Si-SiO<sub>2</sub> відсутні, контактна різниця потенціалів дорівнює нулю (плоскі зони).

7. Ширина  $W$  і довжина  $L$  діелектрика набагато більші його товщини  $d_0$  так, що електричне поле не залежить від координат  $y, z$ .

Тоді рівняння для густин струмів і рівняння неперервності можна записати так:

$$J_{ni} = \mu_n q n E_i + \mu_n \varphi_t q \frac{\partial n}{\partial t}, \quad (11)$$

$$J_{pi} = \mu_p q p E_i - \mu_p \varphi_t q \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \frac{E_i}{\varphi_t} \frac{\partial \Delta n}{\partial x} - \frac{\Delta n}{L_n^2} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \frac{E_i}{\varphi_t} \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \frac{\Delta p}{L_p^2} = 0, \quad (14)$$

де  $i=1,2,3$ ;  $\Delta n=n-n_0$ ,  $\Delta p=p-p_0$ ;  $n, p$  – концентрації електронів та дірок у діелектрику;  $n_0=qP\tau_n$ ,  $p_0=qP\tau_p$  – усталені концентрації електронів і дірок у діелектрику при  $d_0 \gg L_n, L_p$ ;  $q$  – швидкість генерації електронно-діркових пар;  $P$  – потужність дози α-опромінення;  $L_p=(\varphi_t \mu_p \tau_p)^{1/2}$ ,  $L_n=(\varphi_t \mu_n \tau_n)^{1/2}$  – дифузійні довжини дірок і електронів;  $(\varphi_t)$  – температурний потенціал;  $\mu_n, \mu_p$  – рухливості електронів і дірок.

За певних крайових і початкових умов розв'язок цих рівнянь дасть фізико-математичну модель накопичення заряду в підзатворному діелектрику МОН-структур α-джерелом потужності  $P$ .

Зміну характеристик кремнієвих  $p$ - $n$ -переходів і біполярних транзисторів під дією α-частинок досліджували на спеціально сформованих ТС з використанням стандартної технології ІС серії 140. ВАХ  $p$ - $n$ -переходів вимірювали в інтервалі струмів  $10^{-8}$ ÷ $10^{-3}$  А (прямі гілки) і  $10^{-8}$ ÷ $10^{-5}$  А (зворотні гілки) при зміні напруги від 0 до 15 В. Експериментальні залежності ВАХ для діодних структур до і після опромінення різними дозами зображені на рис.9. Для неопромінених зразків  $m$ -фактор ( $m=1,23$  для  $p$ -Si,  $m=1,41$  для  $n$ -Si) вказує на переважаючу роль дифузійної складової для  $p$ -Si і значний вклад генераційно-рекомбінаційних процесів для  $n$ -Si. При опроміненні α-частинками таких ТС по глибині структур утворюються неоднорідні за розподілом радіаційні дефекти, які суттєво впливають на генераційно-рекомбінаційні процеси. Поява радіаційних дефектів з рівнями  $E_1, E_2, E_3$ , які проявляють акцепторну дію, приводить до зменшення провідності базової області ( $n$ -Si). Однак при дозі  $3 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup> спостерігається зниження  $m$ -фактора з величини

