

УДК 539.23: 537.311

С.П. Новосядлий

Радіаційна зарядова модель К-МОН транзисторів субмікронної технології великих інтегральних схем

Прикарпатський університет імені Василя Стефаника

На основі проведених досліджень встановлені основні чинники, які відповідають за зарядовий стан підзатворного діелектрика, міжфазної межі Si-SiO₂ та приповерхневої області напівпровідника, при використанні радіаційної технології α-опромінення. Відповідно для даного процесу розроблена зарядова модель, яка дозволяє провести оцінку на радіаційну стійкість К-МОН структур ВІС при їх α-опроміненні по величині зсуву порогових напруг.

Ключові слова: міжфазна межа розділу, радіаційна технологія, α-опромінення.

Стаття постуила до редакції 27.08.2002; прийнята до друку 23.09.2002

Міжфазна межа розділу Si-SiO₂ представляє собою перехідну область між монокристалічним кремнієм і аморфним кварцевим склом як у відношенні розміщення атомів, так і в відношенні їх стехіометричного складу. Різні по природі заряди і пастки носіїв заряду, що зосереджуються в такій перехідній області суттєво впливають на її зарядовий стан, а також індуюють (наводять) заряд протилежної полярності в розміщеній під нею області монокремнію, змінюючи CV-характеристики МОН транзисторів, стабільність яких визначає надійність великих інтегральних схем [1,2].

На рис. 1 показані основні види зарядів, які своєю природою зв'язані з підзатворним окислом МОН транзисторів. Ці заряди визначаються своєю густиною: $N=Q/q$, де Q (кл/см²) - результуючий ефективний заряд на одиницю площі межі розділу Si-SiO_x, N (см⁻²) - кількість зарядів на одиницю площі, q (кл)-заряд електрона. Звичайно, головними зарядами є: Q_{it} - заряд поверхневих станів, Q_{ot} -

оксидно захоплений заряд на пастках, Q_f - постійний заряд в окислі (додатній), який розміщений на деякій віддалі від межі розділу Si-SiO₂, Q_m -заряд рухливих іонів лужних і перехідних металів.

Розглянемо фізику формування зарядів в тонкому підзатворному діелектрику і їх вплив на електричну міцність, порогову напругу і напругу плоских зон К-МОН транзисторів для побудови фізичної зарядової моделі при α-опроміненні структур ВІС. Аналіз побудуємо так, щоб окремо розглянути всі види зарядів, які знаходяться в системі підзатворний діелектрик - кремній. Схематично їх подано на рис. 1, де зображено структуру метал - оксид - кремній з перехідною та інверсною областями. Так, Q_f - представляє собою густину нерухомих граничних зарядів в перехідному шарі SiO_x, яким відповідає їх поверхнева густина $N_f=Q_f/q$. Цей заряд, як правило, зосереджується в перехідному шарі і є завжди додатній. Заряд Q_f зумовлений розірваними валентними зв'язками атомів кремнію і залежить від

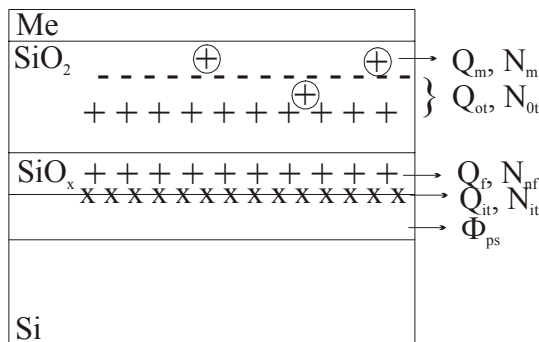


Рис.1. Основні види зарядів в окислі МОН-структури.

