

УДК 621.382

ISSN 1729-4428

С.П. Новосядлий, Р.І. Запухляк, П.І. Мельник

## Прогнозування надійності структур великих інтегральних схем за допомогою імпульсних нерівноважних вольт-фарадних характеристик

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника  
вул. Галицька 201, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна*

В даній статті проведено аналіз властивостей нерівноважних вольт-фарадних характеристик МОН структури, знятих на трапецієвидних імпульсах розгортки з довжиною фронтів, менших часу перезарядження поверхневих станів і глибоких рівнів в напівпровіднику. Показано, що такі нерівноважні CV-характеристики можуть бути використані для електрофізичного діагностування надійності структур ВІС на стадії їх формування.

**Ключові слова:** нерівноважна CV-характеристика, МОН структура, міжфазна межа розділу, пастка, заряд, гістерезис, надійність.

*Стаття постуила до редакції 19.05.2004; прийнята до друку 31.10.2004.*

При дослідженні електричних явищ на поверхні напівпровідника необхідно вимірювати і змінювати концентрацію рухомих носіїв заряду в приповерхневому його пласті. Польовий електрод, як електрод затвора МОН структури, при прикладенні до нього електричної напруги, створює електричне поле, яке діє перпендикулярно поверхні напівпровідника і тим самим змінює в певних межах концентрацію основних носіїв заряду. На відміну від методу ефекту поля, в якому концентрація рухомих носіїв заряду вимірюється шляхом аналізу провідності напівпровідника, CV-метод оснований на вимірюванні концентрації носіїв через аналіз ємності між польовим електродом і напівпровідником. Це значно спрощує експериментальну МОН структуру і виключає необхідність вимірювання рухливості носіїв заряду через холлівську структуру [1].

Тому при дослідженні електронних явищ в МОН структурі більш правильно говорити вже про властивості міжфазної межі (МФМ) розділу Si-SiO<sub>2</sub>, а не самої поверхні напівпровідника, наприклад монокремнію, в якому формуються структури великих інтегральних схем. В цьому випадку властивості МФМ розділу визначаються вже як властивостями поверхні монокремнію, так і властивостями діоксиду кремнію, як діелектрика.

Наявність в забороненій зоні напівпровідника (кремнію) дозволених енергетичних рівнів, які локалізовані як в шарі діоксиду SiO<sub>2</sub>, так і на міжфазній межі Si-SiO<sub>2</sub> (при обірваних зв'язках кремнію), призводить до накопичення на них заряду,

який вже називають поверхневим зарядом Q<sub>ss</sub>. Дослідженнями встановлено чотири компоненти поверхневого заряду, які по різному реагують на дію зовнішнього електричного поля, а саме: Q<sub>m</sub> – рухомий заряд швидкодифундуючих іонів лужних та перехідних металів, які мігрують під дією електричного поля, його величина може бути суттєво зменшена шляхом якісної хімічної обробки в перегідрольному розчині надощтової кислоти та хлорного гетерування при формуванні підзатворного діелектрика; такий заряд, як повільно релаксуючий, дрейфує під дією електричного поля або при термодіфузійній обробці, що призводить до ефектів нестабільності електричних властивостей МОН структури і супроводжується гістерезисом CV-характеристики; Q<sub>f</sub> – фіксований (постійний і нерухомий) заряд в оксиді, який призводить до зсуву CV-характеристик по осі напруг без зміни її форми; Q<sub>ss</sub> – сумарний заряд поверхневих станів Q<sub>it</sub> та заряду, зумовленого захопленням носіїв заряду на пастках Q<sub>0t</sub> (Q<sub>ss</sub> = Q<sub>it</sub> + Q<sub>0t</sub>); Q<sub>it</sub> – вносить енергетичні рівні в заборонену зону кремнію і може взаємодіяти з розміщеним під ним монокремнію; Q<sub>0t</sub> – як заряд пасток, може бути або позитивним, або негативним в залежності від того, якого типу носії заряду попадають на пастки в об'ємі SiO<sub>2</sub>; заряд Q<sub>ss</sub> досить швидко змінюється під впливом електричного поля польового електрода МОН структури і призводить до зміни форми CV-характеристики. На рис. 1 подана зарядова структура окисненого кремнію.

В залежності від типу провідності монокремнію

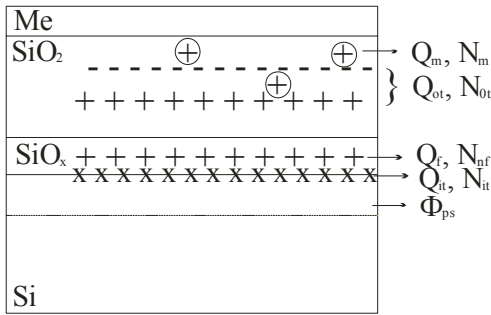


Рис. 1. Основні види зарядів в МОН структури.

(n-або p-типу) та полярності прикладеної до затвору МОН структури можна отримати збагачений, збіднений та інверсійний шари монокремнію [2]. На рис. 2 зображені енергетичні діаграми і розподіл зарядів МОН структури при різних режимах зміщення: а) в режимі збагачення; б) в режимі збіднення; в) в режимі інверсії для n-кремнію.

