

Висновки: розроблено прототип аналізатора імпедансу на основі мікросхеми AD5933 та керівного мікроконтролера сім'ї MSP430 (Texas Instruments). За відносної простоти схемної реалізації вимірювальна система забезпечує вимірювання імпедансу від 10 Ом до 1 МОм у смузі частот 1–100 кГц з мінімальним кроком 50 Гц і базовою похибкою 3%. З огляду на те, що основні компоненти працюють на доволі низькій напрузі живлення (3.5 вольт) із мінімальним споживанням струму, подібні вимірювальні системи можуть знайти широке застосування у портативних вимірювальних приладах з автономним живленням. Зокрема, у вимірювачах CLR, приладах, призначених для електрохімічного аналізу речовин, імпедансної спектроскопії, для контролю якості елементів живлення та акумуляторних батарей.

Цифровий метод калібрування забезпечує гнучкість побудови вимірювального каналу, простоту калібрування, сталість метрологічних параметрів і є ба-

зою для реалізації цифрових методів корекції й компенсації передатних характеристик первинних перетворювачів у широкому частотному діапазоні.

1. AD5933 Datasheet: Analog Devices home page, (<http://www.analog.com>). 2. AD5933 Application Note № “ Measuring Grounded Impedance Profile Using the AD5933”, Analog Devices home page (<http://www.analog.com>). 3. Leonard E. Optimize speaker impedance matching for best audio results (<http://www.audiodesignline.com>). 4. Kazunari Okada, Toshima Sekido “Agilent Technologies Impedance Measurement Book”, December 2003, 125 p. 5. Angrisani L., Baccigalupi A., and Pietrosanto A.A Digital Signal-Processing Instrument for Impedance Measurement // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 45, No 6, December 1996, pp. 930–934. 6. Starostenko O., Vazquez Luna J. G., Zehe A., Khoma V. Novel advanced methods for high accuracy impedance measurements // Instrumentation and Development, Vol. 5, No.1, March 2001. – P. 27–38.

УДК 620.179.18, 621.3.019.34

ВИМІРЮВАННЯ ЗАРЯДОВОГО СТАНУ НА МЕЖІ SI-SIO₂ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМПЕДАНСНОЇ CV-ХАРАКТЕРИСТИКИ

© Бережанський Володимир, Новосядлий Степан, 2008

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,
м. Івано-Франківськ, Україна, 76025, berezhansky@mail.ru

Проаналізовано властивості нерівноважних вольт-фарадних (CV) характеристик МОН структури, знятих на трапецієдних імпульсах розгортки з тривалістю фронтів, меншою від часу перезарядження поверхневих станів і глибоких рівнів у напівпровіднику. Показано, що такі нерівноважні CV-характеристики можуть бути використані для електрофізичного діагностування надійності структур великих інтегральних схем на стадії їхнього формування.

Проанализированы свойства неравновесных вольт-фарадных (CV) характеристик металл-окисел-полупроводниковой структуры, снятых на трапециодальных импульсах развертки с продолжительностью фронтов, меньшей от времени перезаряджения поверхностных состояний и глубоких уровней в полупроводнике. Показано, что такие неравновесные CV-характеристики могут быть использованы для электрофизического диагностирования надежности структур больших интегральных схем на стадии их формирования.

In this article, properties of the nonequilibrium impulse CV-characteristics of MOS (MIS) structures are measured by response to a trapezoidal voltage pulse with edge times shorter than the recharge-time constants of the interface and semiconductor (Si) bulk electron states and analysed. It is shown how such nonequilibrium CV-characteristics can be used for electrophysical testing of reliability of LSI-circuit structures at the formation stage.

Досліджуючи електричні явища на поверхні напівпровідника, необхідно вимірювати і змінювати концентрацію рухомих носіїв заряду у приповерх-

невому його шарі. Польовий електрод, як електрод затвора метал-окисел-напівпровідникової (МОН)-структури, при прикладенні до нього електричної

напруги створює електричне поле, яке діє перпендикулярно до поверхні напівпровідника і тим самим змінює у певних межах концентрацію основних носіїв заряду. На відміну від методу ефекту поля, в якому концентрація рухомих носіїв заряду вимірюється за допомогою аналізу провідності напівпровідника, CV-метод ґрунтується 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 [1,5, 6].