орієнтації Si-пластин. Крім цього, на його величину впливають термообробки, які генерують термодонори. Густина зарядів на пастках Q_{0t} може приймати як додатне, так і від'ємне значення в залежності від виду пасток (донорних чи акцепторних). Такі заряди появляються в МОН структурах в результаті їх опромінення, зокрема іонізуючими α -частинками. Під їх впливом може змінюватись як густина заряду на оксидних пастках Q_{0t} , так і густина заряду на граничних пастках Q_{it} . Величина цих зарядів може змінюватись також під впливом електричного поля, що прикладається до затвора. Стабільність напруги плоских зон U_{FB} підвищується, коли величина цих зарядів протилежна по знаку Q_f (від'ємна). Пасткові рівні з густиною N_{it} розміщені безпосередньо на міжфазній межі Si-SiO₂ і мають рівні, що знаходяться в забороненій зоні кремнію з густиною D_{it} . Ці пасткові центри зумовлюють ізоконцентраційні домішки кисню і вуглецю, що знаходяться в монокремнії (Ч) і при оксидуванні викликають відповідні напруження стиску і розтягу [2]. Нами проведені дослідження впливу пасток в SiO₂, сформованих α -опроміненням та ізоконцентраційними домішками кисню і вуглецю при затворному оксидуванні на рівень порогових напруг U_{th} і напруг плоских зон U_{FB} .

Густина рухомого позитивного заряду Q_m , (N_m) зумовлена, як правило, іонами лужних та перехідних металів і легко захоплюються діоксидом кремнію. Вони можуть суттєво змінювати як порогову напругу, так і напругу плоских зон та їх температурну стабільність. Іони лужних і перехідних металів надзвичайно рухомі і можуть дрейфувати в SiO₂ під дією електричного і температурного полів. Щоб забезпечити стабільність порогової напруги в межах $\pm 0,05$ В допустима густина рухомого заряду Q_m повинна бути меншою 10^{10} см⁻². З метою подавлення цього позитивного заряду використовують хімічну перед- затворну обробку в перегідрольному розчині надоцтової кислоти та гетерні технології оксидування.

Тепер розглянемо їх вплив на величину напруги плоских зон U_{FB} і порогової напруги U_{th} :

$$U_{FB} = \Phi_{MS} - Q_f / C_{ox} - 1 / C_{ox} \int_0^{x_{ox}} (x / x_{ox}) \rho(x) dx, \quad (1)$$

де Φ_{MS} - різниця потенціалів (робіт виходу) між металом і напівпровідником; $C_{ox} = \epsilon_{ox} / x_{ox}$ - питома ємність підзатворного діелектрика; $\rho(x)$ - густина рухомого заряду в оксиді.

Інверсійні порогові напруги К-МОН транзисторів U_{thn} , U_{thp} визначаються через напругу плоских зон U_{FB} згідно виразів [5]:

$$U_{thp} = U_{FB} - 2|\Phi_n| - |Q_d| / C_{ox} \quad (2)$$

$$U_{thn} = U_{FB} + 2|\Phi_p| - |Q_d| / C_{ox} \quad (3)$$

де Φ_n , Φ_p - потенціали n-Si і p-Si відповідно; Q_d -

сумарний заряд на межі Si-SiO₂, що визначається зарядами оксидних пасток Q_{0t} , і поверхневих станів Q_{it} .

Заряд, зумовлений захопленням носіїв заряду оксидними пастками Q_{0t} , може бути як додатнім, так і від'ємним в залежності від того, які носії – електрони чи дірки попадають на пастки в оксиді. Він зв'язаний з наявністю дефектів в SiO₂ в результаті дії іонізуючого опромінення, лавинної інжекції носіїв заряду в каналі МОН транзисторів.

Якщо провести термопольову стабілізацію заряду за допомогою хімічної обробки та гетерного пасивуючого покриття ФСС або оксинітриду, що наноситься на поверхню структури ВІС, то заряди Q_m і Q_f на радіаційну стійкість МОН структур не мають впливу і їх можна вважати для певного температурного діапазону постійними величинами. Тоді основними вкладниками в дрейф порогової напруги МОН транзисторів при іонізаційному впливі будуть Q_{0t} і Q_{it} .

На даних зарядах і побудована радіаційна зарядова модель комплементарних МОН транзисторів, через яку проводиться електрофізичне діагностування радіаційної стійкості структур К-МОН ВІС, тобто їх надійність оцінюється зсувом порогових напруг, який визначається тестовим контролем технологічного САПРу [2].