Заряд в інверсному пласті змінюється за рахунок переміщення дірок – неосновних носіїв заряду або за рахунок генераційно-рекомбінаційних процесів в області просторового заряду. Тому ця ємність, що зумовлена неосновними носіями  $C_p$  буде наближатись до нуля при зростанні частоти. Тобто, ємність МОН структури визначається послідовним з'єднанням ємностей оксиду  $C_{ок}$  і області просторового заряду  $C_{пз}$ :

$$C = C_{ок} C_m / (C_{ок} + C_m), \quad (1)$$

Для кремнію n типу можна записати:  
- в режимах збагачення і збіднення

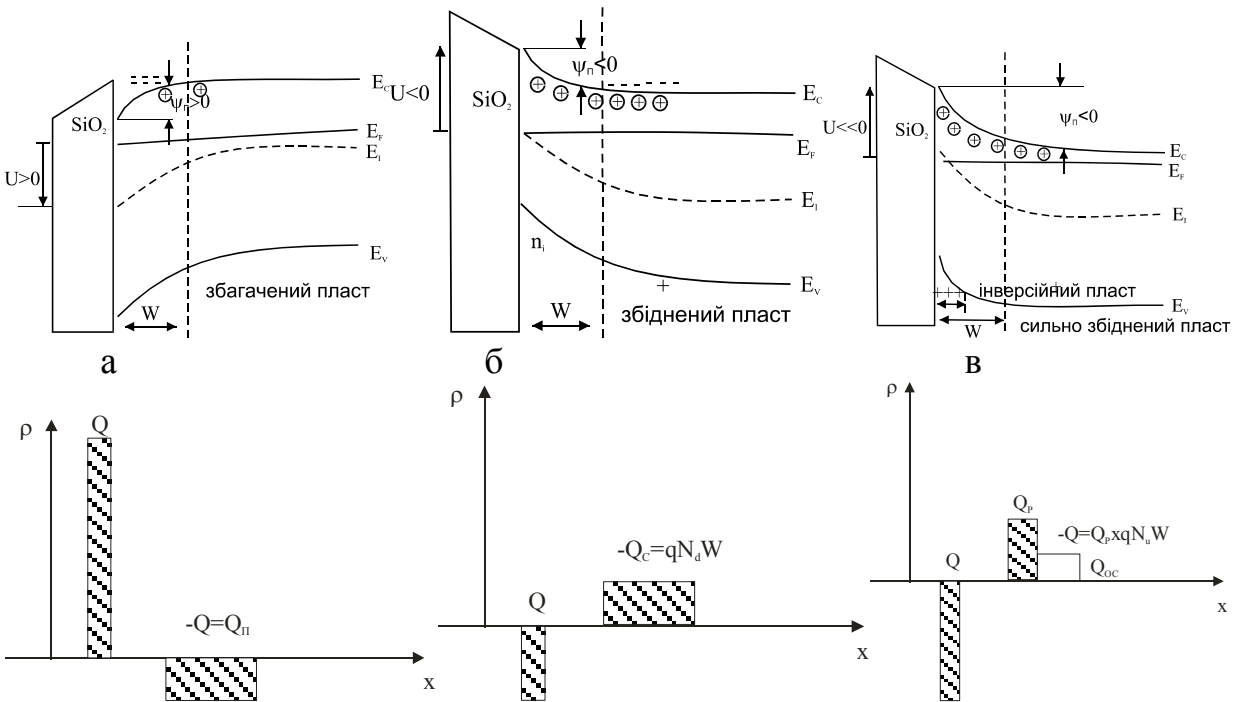


Рис. 2. Енергетична діаграма і розподіл зарядів в n-МОН структурі в різних режимах зміщення: а) при збагаченні поверхні; б) при збідненні поверхні; в) при інверсії поверхні.

$$C_{пз} = C_{ок} + C_n, \quad (2)$$

– в режимі сильного збагачення

$$C_{пз} = C_n, \quad (3)$$

– в режимі інверсії для низької частоти

$$C_{пз} = C_{ок} + C_p, \quad (4)$$

– в режимі сильного збіднення і інверсії для високої частоти

$$C_{пз} = C_{ок}, \quad (5)$$

де ємності електронів і дірок  $C_n$ ,  $C_p$ , ємність збідненого шару  $C_{ок}$ , ємність просторового заряду  $C_{пз}$ , ємність підзатворного оксиду МОН структури  $C_{ок}$  визначаються наступними співвідношеннями:

$$C_n = \frac{dQ_n}{d\phi_n} = \frac{\epsilon_s}{2L_D} \left( \frac{e^Y}{\lambda} \right)^{1/2} - \text{ємність основних носіїв}$$

заряду (електронів);

$$Y = \frac{q\phi_n}{kT} - \text{нормований поверхневий потенціал,}$$

$$\lambda = \frac{n_i}{n_0} \frac{p_0}{p_i} - \text{ступінь легування кремнієвої}$$

підкладки;

$$L_D = \left( \frac{\epsilon_s kT}{2q^2 n_i} \right)^{1/2} - \text{довжина Дебая;}$$

$$C_{ок} = \frac{dQ_{ок}}{d\phi_n} = \frac{\epsilon_s}{2L_D} (\lambda Y)^{-1/2} - \text{ємність збідненого}$$

шару при сильній інверсії;

$$C_m = \frac{dQ_m}{d\phi_n} = \frac{\epsilon_s [\lambda (1-e^{-Y}) - \lambda^{-1} (1-e^Y)]}{2L_D [\lambda (e^{-Y}-1) + \lambda^{-1} (e^Y-1) + (\lambda - \lambda^{-1}) Y]^{1/2}}$$

ємність області просторового заряду;

$C_{ок} = \epsilon_{ок} / w_{ок}$  – ємність підзатворного оксиду МОН структури.

В режимі плоских зон, коли  $\phi_n = 0$  ( $Y = 0$ ) ємність просторового заряду буде:

$$C_{мз} = \frac{\epsilon_{сз}}{L_D} \left( \frac{\lambda - \lambda^{-1}}{2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Для електрофізичного діагностування надійності структур ВІС особливий інтерес представляють нерівноважні, квазістатичні CV-характеристики (коли прикладена напруга до затвору змінюється поступово-квазістатично), та нерівноважні (імпульсні) CV-характеристики, коли зміщення до затвору МОН структури змінюється стрибком з високою частотою і швидкістю.