Тому під час дослідження електронних явищ в МОН-структурі правильніше говорити вже про властивості міжфазної межі (МФМ) розділу Si-SiO₂, а не самої поверхні напівпровідника, наприклад, монокремнію, в якому формуються структури великих інтегральних схем (ВІС). У цьому разі властивості МФМ розділу визначаються вже як властивостями поверхні монокремнію, так і властивостями діоксиду кремнію як діелектрика.

Наявність у забороненій зоні напівпровідника (кремнію) дозволених енергетичних рівнів, які локалізовані як в шарі діоксиду SiO₂, так і на міжфазній межі Si-SiO₂ (при обірваних зв'язках кремнію), призводить до накопичення на них заряду, який вже називають поверхневим зарядом Q_{ss} . Дослідженнями встановлено чотири компоненти поверхневого заряду, які по-різному реагують на дію зовнішнього електричного поля, а саме: Q_m – рухомий заряд швидкодифундуючих іонів лужних та перехідних металів, які мігрують під дією електричного поля, його величина може бути істотно зменшена якісною хімічною обробкою в пергідрольному розчині надоцтової кислоти та хлорним гетерування при формуванні підзатворного діелектрика; такий заряд, що повільно релаксує, дрейфує під дією електричного поля або при термопольовій обробці, що призводить до ефектів нестабільності електричних властивостей МОН-структури і супроводжується гістерезисом CV-характеристики; Q_f – фіксований (постійний і нерухомий) заряд в оксиді, який призводить до зсуву CV-характеристик по осі напруг без зміни її форми; Q_{ss} – сумарний заряд поверхневих станів Q_{it} та заряду, зумовленого захопленням носіїв заряду на пастках Q_{ot} ($Q_{ss} = Q_{it} + Q_{ot}$); Q_{it} – вносить енергетичні рівні в заборонену зону кремнію і може взаємодіяти з розміщеним під ним монокремнієм; Q_{ot} – як заряд

пасток може бути або позитивним, або негативним залежно від того, якого типу носії заряду попадають на пастки в об'ємі SiO₂; заряд Q_{ss} доволі швидко змінюється під впливом електричного поля польового електрода МОН-структури і призводить до зміни форми CV-характеристики. На рис. 1 подано зарядову структуру оксидованого кремнію.

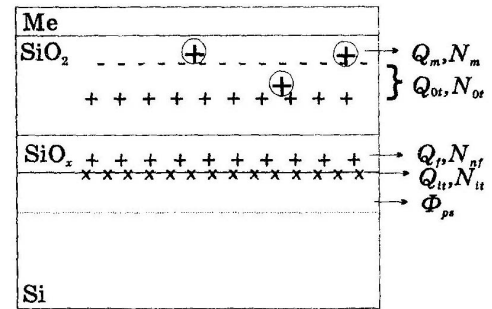


Рис. 1. Основні види зарядів в МОН-структурі

Залежно від типу провідності монокремнію (n- або p-типу) та полярності прикладеної до затвора МОН-структури можна отримати збагачений, збіднений та інверсний шари монокремнію [2]. На рис. 2 зображено енергетичні діаграми і розподіл зарядів МОН-структури для різних режимів зміщення.