Ця модель вимагає, щоб n- і p-канальні транзистори були ідентичними і опромінювались при однакових дозах іонізуючого випромінювання. Тоді радіаційно індуковані зсуви порогових напруг ΔU_{th} будуть виражатись через суму напруг, зумовлених оксидно захопленим зарядом ΔU_{0t} і поверхневими пастками ΔU_{it} . Для визначення цих зсувів напруг, через які оцінюється радіаційна стійкість структур К-МОН ВІС, приймаються такі допущення:

ідентичність ΔU_{0t} для n- і p-канальних транзисторів, тобто $\Delta U_{0tn} = \Delta U_{0tp}$;

поверхневі пастки зумовлюють від'ємний заряд для n-канальних і позитивний заряд для p-канальних транзисторів;

рухливість носіїв заряду до і після опромінення виражається через співвідношення $\mu / \mu_0 = 1 + a(\Delta U_{it})$ – коефіцієнт Сан-Пламмера [3] і є однаковим для n- і p-канальних транзисторів.

При таких допущеннях тоді можна зсуви порогових напруг ΔU_{thn} і ΔU_{thp} до і після іонізуючого опромінення параметризувати в межах напруг ΔU_{0t} і ΔU_{it} :

$$\begin{aligned} \Delta U_{thn} &= \pm H + S_n \\ \Delta U_{thp} &= \pm H - S_p \end{aligned} \quad (4)$$

де $\Delta U_{0tn} = \Delta U_{0tp} = \pm H$, а $\Delta U_{in} = S_n$, $\Delta U_{ip} = -S_p$ складові, що зумовлені оксидно- захопленим зарядом Q_{0t} і зарядом поверхневих пасток Q_{it} відповідно. Останні визначаються співвідношеннями через коефіцієнти Сан-Пламмера:

Таблиця 1

№ п/п	Параметри	Значення параметрів
1.	Площа робочого вікна джерела	15 см ²
2.	Активність джерела АИПЕЛ-3	5,5 (0,15) гБк (Ки)
3.	Потік зовнішнього α-випромінювання	>1.0 мВт
4.	Енергія вихідного α-випромінювання	4,5-5,0 МеВ
5.	Густина потоку α-частинок із джерела	5·10 ⁷ с ⁻¹ см ⁻²
6.	Доза опромінення (10 ¹⁰ -10 ¹⁵ см ⁻²)	10 ² – 10 ⁶ рад
7.	Поверхнева нерівномірність опромінення	±10 %
8.	Загальна активність опромінювача	3,5 Ки
9.	Діапазон регулювання віддалі між об'єктом і опромінювачем	5-20 см
10.	Температура при опроміненні	20-150 ⁰ С
11.	Кількість пластин на тримачі (діаметр 100мм)	10 шт.

$$S_n = \beta_n / a \quad (5)$$

$$S_p = \beta_p / a \quad (6)$$

Із виразів (4) видно, що іонізуючим опроміненням можна в певних межах регулювати (юстувати) порогову напругу. Коефіцієнти Сан-Пламмера β_n і β_p визначаються співвідношенням рухливостей носіїв до і після опромінення структур:

$$\beta_n = \mu_{on} / \mu_n - 1 \quad (7)$$

$$\beta_p = \mu_{op} / \mu_p - 1 \quad (8)$$

де μ_{on} , μ_{op} - рухливості носіїв заряду до опромінення, а μ_n , μ_p - рухливості носіїв заряду після іонізаційного опромінення.

Тоді зсуви порогової напруги, які зумовлені оксидно захопленням зарядом і зарядом на пастках, будуть визначатись наступними співвідношеннями:

$$\Delta U_{0n} = \Delta U_{0p} = [\beta_p (\Delta U_{thn}) + \beta_n (\Delta U_{thp})] / (\beta_n + \beta_p) \quad (9)$$

$$\Delta U_{itm} = \beta_n (\Delta U_{thn} - \Delta U_{thp}) / (\beta_n + \beta_p) \quad (10)$$

$$\Delta U_{itp} = -\beta_p (\Delta U_{thn} - \Delta U_{thp}) / (\beta_n + \beta_p) \quad (11)$$

де $a = (\beta_n + \beta_p) / (\Delta U_{thn} - \Delta U_{thp})$, $a \cdot S_n = \Delta N_{itm}$, $a \cdot S_p = \Delta N_{itp}$.