При достатньо різкому перемиканні МОН структури із режиму збагачення в режим інверсії при імпульсній напрузі зміщення (пиловидній чи трапецевидній) із швидкістю розгортки більшої  $10^7$  В/с умова нейтральності буде забезпечуватись тільки за рахунок розширення області збідненого пласту. При цьому ємність МОН структури буде зменшуватись з ростом від'ємного зміщення (для n-Si). Такі CV-характеристики вже будуть нерівноважними, бо заряди і ємність МОН структури при такому імпульсному зміщенні не буде відповідати умовам термодинамічної рівноваги. Такий нерівноважний стан структури зберігається недовго, бо проходить генерація дірок і створюється вже інверсний шар з позитивним зарядом. Одночасно проходить зменшення ширини збідненої області  $w$ , що веде до збільшення ємності МОН структури до рівноважного значення. Такий процес є короткотривалим і складає менше 100 мс в залежності від механізмів генерації неосновних носіїв заряду (дірок) в інверсному шарі. Щоб забезпечити такий нерівноважний стан, коли швидкість рекомбінації неосновних носіїв є більшою швидкості їх генерації, необхідно, щоб швидкість розгортки напруги зсуву (наростання) була більшою  $10^7$  В/с.

Різниця робіт виходу між електродом затвора і кремнієм призводить до того, що при відсутності напруги зміщення, поверхня напівпровідника має деякий надлишковий заряд позитивний або негативний в залежності від різниці робіт виходу матеріалу електрода затвора і кремнію. Рухомий заряд в окислі можна застабілізувати хлорним гетеруванням або його пасивацією фосфорно-силікатним склом (ФСС).

Напругу плоских зон  $U_{FB}$ , яка враховує різницю робіт виходу матеріалу електрода затвору і кремнію, так і наявність нерухомого заряду  $Q_f$  на міжфазній межі Si-SiO<sub>2</sub> і в самому оксиді можна подати у вигляді:

$$U_{FB} = \Phi_{MS} - \frac{Q_f}{C_{ок}} - \frac{1}{C_{ок}} \int_0^{w_{ок}} \frac{w}{w_{ок}} \rho(x) dx, \quad (7)$$

де  $w_{ок}$  – товщина підзатворного оксиду,  $\rho(x)$  – густина заряду в оксиді, через яку інтегрується весь нерухомий фіксований заряд.

Із виразу (7) випливає, що нерухомий заряд на міжфазній межі і в оксиді, що фіксується гетеруванням та пасивацією зсуває CV-характеристику відносно осі напруг на певну величину. Якщо заряди  $Q_f$  і  $Q_m$  стабільні і фіксовані, то цей зсув напруги плоских зон  $U_{FB}$  викликає відповідний зсув порогових напруг К-МОН транзисторів:

$$U_{tn} = U_{FB} + 2 \left| \Phi_p \right| + \left| Q_d \right| / C_{ок}, \quad (8)$$

$$U_{tp} = U_{FB} - 2 \left| \Phi_n \right| - \left| Q_d \right| / C_{ок}, \quad (9)$$

де  $\Phi_p = -kT/q \cdot \ln N_a/n_i$ ,  $\Phi_n = kT/q \cdot \ln N_d/n_i$  – потенціали в кремнієвій підкладці p- і n-типів для n- і p-канальної структур відповідно;  $Q_d = Q_f + Q_m$  – ефективний фіксований заряд в оксиді, який може бути як позитивний, так і негативний.

Реальна поверхня монокремнію відрізняється від ідеальної тим, що між Si і SiO<sub>2</sub> є завжди перехідна область товщиною 0,3-0,5 нм, яка представляє собою мілкі пласти SiO<sub>2</sub>, Si<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO та Si<sub>2</sub>O. В таблиці 1 наведені експериментальні дані по складу оксиду, що формувався при  $T = 850^\circ\text{C}$ , і знятого інфрачервоною спектроскопією.

В такій перехідній області зосереджується заряд на межевих пастках  $Q_{it}$ , створених термічними напруженнями цих пластів, які утворюють дозволені енергетичні рівні в забороненій зоні і несуть назву поверхневих станів  $Q_{ss}$ . Заряд, що утворюється на іонізованих домішках (пастках) в підзатворному оксиді  $Q_{ot}$ , формується при дії на МОН структуру іонізуючих випромінювань та термічних напружень. Поверхневі стани  $Q_{ss}$  зв'язані з моно кремнієм і так як їх заповнення при рості оксиду залежить від поверхневого потенціалу, то вони перезаряджаються при швидкій зміні напруги зміщення на затворі. Такі поверхневі стани зумовлюють диференціальну ємність області просторового заряду  $C_{пз}$ :

$$C_{пз} = \frac{dQ_{ss}}{d\phi_n} = \frac{dQ_{it}}{d\phi_n} \quad (10)$$

Так як заряди на межевих пастках  $Q_{ot}$  утворюють

**Таблиця 1**

Склад перехідної області підзатворного діелектрика

№ п/п	Орієнтація монокремнію	Товщина оксиду, нм	Атомний % вмісту			
			SiO <sub>2</sub>	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO	Si <sub>2</sub> O
1	КДБ 10(111)	0,35	10,7	46,2	30,3	12,7
2	КДБ 45(100)	0,46	23,2	49,5	18,2	9,1
3	КДБ 80(100)	0,54	5,1	64,7	18,6	11,6
4	КЕФ 4,5(100)	0,43	21,3	49,1	18,2	11,4

дозволені рівні в забороненій зоні кремнію, то для них є справедлива статистика Фермі-Дірака і можна записати:

$$Q_{it} = Q_{ss} q N_{ss} f, \quad (11)$$

де  $f = 1/[1 + g \cdot \exp(E_{nc} - E_F - \phi_n q)/kT]$  – функція розподілу,  $N_{ss}$  – поверхнева густина пасток на межі Si-SiO<sub>2</sub>;  $g$  – коефіцієнт спінового виродження.