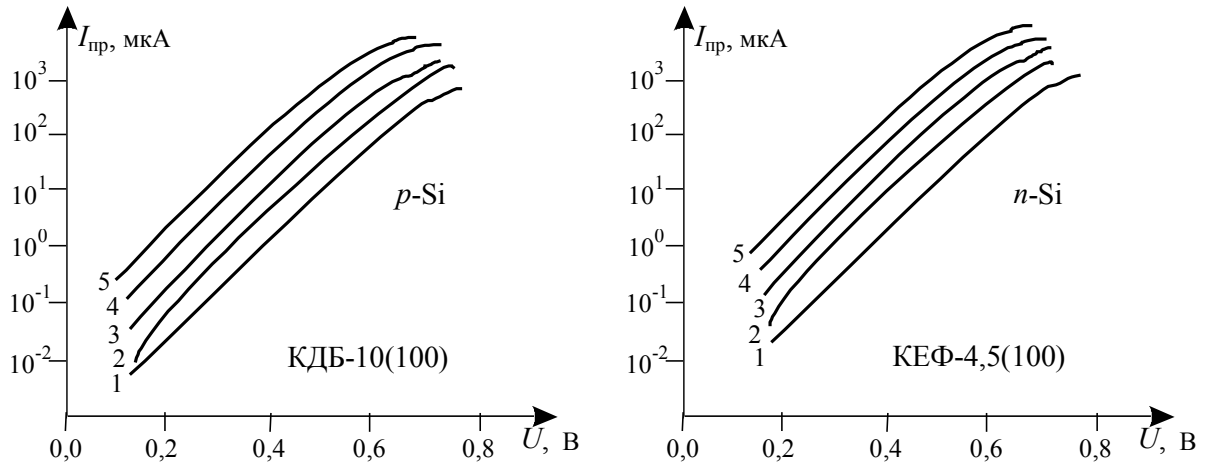


Рис.9. Прямі ВАХ  $p-n$  переходів до (1) і після радіаційної обробки  $\alpha$ -частинками потоком:  $1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (2),  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (3),  $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (4),  $14 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (5).

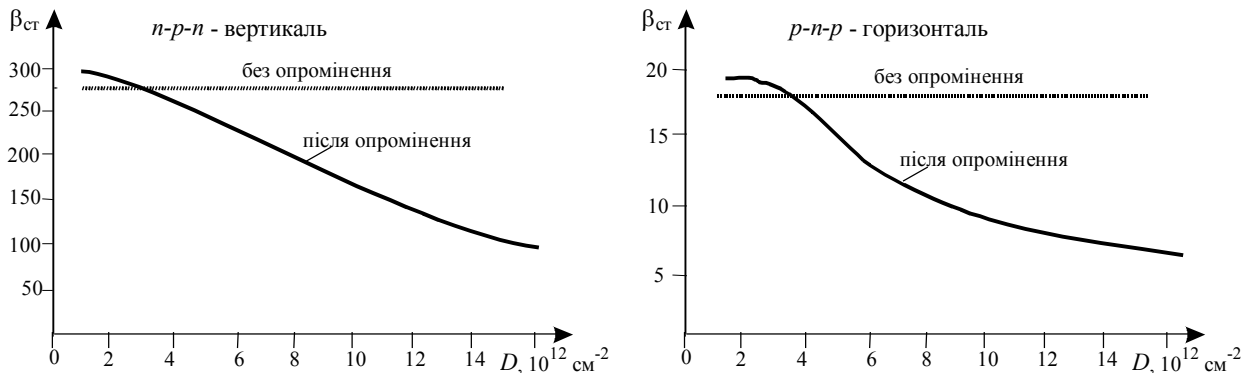


Рис.10. Зміна коефіцієнтів підсилення  $n-p-n$  і  $p-n-p$  транзисторів у залежності від дози опромінення  $\alpha$ -частинками.

$m=1,41$  до  $1,34$ , що вказує на переважаючу роль дифузійної складової струму. Зі збільшенням дози до  $18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$   $m$ -фактор збільшується до величини  $m=1,59$ , що вказує на переважаючу роль генераційно-рекомбінаційних процесів в  $p-n$ -переході.

У зразках на основі  $p-Si$  утворення радіаційних дефектів, що згенерувались  $\alpha$ -частинками, призводить до появи рівнів  $E_V + 0,2 \text{ eV}$ ,  $+0,29 \text{ eV}$ ,  $+0,55 \text{ eV}$ . З ростом дози опромінення до  $18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$   $m$ -фактор зростає з  $m=1,23$  до  $m=1,49 \div 1,51$ , що вказує на збільшення генераційно-рекомбінаційних процесів. Лінійні гілки ВАХ можуть бути апроксимовані виразами:

$$m=1,23+0,111 \Phi \text{ для } p-Si, \quad (15)$$

$$m=1,41+0,127 \Phi \text{ для } n-Si, \quad (16)$$

залежно від дози опромінення. Для доз більших  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  наступає насичення для обох типів провідності кремнію.

Обернені гілки ВАХ описуються залежністю  $I=AU^B$ , де показники  $B=0,42 \div 0,45$ ,  $A=2,2 \div 2,6$ , що вказує на переважаючу роль генераційно-рекомбінаційних процесів. Підтвердженням цьому є зменшення часу життя носіїв заряду з  $240-360 \text{ мс}$

до  $12-86 \text{ мс}$ . Додатково досліджувались ТС із сформованими біполярними транзисторами:  $n-p-n$ - і  $p-n-p$ -типів. Особливо значний вплив  $\alpha$ -опромінення на величину коефіцієнта підсилення  $B_{СТ}$  (рис.10).