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 у разі зростання частоти. Тобто ємність МОН-структури визначається послідовним з'єднанням ємностей оксиду $C_{ок}$ і області просторового заряду $C_{пз}$:

$$C = C_{ок} C_{пз} / (C_{ок} + C_{пз}) \tag{1}$$

Для кремнію n-типу можна записати:

— у режимах збагачення і збіднення

$$C_{пз} = C_{ок} + C_n \tag{2}$$

— у режимі сильного збагачення

$$C_{пз} = C_n \tag{3}$$

— у режимі інверсії для низької частоти

$$C_{пз} = C_{ок} + C_p \tag{4}$$

— у режимі сильного збіднення та інверсії для високої частоти

$$C_{пз} = C_{ок} \tag{5}$$

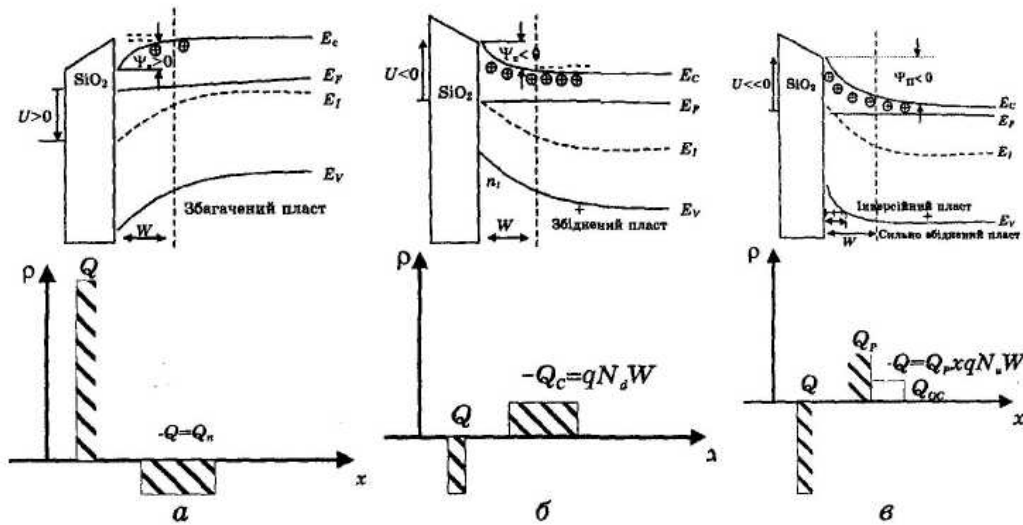


Рис. 2. Енергетичні діаграми і розподіл зарядів у n-МОН-структурі у різних режимах зміщення: а) при збагаченні поверхні; б) при збідненні поверхні; в) при інверсії поверхні

де ϵ_n — ємність електронів і дірок C_n, C_p , ємність збідненого шару C_{oc} , ємність просторового заряду C_{nz} , ємність підзатворного оксиду МОН-структури $C_{ок}$ визначаються такими співвідношеннями:

$$C_n = \frac{dQ_n}{dj_n} = \frac{e_s}{2L_D} \left(\frac{e^Y}{I} \right)^{1/2}$$

— ємність основних носіїв заряду (електронів), де

$$Y = \frac{qj_n}{kT}$$

— нормований поверхневий потенціал,

$$I = \frac{n_i}{n_0} = \frac{p_0}{p_i}$$

— ступінь легування кремнієвої підкладки;

$$L_D = \left(\frac{e_s kT}{2q^2 n_i} \right)^{1/2}$$

— довжина Дебая;

$$C_p = \frac{dQ_p}{dj_n} = \frac{e_s}{2L_D} (I e^{-Y})^{1/2}$$

— ємність неосновних носіїв заряду (дірок);

$$C_{oc} = \frac{dQ_{oc}}{dj_n} = \frac{e_s}{2L_D} (IY)^{-1/2}$$

— ємність збідненого шару за сильної інверсії;

$$C_{nz} = \frac{dQ_{nz}}{dj_n} = \frac{e_s [I(1 - e^{-Y}) - I^{-1}(1 - e^Y)]}{2L_D [I(e^Y - 1) + I^{-1}(e^Y - 1) + (I - I^{-1})Y]^{1/2}}$$

— ємність області просторового заряду;

$$C_{ок} = e_{ок} / w_{ок}$$

— ємність підзатворного оксиду МОН-структури.