Ємність поверхневих станів буде максимальною при такому поверхневому потенціалі  $\phi_n$ , коли  $(E_{nc} - E_F - \phi_n q) = 0$  і  $g = 1$ . Якщо поверхневі стани неперервно розподілені по забороненій зоні кремнію, то можна вважати, що густина поверхневих станів є функцією енергії і її спектр визначається співвідношенням

$$N_{ss}(E) = \frac{1}{q} \cdot \frac{dQ_{ss}}{dE_{nc}} = \frac{1}{q} \cdot C_{nc}(E). \quad (12)$$

Крім збільшення ємності поверхні кремнію на величину  $C_{nc}$  присутність поверхневих станів змінює також залежність  $\phi_n$  від напруги зміщення МОН структури, бо електричне поле на пастках сумується з електричним полем напруги зміщення, аналогічно як і для фіксованого заряду. Але на відміну від нього, заряд на поверхневих станах може змінюватись вже при зміні поверхневого потенціалу. Це призводить до зсуву лише окремих ділянок CV-характеристики на величину  $\Delta U = Q_{ss} C_{ok}$ .

Кінетика електронних процесів біля поверхні кремнію може бути досліджена тільки з використанням нерівноважних імпульсних CV-характеристик при дії пиловидної чи трапецивидної напруги зміщення. Такий перезаряд пасток  $Q_{ot}$  в оксиді та на міжфазній межі Si-SiO<sub>2</sub>  $Q_{it}$  призводить до гістерезису CV-характеристики, яка подана на рис. 3. Він говорить про термодинамічну нестабільність оксиду і міжфазної межі Si-SiO<sub>2</sub>, по якій можна досить з великою точністю прогнозувати надійність структур ВІС. Саме нерівноважні імпульсні CV-характеристики дозволяють дослідити кінетику електронних процесів не тільки на пастках, але і на глибоких рівнях області просторового заряду кремнію біля поверхні в широкому спектрі поверхневих станів. В залежності від швидкості протікання електронного процесу швидкість розгортки імпульсної напруги може змінюватись від 10<sup>2</sup> В/с до 10<sup>8</sup> В/с. Так, при дослідженні найповільніших процесів – генерації неосновних носіїв при інверсії – швидкість розгортки імпульсної напруги зміщення вже може бути  $\geq 10^2$  В/с, а при дослідженні електронних процесів перезарядження швидких поверхневих станів  $Q_{it}$ ,  $Q_{ot}$  вона вже буде складати 10<sup>5</sup>-10<sup>9</sup> В/с. При такій швидкості розгортки напруги зміщення процес перезарядження цих станів вже не буде встигати за зміною напруги зміщення, тобто буде виконуватись умова:

$$\frac{dQ}{dt} \ll C_{ok} \frac{dU}{dt}, \quad (13)$$

де  $Q$  – заряд в МОН структурі.

За такою високою швидкістю розгортки імпульсної напруги  $dU/dt = 10^5$ -10<sup>7</sup> В/с буде встигати тільки заряд основних носіїв (електронів), а весь

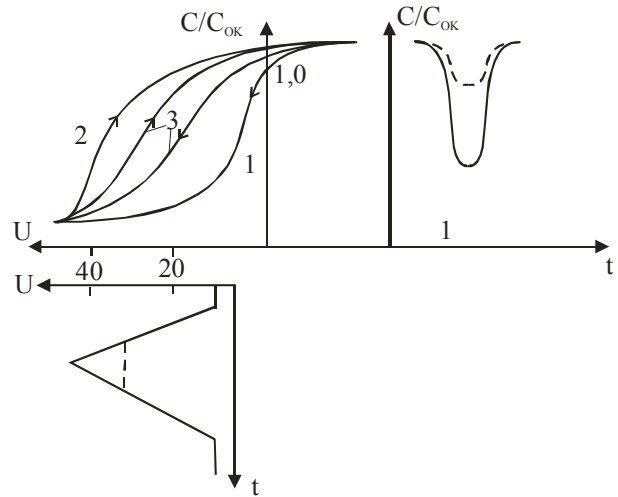


Рис. 3. Гістерезис імпульсної нерівноважної CV-характеристики: 1,2 – на передньому і задньому фронтах імпульсу при заморожених поверхневих станах; 3 – при наявності поверхневих станів

$$Q_{ss} = Q_{it}.$$

інший буде заморожуватись (не буде релаксувати). Цей сумарний заряд буде визначатись як:

$$Q = Q_{nn} + Q_{ok} + Q_{ss}, \quad (14)$$

де  $Q_{nn}$ ,  $Q_{ok}$ ,  $Q_{ss}$  – заряд неосновних носіїв (дірок), заряд в оксиді  $Q_{ok} = Q_{ot}$ , заряд на поверхневих станах  $Q_{ok} = Q_{it}$  відповідно, які будуть визначати положення CV-характеристики по осі напруг.

Для того, щоб визначити поверхневий потенціал  $\phi_n$ , необхідно щоб заряд неосновних носіїв  $Q_{nn} = 0$ , або встигав за імпульсною розгорткою, що досягається режимом збагачення поверхні кремнію при швидкості розгортки 10<sup>2</sup>-10<sup>3</sup> В/с. Процеси перезарядження, тобто зміни заморожених зарядів в часі, отримуються із порівняння імпульсних нерівноважних CV-характеристик, виміряних через певний час після подачі імпульсної трапецивидної напруги на МОН структуру за допомогою фронту і спаду імпульсів розгортки. Порівнюючи при цьому нерівноважні CV-характеристики, зняті на передньому і задньому фронтах імпульсів розгортки, отримуємо зсув по осі напруг на величину:

$$\Delta U = U_2 - U_1, \quad (15)$$

через яку визначається заряд  $\Delta Q$ , на який змінилась сума зарядів  $Q_{nn} + Q_{ot} + Q_{it}$  за час дії імпульсу згідно виразу:

$$\Delta Q = C_{ok} \Delta U. \quad (16)$$

Таким чином, в залежності від діапазону часу і прикладеної напруги зміщення до МОН структури ми вже можемо дослідити перезаряд будь-якого із трьох визначених компонентів поверхневого заряду. Наприклад, вибравши діапазон імпульсної напруги зміщення і тривалість імпульсу (фронту, спаду, амплітуди і полярності) так, щоб заряди неосновних носіїв  $Q_{nn}$  і заряд пасток в оксиді  $Q_{ot}$  залишались незмінними, а поверхневі стани  $Q_{it}$  перезаряджались повністю, можна визначити вже зміну заряду на поверхневих станах  $\Delta Q_{it}$ :

$$\Delta Q_{it} = C_{ok} \Delta U. \quad (17)$$

Тепер зупинимось на фізичній моделі таких нерівноважних процесів в МОН структурі при дії трапецивидного зміщення. Відомо, що застосування звичайного квазірівноважного методу CV-характеристик до реальної МОН структури, наприклад, яка має високу щільність як поверхневих (на межі Si-SiO<sub>2</sub>) пасток, так і бічних або глибоких нерівномірностей в розподілі пасток у підзатворному діелектрику, в результаті дає неадекватну картину електростатичних параметрів такої структури (напруги плоских зон і порогової напруги) [1,2]. Тому цей статичний метод неможливо використати не тільки для дослідження К-МОН структур, але і для прогнозування їх надійності. Нами в даній статті запропонований динамічний метод імпульсних нерівноважних CV-характеристик, замірених на трапецивидному імпульсі розгортки з тривалістю фронтів менших, ніж постійна часу релаксації зарядів в МОН структурі, за виключенням часу релаксації основних носіїв заряду, електронів. Це зв'язано з тим, що при самих високих на сьогоднішній день швидкостях розгортки заряд основних носіїв (електронів), що релаксує з постійною часу встановлення дифузійно-дрейфової рівноваги, буде мати порядок  $\epsilon_s/\sigma = 10^{-12}$  В/с ( $\epsilon_s$ ,  $\sigma$  – діелектрична проникливість та питома провідність кремнію відповідно) і буде встигати за будь-якою швидкістю імпульсної напруги розгортки, яку ми використовуємо при динамічному дослідженні МОН структури ( $10^2$ - $10^9$  В/с). В нашому випадку динамічний метод базується на вимірюваннях гістерезису між НІСВ-характеристикою (нерівноважною імпульсною), отриманою в процесі дії переднього і заднього фронтів трапецивидної напруги зміщення при змінній амплітуді, частоті та тривалості імпульсу. Це дозволяє використати даний метод для прогнозування надійності, сформованих структур ВІС, по релаксації зарядового стану МОН структури (в динамічному режимі), що є дуже актуальним для субмікронної технології великих інтегральних схем [3].

Нерівноважні імпульсні CV-характеристики можна отримати завдяки сповільненню процесу релаксації зарядів в МОН структурі шляхом її охолодження або прискорення перезарядження станів як в окислі, так і на межі розділу Si-SiO<sub>2</sub> чи в області просторового заряду, тобто зміною динамічного режиму [4]. Розглянемо формування імпульсних CV-характеристик на основі МОН структури, сформованої на основі кремнію n-типу, на яку діє лінійна розгортка у вигляді  $U = U(0) + \alpha t$ . Трикутний чи трапецивидний імпульси завжди можна подати у вигляді постійної складової та вищих гармонік, тобто на МОН структуру буде діяти напруга  $U + \tilde{U}e^{j\omega t}$ , де перша складова  $U = U(0) + \alpha t$  – напруга зміщення і лінійна розгортка, а друга – вищі гармоніки імпульсної напруги. Тобто, спад напруги на МОН структурі можна записати як:

$$U + \tilde{U}e^{j\omega t} = - \left[ Q_f + Q_{st} + Q_p + qN \left( W + \tilde{W}e^{j\omega t} \right) \right] C_{ok}^{-1} - \frac{qN}{2\epsilon_s} \left( W + \tilde{W}e^{j\omega t} \right)^2 + \Phi_{ms}$$

де  $Q_f$ ,  $Q_{st}$ ,  $Q_p$  – поверхневі густини еквівалентного стаціонарного заряду в підзатворному діелектрику (SiO<sub>2</sub>), заряду на поверхні розділу Si-SiO<sub>2</sub>, неосновних носіїв заряду в збідненому шарі відповідно;  $N$  – концентрація заряджених центрів в збідненому шарі;  $q$  – заряд електрона;  $W$ ,  $\tilde{W}$  – ширина збідненого шару і його амплітуда модуляція від напруги зміщення на затворі;  $\epsilon_s$  – діелектрична постійна кремнію;  $\Phi_{ms}$  – різниця в роботах виходу між електродом затвору і напівпровідником (Si);  $C_{ok}$  – питома ємність підзатворного діелектрика.

Якщо продиференціювати вираз (17) по часу  $t$  і провести аналіз дійсних і уявних частин, то отримаємо такі співвідношення при  $C = qNW/U$  як ємності збідненого шару, що визначатиме диференціальну форму CV-характеристики:

$$C = (C_{ok}^{-1} + W / \epsilon_s)^{-1}, \quad (18)$$

$$\frac{d}{dU} (C^{-2}) = - \frac{2}{qN\epsilon_s} \left( 1 + \frac{Q_{st} + Q_p}{\alpha C_{ok}} \right). \quad (19)$$

Інтегрування виразу (19) при початкових умовах  $U(0)$ ,  $Q_{st}(0)$ ,  $Q_p(0)$ ,  $C(0)$  дає вираз для імпульсної CV-характеристики в інтегральній формі:

$$C = C(0) \left\{ 1 - \frac{2C^2(0)}{qN\epsilon_s} \left[ U - U(0) + \frac{\Delta Q_{st} + \Delta Q_p}{C_{ok}} \right] \right\}^{1/2}, \quad (20)$$

де  $\Delta Q_p = Q_p - Q_p(0)$ ,  $\Delta Q_{st} = Q_{st} - Q_{st}(0)$ .