При  $\alpha$ -опроміненні, через рекомбінаційні процеси у базі, різко зменшується коефіцієнт підсилення транзисторів  $B_{СТ}$ , а на високій частоті  $100 \text{ МГц}$ , де  $|\beta|=8-10$ , коефіцієнт підсилення майже не змінюється. Це вказує на високу ефективність використання цього методу в біполярній технології ВІС для цілеспрямованого керування параметрами транзисторів.

Для з'ясування впливу  $\alpha$ -опромінення на МОН-структури, досліджували ТС, що формувались з використанням серійних технологій з алюмінієвим затвором (ІС серії 564) і полікремнієвим затвором (ВІС серії КР 1830).

Одним із методів оцінки стійкості МОН-структур ВІС до дії іонізуючого  $\alpha$ -опромінення є зміна електрофізичних параметрів підзатворного діелектрика від дози і тривалості опромінення, наприклад, величини дрейфу порогової напруги. Якщо перед формуванням підзатворного діелек-

трика поверхню Si-пластин очистити додатковим оксидуванням з наступним зняттям оксиду, то величина радіаційно-індукованого заряду в діелектрику зменшується у 1,5-2 рази, що підтверджується зміною порогової напруги як в *n*-, так і *p*-каналних МОН-транзисторів.

Дослідження перехідного шару товщиною 13-27 Å на міжфазній границі розділу Si-SiO<sub>2</sub> показали, що у перехідному шарі знаходиться певна кількість заряду з іонів вуглецю, водню, хлору і гідроксидних груп ОН<sup>-</sup>. Порівняння зміни порогової напруги після α-опромінення підзатворного оксиду з дозою 16·10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>, який сформований при різних температурах і середовищах сухої, вологої і хлорної атмосфери, показали, що найменші зміни Δ*U*<sub>T</sub> спостерігаються для сухого хлорного оксиду, вирощеного при *T*=1000°C. Найвищу якість підзатворного діелектрика досягаємо пірогенним оксидуванням, яке забезпечує нестабільність порогової напруги Δ*U*<sub>T</sub>=±0,15 В при кімнатній температурі і Δ*U*<sub>T</sub>=±1,7 В при *T*=+150°C для *n*- і *p*-МОН-транзисторів.

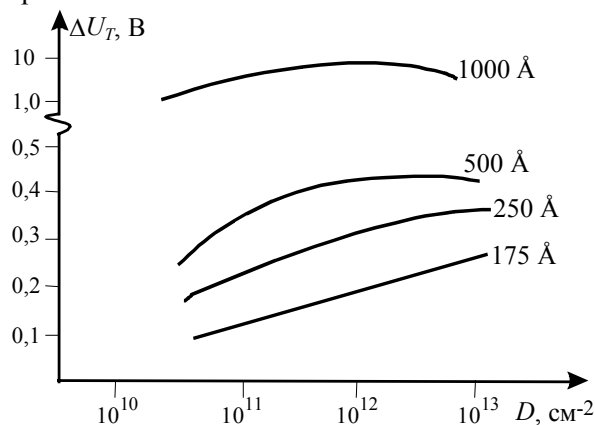


Рис.11. Вплив товщини підзатворного діелектрика на стабільність порогової напруги *n*-МОН транзисторів у залежності від дози α-частинок.

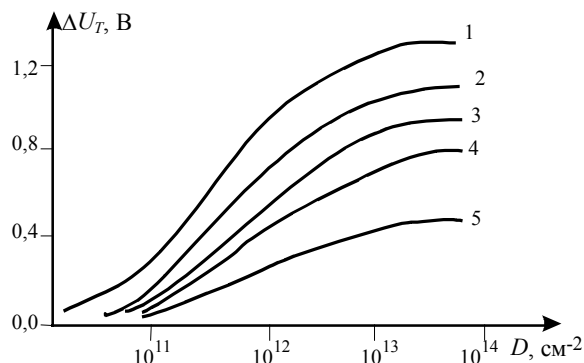


Рис.12. Вплив типу електрода затвора на радіаційний зсув порогової напруги *n*-МОН транзистора. Матеріал: Al (1), AK1 (2), AKGo-1 (3), легований поліSi+AK1 (4), легований поліSi+AKGo-1 (5).