У режимі плоских зон, коли $j_n = 0$ ($Y = 0$),

ємність просторового заряду буде

$$C_{ок} = \frac{e_s}{2L_D} \left(\frac{(I - I^{-1})}{2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Для електрофізичного діагностування надійності структур ВІС особливий інтерес становлять не рівноважні, квазістатичні CV-характеристики (коли прикладена до затвора напруга змінюється поступово – квазістатично), а нерівноважні (імпульсні) CV-характеристики, коли зміщення до затвора МОН-структури змінюється стрибком з високою частотою і швидкістю.

У разі достатньо різкого перемикавання МОН-структури з режиму збагачення в режим інверсії при імпульсній напрузі зміщення (пилкоподібній чи трапецієдній) зі швидкістю розгортки, більшою від 10^7 В/с, умова нейтральності буде забезпечуватись тільки за рахунок розширення області збідненого шару. Ємність МОН-структури буде зменшуватись із зростанням від'ємного зміщення (для n-Si). Такі CV-характеристики вже будуть нерівноважними, бо заряди і ємність МОН-структури при такому імпульсному зміщенні не будуть відповідати умовам термодинамічної рівноваги. Такий нерівноважний стан структури

зберігається недовго, бо відбувається генерація дірок і створюється вже інверсний шар з позитивним зарядом. Одночасно зменшується ширина збідненої області w , що призводить до збільшення ємності МОН-структури до рівноважного значення. Такий процес є короткотривалим і займає менше ніж 100 мс залежно від механізмів генерації неосновних носіїв заряду (дірок) в інверсному шарі. Щоб забезпечити такий нерівноважний стан, коли швидкість рекомбінації неосновних носіїв є більшою від швидкості їхньої генерації, необхідно, щоб швидкість розгортки напруги зсуву (наростання) була більшою за 10^7 В/с.

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

Напругу плоских зон U_{FB} , яка враховує різницю робіт виходу матеріалу електрода затвора і кремнію та наявність нерухомого заряду Q_f на міжфазній межі Si-SiO₂ і в самому оксиді, можна подати у вигляді

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

де $w_{ок}$ – товщина підзатворного оксиду; $r(x)$ – 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:

$$U_{Tn} = U_{FB} + 2|\Phi_p| + |Q_d|/C_{ок} \quad (8)$$

$$U_{Tp} = U_{FB} - 2|\Phi_n| - |Q_d|/C_{ок} \quad (9)$$

$$\text{де } \Phi_p = -(kT/q)(\ln N_a/n_i),$$

$\Phi_n = -(kT/q)(\ln N_d/n_i)$ – потенціали у кремнієвій підкладці p- і n-типів для n- і p-канальних структур відповідно; $Q_d = Q_f + Q_m$ – ефективний фіксований заряд в оксиді, який може бути як позитивним, так і негативним.

Реальна поверхня монокремнію відрізняється від ідеальної тим, що між Si і SiO₂ є завжди перехідна область товщиною 3–5 Å, яка являє собою мілкі пласти SiO₂, Si₂O₃, SiO та Si₂O. У таблиці наведено експериментальні дані зі складу оксидів, що сформувались при $T = 850^\circ\text{C}$, і визначеного за допомогою методу інфрачервоної спектроскопії.

У такій перехідній області зосереджується заряд на межових пастках Q_{it} , створених термічними напруженнями цих пластів, які утворюють дозволені енергетичні рівні у забороненій зоні і мають назву поверхневих станів Q_{ss} . Заряд, що утворюється на іонізованих домішках (пастках) у підзатворному оксиді Q_{or} , формується під дією на МОН-структуру іонізуючих випромінювань та термічних напружень. Поверхневі стани Q_{ss} пов'язані з монокремнієм і, оскільки їхнє заповнення при рості оксиду залежить від поверхневого потенціалу, то вони перезаряджаються у разі швидкої зміни напруги зміщення на затворі. Такі поверхневі стани зумовлюють диференціальну ємність області просторового заряду C_{nz}

$$C_{nc} = \frac{dQ_{ss}}{dj_n} = \frac{dQ_{it}}{dj_n} \quad (10)$$

Оскільки заряди на межових пастках Q_{or} утворюють дозволені рівні у забороненій зоні кремнію, то для них є справедливою статистика Фермі–Дірака і можна записати

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

де $f = 1/[1 + g \exp(E_{nc} - E_F - j_n q/kT)]$ – функція розподілу; N_{ss} – поверхнева густина пасток на межі Si-SiO₂; g – коефіцієнт спінового виродження.