Визначимо тепер концепцію повної нерівноважної імпульсної CV-характеристики. Тобто, CV-характеристику називають повністю нерівноважною, коли поверхневі заряди  $Q_{st}$  і  $Q_p$  не змінюють своїх початкових величин. Відповідно цей критерій можна виразити в диференціальній та інтегральній формах у вигляді:

$$\left| \dot{Q}_p + \dot{Q}_{st} \right| \ll \alpha |C_{ok}| \quad (21)$$

$$\left| \Delta Q_p + \Delta Q_{st} \right| \ll |U - U(0)| / C_{ok} \quad (22)$$

Виходячи із вище приведеного аналізу, ми можемо вже сформулювати такі властивості нерівноважних імпульсних CV-характеристик:

1) будь-яка зміна зарядів  $Q_{st}$  і  $Q_p$  в процесі зняття високочастотних CV-характеристик дає зсув вздовж осі напруг по відношенню до нерівноважних на величину:

$$\Delta U = - (\Delta Q_p + \Delta Q_{st}) / C_{ok} \quad (23)$$

2) крутизна нерівноважних імпульсних CV-характеристик визначається густиною заряджених центрів в збідненому шарі (включаючи глибокі центри).

Таким чином, нерівноважні імпульсні CV-характеристики дають повну інформацію:

– про глибокі енергетичні рівні в напівпровіднику (Si), які перезаряджаються як швидко, так і повільно;

– зсув CV-характеристики по осі напруг інформує про зміну зарядів на межі Si-SiO<sub>2</sub> і в окислі

( $\Delta Q_{st} = \Delta Q_{ot} + \Delta Q_{it}$ ) та зміну поверхневої концентрації неосновних носіїв заряду в інверсійному шарі  $\Delta Q_p$ , яка визначається ступенем легування кремнію.

Тобто, релаксація зарядового стану МОН структури реалізується за допомогою трапецивидної (пиловидної) напруги зміщення при швидкості розгортки  $10^2-10^9$  В/с. В даному випадку початкове і кінцеве значення заряду МОН структури визначається вже по імпульсній нерівноважній CV-характеристиці, заміряній під час дії переднього і заднього фронтів імпульсу. Крім цього, зміна початкового заряду регулюється за допомогою встановлених амплітуд  $U_d$ ,  $U_a$  і тривалостей  $t_d$ ,  $t_a$  плоских частин імпульсу (рис. 4).

Інтегральна густина поверхневих станів визначається по максимальному зсуву CV-характеристики, що викликаний їх перезарядженням, шляхом переходу МОН структури із сильного збагачення в сильне збіднення чи інверсію або навпаки:

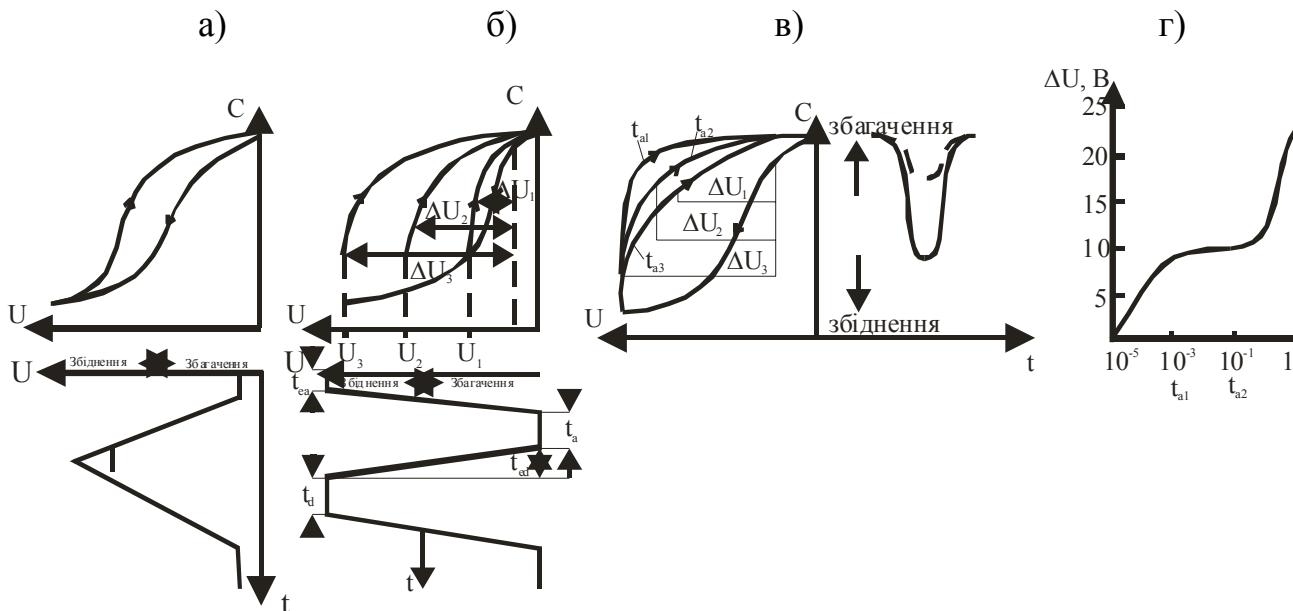
$$N_{ss} = C_{ox} \Delta U_{max} / q \cdot \quad (24)$$

Змінюючи тривалість імпульсів в широких межах як і швидкість розгортки, можна добитись перезарядження повільних і поверхневих станів, як це показано на рис. 4г, тобто можна стимулювати тільки визначені процеси перезарядження, що відповідають за термопольову стабільність підзатворного діелектрика і його надійність.