Як показали наші дослідження, для шарів SiO<sub>2</sub> зі зменшенням його товщини від 1000Å до 175Å зміна порогової напруги Δ*U*<sub>T</sub> пропорційна кубу або квадрату товщини. На рис.11 показана зміна порогової напруги для різних товщин оксиду від дози α-опромінення. Видно, що у тонких підзатворних шарах SiO<sub>2</sub><250Å спостерігаємо максимальну стабільність порогової напруги. Тому для забезпечення високої радіаційної стійкості до α-опромінення необхідно знижувати товщину підзатворного діелектрика, сформованого хлорним або пірогенним оксидуванням.

Для послаблення радіаційно-іонізуючого впливу опромінення на МОН-структури треба розробляти радіаційно стійку системну технологію формування структур ВІС.

Оптимально вибрана для серії КР1830ВЕ48 доза α-частинок *D*=(2÷5)·10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup> протягом 5-10 хв. при товщині діелектрика 250-350Å, яка забезпечує регулювання порогових напруг *n*- і *p*-каналних МОН-транзисторів у межах *U*<sub>T</sub>=±1,05±0,12 В.

Режим нанесення, тип електрода затвора, обробка перед формуванням затвора і післяметалізаційне відпалювання МОН-структур змінюють стан перехідного шару на зовнішній міжфазній границі SiO<sub>2</sub>-електрод затвора і тим самим впливають на радіаційні параметри МОН-приладів. На рис.12 зображені графіки, що виражають вплив матеріалу електрода затвора на радіаційний зсув порогової напруги. Мінімальний зсув порогової напруги, залежно від дози α-частинок, властивий МОН-транзисторам із легованим фосфором полікремнієвим затвором і металізацією зі сплаву АК Го1. Це також вказує на те, що легований полікремній може бути ефективним екраном для забезпечення високої радіаційної стійкості МОН ВІС. Такий варіант створення ІС з використанням полікремнієвих екранів реалізований на ІС серії 564 з виготовленням дослідних зразків. Він забезпечив високу радіаційну стійкість до дози 10<sup>7</sup> рад і рекомендований для виготовлення ІС спеціального призначення.

Отже, вибираючи матеріал затвора МОН ВІС, можна забезпечити високу радіаційну стійкість структур.

Крім накопичення об'ємного заряду в підзатворному діелектрику МОН-транзисторів, при дії іонізуючого випромінювання змінюється рухливість носіїв у інверсному каналі, що приводить до зміни частотних властивостей і швидкодії ВІС. Це пов'язано з тим, що в області каналу МОН-транзистора проходять рекомбінаційні

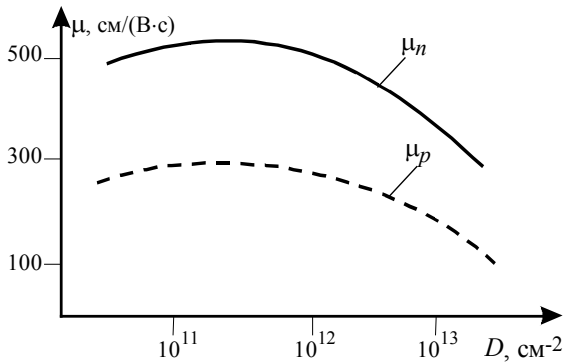


Рис.13. Дозова залежність рухливості електронів і дірок МОН-транзисторів ( $W/L=100/4$ ).

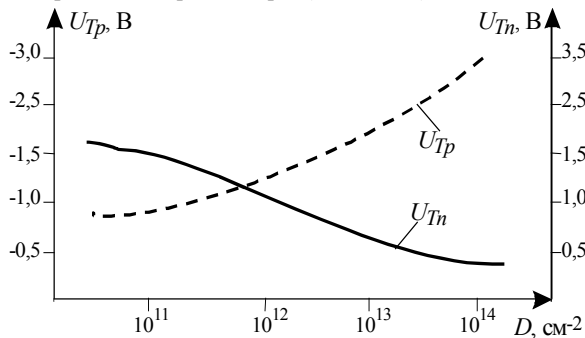


Рис.14. Дозова залежність порогової напруги МОН-транзистора ( $W/L=100/4$ ).