Склад перехідної області підзатворного діелектрика

№ з/п	Орієнтація монокремнію	Товщина оксиду, Å	Атомний вміст, %			
			SiO ₂	Si ₂ O ₃	SiO	Si ₂ O
1	КДБ 10(111)	3,5	10,7	46,2	30,3	12,7
2	КДБ 45(100)	4,6	23,2	49,5	18,2	9,1
3	КДБ 80(100)	5,4	5,1	64,7	18,6	11,6
4	КЕФ 4,5(100)	4,3	21,3	49,1	18,2	11,4

Ємність поверхневих станів буде максимальною за такого поверхневого потенціалу j_n , коли $(E_{nc} - E_F - j_n q) = 0$ 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

$$N_{ss}(E) = \frac{1}{q} \frac{dQ_{ss}}{dE_{nc}} = \frac{1}{q^2} C_{nc}(E) \quad (12)$$

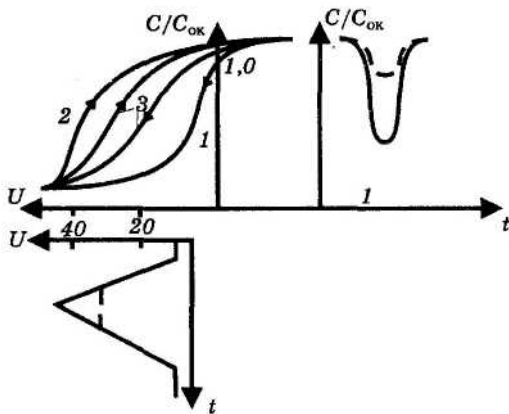


Рис. 3. Гістерезис імпульсної нерівноважної CV-характеристики: 1, 2 – на передньому і задньому фронтах імпульсу при заморожених поверхневих станах; 3 – за наявності поверхневих станів $Q_{ss} = Q_{it}$.

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

Кінетику електронних процесів біля поверхні кремнію можна дослідити тільки з використанням нерівноважних імпульсних CV-характеристик при дії пилкоподібної чи трапеціодної напруги зміщення. Такий перезаряд пасток Q_{ot} в оксиді та на міжфазній межі Si-SiO₂ Q_{it} призводить до гістерезису CV-характеристики, яку подано на рис. 3. Він свідчить про термодинамічну нестабільність оксиду і міжфазної межі

Si-SiO₂, за якою можна з доволі великою точністю прогнозувати надійність структур ВІС. Саме нерівноважні імпульсні CV-характеристики дають змогу дослідити кінетику електронних процесів не тільки на пастках, але і на глибоких рівнях області просторового заряду кремнію біля поверхні у широкому спектрі поверхневих станів. Залежно від швидкості проходження електронного процесу швидкість розгортки імпульсної напруги може змінюватись від 10² до 10⁸ 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 становити 10⁵–10⁹ В/с. За такої швидкості розгортки напруги зміщення перезарядження цих станів вже не буде встигати за зміною напруги зміщення, тобто буде виконуватись умова

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

де Q – заряд у МОН-структурі.