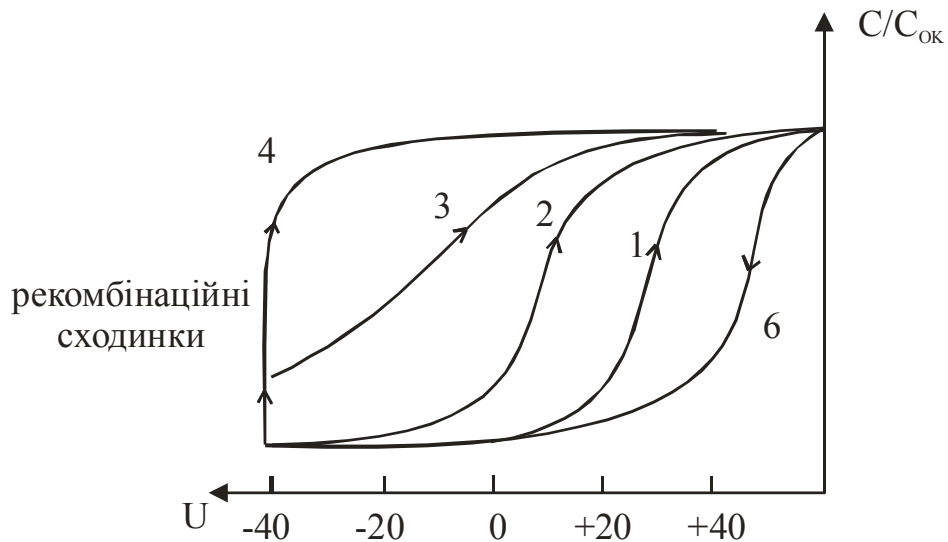
Тому, використовуючи термопольовий дрейф CV-характеристики, визначають відповідний дрейф порогової напруги, який говорить про наявність зарядів  $Q_f$  і  $Q_m$  в підзатворному діелектрику, зумовлених неякісним його гетеруванням та

хімічною обробкою. Тобто, такий дрейф порогової напруги  $\Delta U_{th}$  в межах  $\pm(1-3)$  В для  $T = +150-250^\circ\text{C}$  вказує на високу надійність сформованих МОН структур. Це відповідає надійності структур великих інтегральних схем на рівні  $(10-30) \cdot 10^{-6}$ .

Вперше і дуже ефективно нерівноважні імпульсні CV-характеристики були використані для дослідження технологічних процесів формування підзатворного діелектрика: хімічної обробки Si-пластин і термічним оксидуванням через генерацію неосновних носіїв заряду у поверхні монокремнію після зміщення МОН структури в режим глибокого збіднення (інверсії). В перший момент після подачі імпульсу зміщення ємність МОН структури зменшується нижче рівноважного значення (рис. 4в) за рахунок відходу основних носіїв від поверхні кремнію і розширення області об'ємного просторового заряду (ОПЗ). Вкінці перехідного процесу вже біля поверхні кремнію утворюється тонкий інверсійний шар з високою концентрацією неосновних носіїв  $Q_p$ , а ширина області збіднення приймає квазірівноважне значення. Тобто, вказуючи швидкість зміни ємності в часі  $\Delta C/\Delta t$  для температур  $+25$  і  $+150^\circ\text{C}$  ми визначаємо якість міжфазної межі Si-SiO<sub>2</sub> через термопольову стабільність заряду  $\Delta Q_{it}$  та якість підзатворного діелектрика SiO<sub>2</sub> через термічні напруження оксидного процесу, які викликають дрейф заряду пасток  $\Delta Q_{ot}$ . Коли тривалість імпульсу  $t_d$  складає біля 90-100 мс, це призводить до накопичення заряду і крутизна CV-характеристики відповідно зменшується. Генерація неосновних носіїв (дірок в n-Si при глибокому збідненні) проходить вже при тривалості імпульсу  $t_d$  меншим 90 мс і визначає так звану „рекомбінаційну



**Рис. 4.** Нерівноважні імпульсні CV-характеристики при різній дії імпульсної напруги: а) пиловидної (трикутної) напруги; б) трапецивидної – при різній амплітуді  $U_m$  імпульсів; в) трапецивидної – при різній тривалості імпульсів  $t_a$ ; г) процес перезарядки станів n-МОН структури ( $d_{ox} = 25$  нм,  $U_m = -25$  В);  $\leftarrow$  на передньому фронті імпульсу зміщення  $t_{ea}$ ,  $\rightarrow$  на задньому фронті імпульсу зміщення  $t_{ed}$ .



**Рис. 5.** Нерівноважні імпульсні CV-характеристики для n-MOS структури (Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Si) в залежності від тривалості імпульсу  $t_d$ : 1) 3 ms, 2) 100 ms, 3) 120 ms, 4) 500 ms, 5) 1s, 6) для збідненої області при частоті 20 МГц і  $\alpha = 10^6$  В/с та  $t_a = 1$  ms.

сходи́нку”, тобто рівень легування поверхні монокремнію.

І, накінець, з допомогою імпульсних нерівноважних CV-характеристик визначають концентрацію глибоких рівнів, йонізованих протягом тривалості дії імпульсу  $t_d$ :

$$N_d^* = \frac{C}{q\epsilon} \frac{d}{dC} [\Delta U(C)], \quad (25)$$

де  $\Delta U(C)$  – величина гістерезису напруги в області повної нерівноважності.