процеси і розсіяння носіїв, а це призводить до збільшення порогової напруги і зменшення стрімкості ВАХ. На рис.13 подана залежність рухливості  $\mu_n$  в інверсному каналі  $n$ -МОН-транзистора від дози  $\alpha$ -опромінення, а на рис.14 показана дозова залежність порогової напруги  $p$ - та  $n$ -канальних транзисторів. Видно кореляцію між величиною накопиченого заряду в підзатворному оксиді і рухливістю електронів чи дірок у каналі. На залежності  $\mu_{n,p}(D)$  є область насичення при слабкій інверсії та монотонне зменшення для сильної інверсії.

Отже, під дією іонізуючого  $\alpha$ -опромінення в МОН-структурах змінюються електрофізичні параметри МОН-транзисторів. Із ростом дози більше  $10^{13}$  см<sup>-2</sup> починається деградація МОН-структур. Для зменшення іонізуючого впливу  $\alpha$ -опромінення, а також для підвищення радіаційної стійкості МОН-структур необхідне удосконалення системної технології, а саме:

1. Використання підзатворного діелектрика у вигляді  $\text{SiO}_2$ , одержаного надчистою технологією (сухе хлорне або пірогенне оксидування), яка не спричиняє появи локалізованих станів для захоплення нерівноважних носіїв заряду.
2. Формування підзатворного діелектрика з оксинітридною пасивацією.
3. Використання діелектриків з високими ре-

комбінаційними властивостями для нерівноважних носіїв.

4. Заміни металічного затвора на легований полікремній або поліцид, які забезпечують радіаційну стійкість до рівня  $10^7$ - $10^8$  рад.

5. Формування металізації затвора сплавом АК Го1.

6. Перехід на підзатворні діелектрики малої товщини ( $<250$  Å).

7. Вибір конструкції структури ВІС і технології її формування повинен забезпечувати високу радіаційну стійкість, яку потрібно оцінювати за температурною стабільністю порогової напруги. Отже, системна технологія мікроелектроніки ВІС повинна базуватись на принципі забезпечення їх радіаційної стійкості.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Новосядлий С.П. Радіаційне регулювання порогових напруг МОН-транзисторів ВІС // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Сучасні проблеми засобів телекомунікації, комп'ютерної інженерії та підготовки спеціалістів". TCSET'98. - Львів, 1998. - С.167.
2. Новосядлий С.П., Остапчук А.Й., Гуменюк С.Д., Алексейко П.С. Применение трифтористого бора  $\text{BF}_3$  изотоп 10 при формировании областей к-МОН-структур // Тез. докл. конференции "Технология, организация производства и оборудование". Вып.1 (196). Промышленная технология и оборудование ионной имплантации. - Ленинград, 1984. - С.33.
3. Новосядлий С.П., Остапчук А.Й., Гуменюк С.Д., Алексейко П.С. Метод оперативного контроля ионного легирования бора и фосфора малыми дозами // Тез. докл. конференции "Технология, организация производства и оборудование". Вып.1 (196). Промышленная технология и оборудование ионной имплантации. - Ленинград, 1984. - С.82.
4. Патент України №3213 від 16.05.1994. Спосіб визначення малих доз іонного легування / Новосядлий С.П., Карплюк О.І.
5. А.с. №716444 (СССР) от 12.10.1979. Способ изготовления тонкопленочных резисторов / Новосядлий С.П., Бирковий Ю.Л.
6. Новосядлий С.П., Бирковий Ю.Л. Контроль малих доз іонного легування // Тези доп. V Міжнародної конференції з фізики і технології тонких плівок. - Івано-Франківськ, 1995. - С.91.
7. Новосядлий С.П. Юстировка пороговых напряжений в технологии высокого уровня ВІС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 1998. - №4. - С.28-30.
8. Рассел Х., Руге Й., Ионная имплантация / Пер. с нем. под ред. М.И.Гусевой. - М: Наука, 1983.
9. Вавилов В.С., Горин Б.Н., Данилин Н.С. Радиационные методы в твердотельной электронике. - М: Радио и связь, 1990.