За такою високою швидкістю розгортки імпульсної напруги $dU/dt = 10^5$ –10⁷ В/с буде встигати тільки заряд основних носіїв (електронів), а весь інший буде заморожуватись (не буде релаксувати). Цей сумарний заряд буде визначатись як

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

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

Для того, щоб визначити поверхневий потенціал j_n , необхідно, щоб заряд неосновних носіїв $Q_{nn} = 0$ або встигав за імпульсною розгорткою, що досягається режимом збагачення поверхні кремнію за швидкості розгортки 10²–10³ В/с. Процеси перезарядження, тобто зміни заморожених зарядів в часі, отримуються із порівняння імпульсних нерівноважних CV-характеристик, виміряних через певний час після подання імпульсної трапеціодної напруги на МОН-структуру за допомогою фронту і спаду імпульсів розгортки. Порівнюючи 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 ΔQ , на який змінилась сума зарядів $Q_{ин} + Q_{0t} + Q_{it}$ за час дії імпульсу згідно з виразом

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

Отже, залежно від діапазону часу і прикладеної напруги зміщення до МОН-структури, ми вже можемо дослідити перезарядження 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 $Q_{ин}$ і заряд пасток в оксиді Q_{0t} залишались незмінними, а поверхневі стани Q_{it} перезаряджались повністю, можна визначити вже зміну заряду на поверхневих станах ΔQ_{it}

$$\Delta Q_{it} = C_{ок} \Delta U. \quad (16a)$$

Тепер зупинимось на фізичній моделі таких нерівноважних процесів у МОН-структурі при дії трапецієдного зміщення. Відомо, що застосування звичайного квазірівноважного методу CV-характеристик до реальної МОН-структури, наприклад, яка має високу щільність як поверхневих (на межі Si-SiO₂) 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, 5]. Тому цей статичний метод неможливо використати не тільки для дослідження К-МОН-структур, але і для прогнозування їхньої надійності. Нами запропоновано динамічний метод імпульсних нерівноважних CV-характеристик, замірних на трапецієдному імпульсі розгортки з тривалістю фронтів, меншою, ніж стала часу релаксації зарядів в МОН-структурі, за винятком часу релаксації основних носіїв заряду – електронів. Це пов'язано з тим, що при найвищих сьогодні швидкостях розгортки заряд основних носіїв (електронів), що релаксує із сталою часу встановлення дифузійно-дрейфової рівноваги, матиме порядок $e_s/S = 10^{-12}$ В/с (e_s , S – діелектрична проникність та питома провідність кремнію відповідно) і встигатиме за будь-якою швидкістю імпульсної напруги розгортки, яку ми використовуємо під час динамічного дослідження МОН-структури (10^2 – 10^9 В/с). У нашому випадку динамічний метод ґрунтується на вимірюваннях гістерезису між

нерівноважною імпульсною CV-характеристикою, отриманою під час дії переднього і заднього фронтів трапецієдної напруги зміщення за змінних амплітуди, частоти та тривалості імпульсу. Це дає змогу використати цей метод для прогнозування надійності сформованих структур ВІС за релаксацією зарядового стану МОН-структури (у динамічному режимі), що є дуже актуальним для субмікронної технології ВІС [3, 7, 8].

Нерівноважні імпульсні CV-характеристики можна отримати завдяки сповільненню релаксації зарядів у МОН-структурі за допомогою її охолодження або прискорення перезарядження станів як в оксиді, так і на межі розділу Si-SiO₂ чи в області просторового заряду, тобто зміною динамічного режиму [4, 8]. Розглянемо формування імпульсних CV-характеристик на основі МОН-структури, сформованої на основі кремнію n-типу, на яку діє лінійна розгортка у вигляді $U = U(0) + at$. Трикутний чи трапецієдний 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 $U = U(0) + at$ – напруга зміщення і лінійна розгортка, а друга – вищі гармоніки імпульсної напруги. Тобто спад напруги на МОН-структурі можна записати як

$$U + \tilde{U} e^{j\omega t} = - \left[Q_f + Q_{st} + Q_p + qN \left(W + \tilde{W} e^{j\omega t} \right) \right] C_{ок}^{-1} - \frac{qN}{2e_s} \left(W + \tilde{W} e^{j\omega t} \right)^2 + \Phi_{ms}, \quad (17)$$

де Q_f , Q_{st} , Q_p – поверхневі густини еквівалентного стаціонарного заряду у підзатворному діелектрику (SiO₂), заряду на поверхні розділу Si-SiO₂, неосновних носіїв заряду у збідненому шарі відповідно; N – концентрація заряджених центрів в збідненому шарі;

q – заряд електрона; W , \tilde{W} – ширина збідненого шару та його амплітудна модуляція від напруги зміщення на затворі; e_s – діелектрична стала кремнію;

Φ_{ms} – різниця у роботах виходу між електродом затвора і напівпровідником (Si); $C_{ок}$ – питома ємність підзатворного діелектрика.