Перевірка зарядової моделі комплементарних МОН транзисторів проводилась на тестових структурах, сформованих з використанням як полікремнієвого (поліцидного), так і алюмінієвого затворів при товщині підзатворного діелектрика 25 нм (ІС с. 1564, с.564, с. КР1830 ВЕ48).

Радіаційну обробку тестових структур з К-МОН транзисторами проводили на установці АОИС-17Б з використанням іонізаційних радіонуклідних джерел α-опромінення Pu^{238} (АИПЕЛ-3, АИПЕЛ-4) і Co^{90} (АИПЕЛ-5). Установка α-опромінення АОИС-17Б виконана на базі вакуумної установки наплення УВН-75Р2 і містить в собі опромінювач з α-джерелом, камеру опромінювання з вікном для візуального спостереження процесу, систему вакуумної відкачки, тримач кремнієвих пластин із тестовими структурами К-МОН транзисторів, систему обертання і нагрівання пластин, пульт управління з радіодозиметричним приладом з датчиком детектування α- і γ-випромінювання.

Попередньо установку калібрували з допомогою дозиметричних полімерних плівок ЦДП-4-2, встановлюючи залежність оптичної щільності від інтегрального потоку α-частинок заданих джерел [2]. Експлуатаційні характеристики радіаційної установки АОИС-17Б подані в таблиці 1.

Кремнієві пластини з тестовими структурами К-МОН транзисторів опромінювались на установці АОИС-17Б з енергією α-частинок 5-5,5 МеВ. Для отримання необхідних електрофізичних параметрів густина α-потіку складала $5 \cdot 10^7$ см²/Вс при зміні дози $1,2 \cdot 10^{10}$ до $1,4 \cdot 10^{13}$ см⁻² (1 krad до 1 Mrad). Висока рівномірність і стабільність α-опромінення досягалась за рахунок термостабілізації α-джерела і обертання підкладкотримача. Ми дослідили вплив α-опромінення на процес накопичення заряду в підзатворному діелектрику К-МОН транзисторів та характеристики р-п-переходів і на цій основі розробили технології юстування: порогових напруг Н-МОН і К-МОН структур ВІС (серій КР580, КР132, КР1830, КР1816) та коефіцієнта підсилення

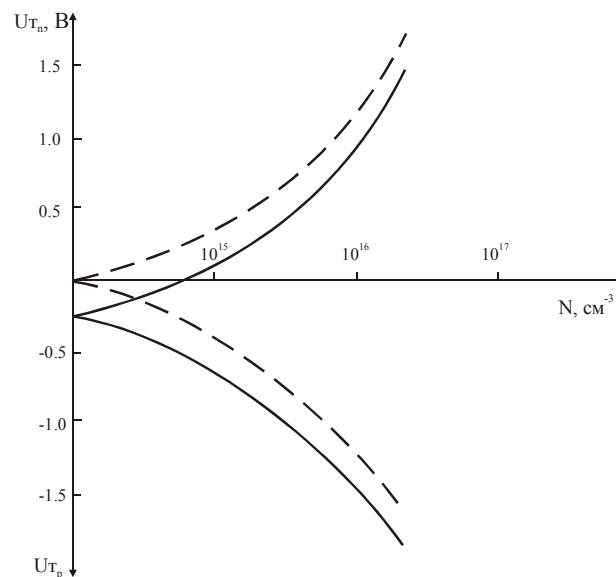


Рис.2. Залежність порогової напруги n і р-каналних транзисторів до α-опромінення (1) і після нього (2).