Або такий розрахунок можна провести через ширину об’ємного просторового заряду  $w_1$  (як усереднене значення концентрації глибоких рівнів по шару  $0 < x < w_1$ ):

$$N_d^* = \frac{1}{w_1} \int_0^{w_1} N_d^*(x) dx. \quad (26)$$

Якщо прийняти, що  $N_d^*(x) = C\Delta U/q$ , то після відповідного перетворення отримаємо:

$$N_d^* = \frac{1}{qw_1} \int_{\Delta U_1}^{\Delta U_{пл}} C d(\Delta U). \quad (27)$$

де  $\Delta U_{пл}$  – гістерезис імпульсної CV-характеристики при  $C = C_{пл}$  ( $C_{пл}$  – ємність плоских зон, а  $\Delta U_1$  – гістерезис при  $C = C_1$ , коли досягається максимальна нерівноважність. Тоді:

$$N_d^* = (\Delta U_1 - \Delta U_{пл}) C_{пл} / qw_1. \quad (28)$$

Таким чином, метод нерівноважних імпульсних CV-характеристик дозволяє ефективно оцінити вплив спектра різних домішок в кремнії, які дають глибокі рівні в забороненій зоні (Au, Ni, W, Mo, Ag, Fe, Cu), бо ці домішки визначають термопольову нестабільність параметрів приладних структур ВІС. Така величина концентрації глибоких рівнів  $N_d^*$  повинна бути  $\ll 10^{15}$  см<sup>-3</sup> при ширині  $w_1 \leq 1$  мк. Для їх визначення необхідно заморозити всі поверхневі стани  $Q_{it}$  та пасток  $Q_{ot}$  тоді швидкість розгортки трапецивидної напруги зміщення повинна бути в межах більше  $10^6$ - $10^7$  В/с.

На рис. 5 наведені експериментальні нерівноважні CV-характеристики MOS структури Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Si для різних тривалостей імпульсу  $t_d$ . Такі характеристики зумовлені високою концентрацією глибоких рівнів в кремнії за рахунок дислокаційних напружень нітриду кремнію. Коли тривалість імпульсу  $t_d \leq 1$  мс, то криві (6 і 1), заміряні під час переднього і заднього фронтів трапецивидного імпульсу, майже є паралельними. Це значить, що в межах плоскої частини імпульсу проходить електронна інжекція із неглибоких станів на межі розділу Si-SiO<sub>2</sub>. Але, коли  $t_d \cong 100$  мс, то крутизна кривої, що призводить до накопичення зарядів є дещо нижчою, ніж крутизна кривої, що призводить до збіднення. Це вказує на те, що концентрація глибоких рівнів збільшується, бо проходить глибоко-рівнева іонізація домішок в кремнії і утворює їх широкий спектр. При подальшому збільшенні тривалості імпульсу до  $t_d \cong 500$  мс і 1 с з’являється вже „рекомбінаційна сходи́нка”, що вказує на генерацію неосновних носіїв – дірок  $Q_p$  і розширення гістерезису більше рекомбінаційної сходи́нки, завдяки захопленню дірок поверхневими станами  $Q_{ot}$ ,  $Q_{it}$ . Тобто, тривалість імпульсу генерує спектр глибоких рівнів домішок в монокремнії, що відповідають за повільну нестабільність зарядового стану MOS структури.

Таким чином, виходячи із вище наведеного, можна зробити наступні висновки:

- величина амплітуди і полярність трапецивидного імпульсу відповідає за ступінь збагачення, збіднення чи інверсію поверхні MOS структури, ширину збідненої області та області інверсії;

- швидкість наростання і спаду імпульсу визначає ступінь замороження енергетичних станів (швидких і повільних), тобто формує вибірковість CV-характеристики;

- тривалість імпульсу визначає енергетичний

спектр швидких і повільних станів, або роздільну здатність методу нерівноважних імпульсних CV-характеристик;

– термопольовий дрейф CV-характеристики визначає не тільки якість формування МОН структури, але і її надійність;

– метод нерівноважних CV-характеристик дозволяє прогнозувати надійність структур ВІС на стадії їх формування та виключити із технологічного процесу як енергозатратні і малонадійні відбракувальні випробування.

– метод нерівноважних CV-характеристик

відпрацьований при прогнозуванні надійності структур однокристальних ВІС серій К 1816 ВЕ 48 та К 1830 ВЕ48.

**Новосядлий С.П.** – д.т.н., професор кафедри радіофізики та електроніки;

**Запукхляк Р.І.** – к.ф.-м.н., доцент кафедри радіофізики та електроніки.

**Мельник П.І.** – д.т.н., професор кафедри металофізики і новітніх технологій.

- [1] В.Г. Литовченко, А.П. Горбань. *Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник*. Наукова думка, Киев, 250 с. (1978).
- [2] В.М. Колешко, П.П. Гойденко, Л.Д. Буйко. *Контроль в технологии микроэлектроники*. Наука и техника, М. 312 с. (1979).
- [3] S. Novosiadlyi, M. Mykhalchuk, D. Fedasyuk. Basic Principles and Elements of highly effective System Technology of VLSI Microelectronics // *Proceedings of the 6-th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES'-99"*, Krakov, Poland, pp. 267-270 (1999).
- [4] Л.П. Павлов. *Методы измерения параметров полупроводниковых материалов*. Высшая школа, М. 240 с. (1987).
- [5] Ю.В. Воробьев, В.Н. Добровольский, В.И. Стриха. *Методы исследования полупроводников*. Высшая школа, Киев. 298 с. (1988).
- [6] В.В. Батавин, Ю.А. Концевой, Ю.В. Федорович. *Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур*. Радио и связь, М. 264 с. (1985).
- [7] С.П. Новосядлий. Електрофізичне діагностування надійності структур ВІС // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*, **367**, сс. 187-197 (1999).
- [8] 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).
- [9] V.D. Usikov, V.P. Romanov. Nonequilibrium High Frequency C-U Characteristics of MIS Structures Derived in Response to a Trapezoidal Voltage Sweep // *Physics State Solid*, **101**(503), pp. 503-513 (1987).

S.P. Novosyadlyy, R.I. Zapukhlyak, P.I. Melnyk

## Nonequilibrium Impulse CV-Characteristics of MOS Structures for Electrophysics Prognosis Reliability of Structures VLSI

*'Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University  
201, Galytska Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine*

In the article properties of the nonequilibrium impulse CV-characteristics of MIS (MOS) structures derived in response to a trapezoidal voltage pulse with edge times shorter than the recharge time constants of the interphase and semiconductor (Si) bulk electron state are analysed. It is shown how such nonequilibrium CV-characteristics can be used for electrophysics prognosis reliability of structures VLSI.