Якщо продиференціювати вираз (17) по часу t і проаналізувати дійсні і уявні частини, то отримаємо

такі співвідношення при $C = qNW/U$ як ємності збідненого шару, що визначатиме диференціальну форму CV-характеристики

$$C = (C_{ок}^{-1} + W/e_s)^{-1}, \tag{18}$$

$$\frac{d}{dU}(C^{-2}) = -\frac{2}{qNe_s} \left(1 + \frac{Q_{st} + Q_p}{aC_{ок}} \right) \tag{19}$$

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

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

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 початкових величин. Відповідно цей критерій можна виразити в диференціальній та інтегральній формах у вигляді

$$\left| \dot{Q}_p + \dot{Q}_{st} \right| \ll |a| C_{ок} \tag{21}$$

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

З урахуванням наведеного вище аналізу ми можемо вже сформулювати такі властивості нерівноважних імпульсних CV-характеристик:

1. Будь-яка зміна зарядів Q_{st} і Q_p під час зняття високочастотних CV-характеристик дає зсув вздовж осі напруг стосовно нерівноважних на величину

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

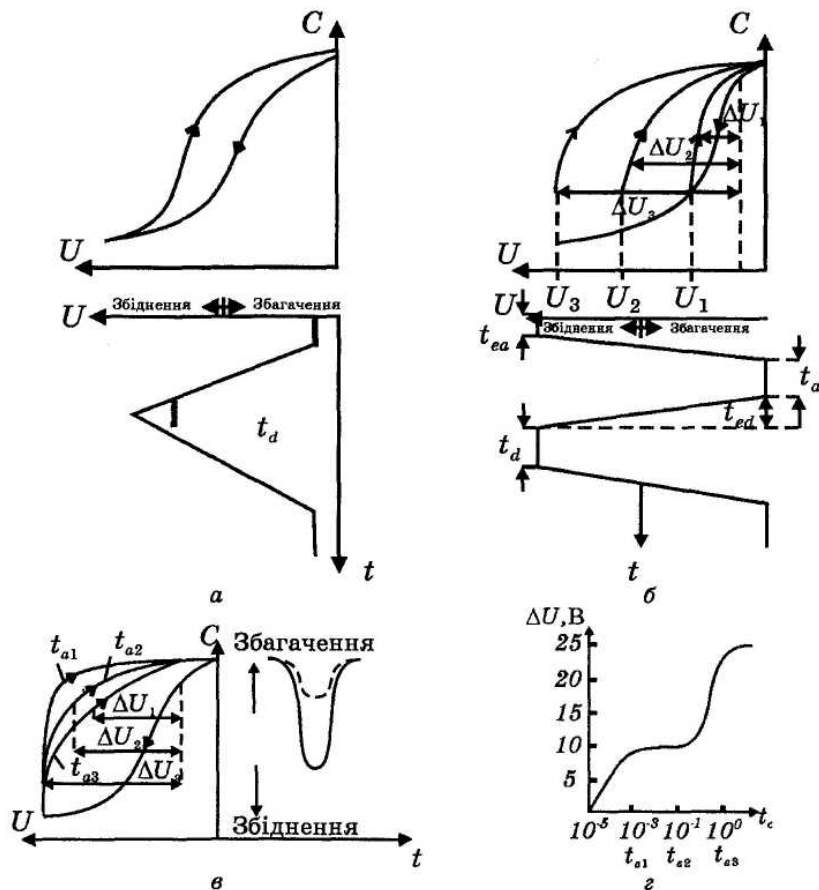


Рис. 4. Нерівноважні імпульсні CV-характеристики при різній дії імпульсної напруги: а) пилкоподібної (трикутної) напруги; б) трапецієдної – при різній амплітуді U_m імпульсів; в) трапецієдної – при різній тривалості імпульсів t_a ; г) перезарядження станів n-МОН-структури ($d_{ox} = 250 \text{ \AA}$, $U_m = -25 \text{ V}$); \leftrightarrow на передньому фронті імпульсу зміщення t_{ea} \rightarrow на задньому фронті імпульсу зміщення t_{ed} .