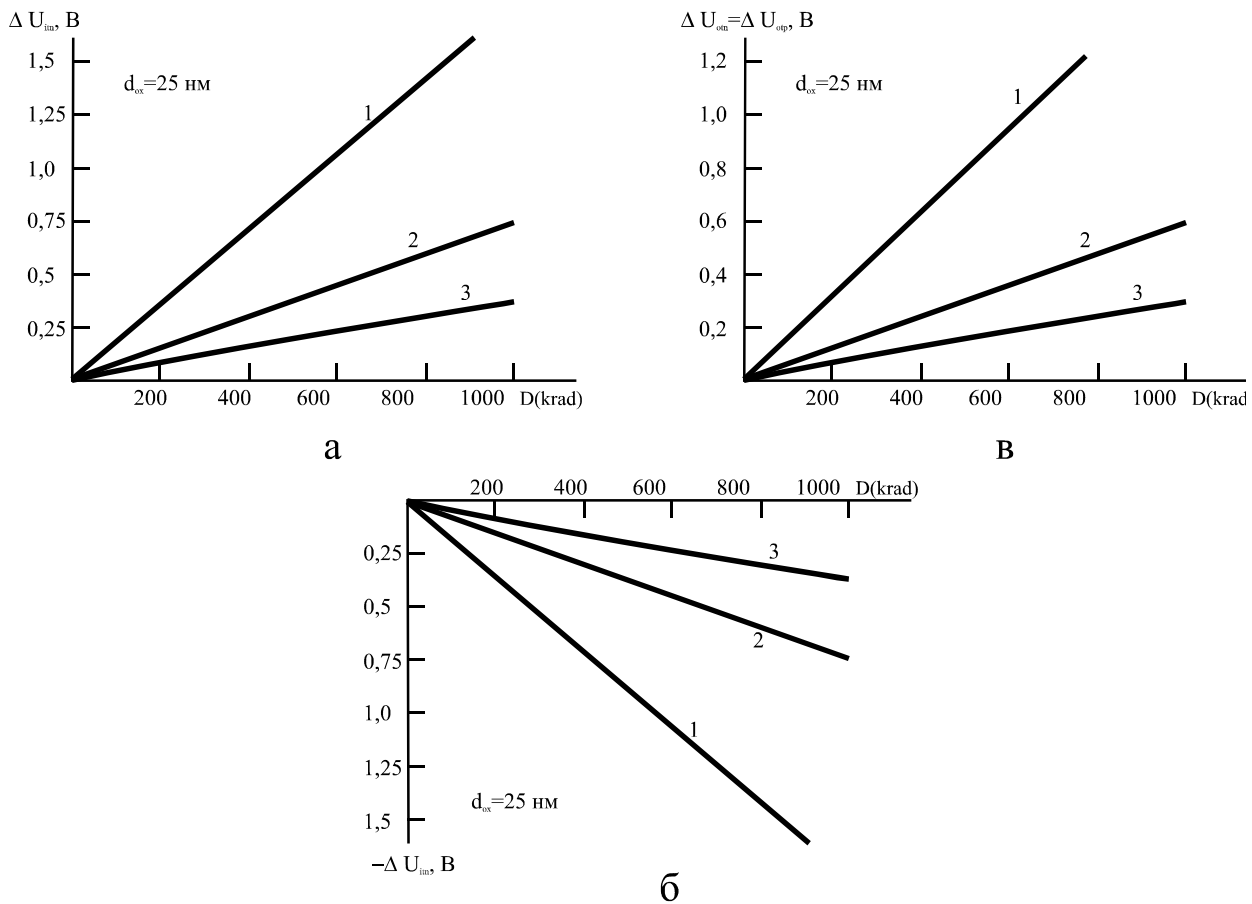


Рис. 3. Залежність зміни порогової напруги ΔU_{th} (її складових ΔU_{itn} , ΔU_{itp} , $\Delta U_{otn} = \Delta U_{otp}$) від дози α -опромінення D для К-МОН транзисторів: 1- з алюмінієвим затвором; 2- з полікремнієвим затвором і полікремнієвими екранами; 3-з нітридизованим підзатворним діелектриком та поліцидним затвором.

біполярних структур (K140, KP1021) [1,2].

Визначення коефіцієнтів Сан-Пламмера β_n і β_p проводилось на основі зміни рухливостей електронів і дірок до і після іонізаційного опромінення тестових структур. Вимірювання рухливостей носіїв заряду електронів і дірок здійснювався методом струму Холла [4].

Проведені дослідження показали оригінальність даної зарядової моделі для К-МОН транзисторів при їх α -опроміненні для юстування їх порогових напруг [1, 2]. Дана модель вказала на можливе формування р-канальних з індукованим каналом МДН транзисторів з нульовою і навіть додатною пороговою напругою (рис. 2) і дозволила формувати низькопорогові ($< 0,5$ В) К-МОН ВІС.

Розроблена зарядова модель комплементарних МОН транзисторів при їх радіаційній обробці іонізуючим α -опроміненням вказує на те, що основними зарядами в підзатворному діелектрику при їх опроміненні є оксидно захоплений заряд Q_{ot} і заряд поверхневих станів Q_{it} . Тому змінюючи дози α -опромінення можна прецизійно регулювати порогові напруги К-МОН транзисторів ВІС і проводити електрофізичне діагностування надійності сформованих структур ВІС [6], на що вказують графіки рис. 3.

Таким чином, виходячи із проведених

досліджень можна встановити для радіаційно стійких К-МОН структур ВІС допустимий зсув порогової напруги для n- і р-канальних транзисторів для складової, зумовленої зміною заряду поверхневих станів $\Delta U_{itn,p} \leq 0,3$ В, та для складової оксидно захопленого заряду на пастках $\Delta U_{otn,p} \leq 0,1$ В при дозі α -опромінення $D = 5 \cdot 10^5$ рад.

Підсумовуючи викладене можна зробити наступні висновки:

На основі даної радіаційної зарядової моделі комплементарних МОН транзисторів субмікронної технології ВІС розроблена низка методик електрофізичного діагностування надійності елементів структур ВІС тестового контролю технологічного САПРу [6]:

К-МОН транзисторів з алюмінієвим, полікремнієвим і поліцидним затворами для прогнозування радіаційної стійкості К-МОН структур ВІС по зсуву їх порогових напруг $\Delta U_{th} = \Delta U_{thn} - \Delta U_{thp}$.

2. n-МОН транзисторів для прогнозування надійності біполярних ВІС по термопольовому зсуву напруги плоских зон ΔU_{FB} .

3. Напівпровідникових МОН- і тонкоплівкових конденсаторів як динамічних елементів пам'яті для прогнозування надійності структур операційних підсилювачів, RC-фільтрів та схем пам'яті по зміні

напруги другої гармоніки ΔU_{2r} .

Відповідно даній моделі розроблена радіаційно стійка технологія формування К-МОН структур з використанням легованих полікремнієвих екранів та нітридизації оксидного підзатворного діелектрика

[5].

С.П. Новосядлий – кандидат технічних наук, професор.

- [1] С.П. Новосядлий. Радіаційна технологія при формуванні структур ВІС. // *Науковий вісник Чернівецького університету*, **63**, сс. 8-23 (1999).
- [2] С.П. Новосядлий. Зарядові моделі радіаційної технології формування субмікронних структур МОН ВІС. // *Металофізика і новітні технології*, **7**, сс. 1001-1011 (2002).
- [3] D.M. Flitwud. Dual-transistor method to determine threshold-voltage shifts due to oxide-trapped charge and interface traps in metal-oxide semiconductor devices // *Applied Physics letters.*, **55**(5), pp. 466-468 (1989).
- [4] П.П. Павлів. *Методы измерения параметров полупроводниковых материалов*. Высшая школа, М.-239 с (1987).
- [5] С.П. Новосядлий. Високоєфективна технологія самосуміщеної ізоляції легованими полікремнієвими екранами для швидкодіючих К-МОН ВІС. // *Технологія приладобудування*, **1**, сс. 3-5 (1999).
- [6] С.П. Новосядлий. Електрофізичне діагностування надійності структур ВІС // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*, **367**, сс.187-197 (1999).

S.P. Novosyadlyy

The Radiation Charging Model of C-MOS Transistors of Submicron VLSI Technology

Vasyl Stefanyk Prekarpathian University

The described model enables to evaluate radiation resistance C-MOS structures of VLSI during their α -irradiation by assessing of the threshold voltages shift.