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

Отже, нерівноважні імпульсні CV-характеристики дають повну інформацію:

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

— зсув CV-характеристики по осі напруг інформує про зміну зарядів на межі Si-SiO₂ і в оксиді ($\Delta Q_{st} = \Delta Q_{ot} + \Delta Q_{it}$) та зміну поверхневої концентрації неосновних носіїв заряду в інверсійному шарі ΔQ_p , яка визначається ступенем легування кремнію.

Тобто релаксація зарядового стану МОН-структури реалізується за допомогою трапеціодної (пилкоподібної) напруги зміщення при швидкості розгортки 10²-10⁹ В/с. У такому разі початкове і кінцеве значення заряду МОН-структури визначається вже за імпульсною нерівноважною CV-характеристикою, заміряною 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 , та плоских частин імпульсу (рис. 4).

Інтегральна густина поверхневих станів визначається за максимальним зсувом CV-характеристики, викликаним їхнім перезарядженням, переведенням МОН-структури із сильного збагачення у сильне збіднення чи інверсію, або навпаки

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

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

Тому, використовуючи термопольовий дрейф CV-характеристики, визначають відповідний дрейф порогової напруги, який свідчить про наявність зарядів Q_f і Q_m у підзатворному діелектрику, зумовлених неякісним його гетеруванням та хімічним обробленням. Тобто такий дрейф порогової напруги ΔU_{th} у межах $\pm(1-3)$ В для $T = +150-250^\circ\text{C}$ вказує на високу надійність сформованих МОН-структур. Це відповідає надійності структур ВІС на рівні 10-30 ppm.

Вперше і дуже ефективно нерівноважні імпульсні CV-характеристики було використано для дослідження технологічних процесів формування підзатворного діелектрика: хімічного оброблення Si-пластин і термічного оксидування через генерацію неосновних носіїв заряду у поверхні монокремнію після зміщення МОН-структури в режим глибокого збіднення (інверсії). У перший момент після подавання імпульсу зміщення ємність МОН-структури зменшується нижче від рівноважного значення (рис. 4, в) за рахунок відходу основних носіїв від поверхні кремнію і розширення області об'ємного просторового заряду. У кінці перехідного процесу вже біля поверхні кремнію утворюється тонкий інверсійний шар з високою концентрацією неосновних носіїв Q_p , а ширина області збіднення набуває квазірівноважного значення. Тобто, вказуючи швидкість зміни ємності в часі $\Delta C/\Delta t$ для температур +25 і +150°C, ми визначаємо якість міжфазної межі Si-SiO₂ через термопольову стабільність заряду ΔQ_{it} та якість підзатворного діелектрика SiO₂ через термічні напруження оксидного процесу, які викликають дрейф заряду пасток ΔQ_{ot} . Коли тривалість імпульсу t_d становить близько 90-100 мс, це призводить до накопичення заряду і крутість CV-характеристики відповідно зменшується. Генерація неосновних носіїв (дірок в n-Si при глибокому збідненні) відбувається вже за тривалості імпульсу t_d , меншої від 90 мс, і визначає так звану "рекомбінаційну сходінку", тобто рівень легування поверхні монокремнію.

І, нарешті, за допомогою імпульсних нерівноважних CV-характеристик визначають концентрацію глибоких рівнів, іонізованих протягом тривалості дії імпульсу t_d :

$$N_d^* = \frac{C^3}{qe} \frac{d}{dC} [\Delta U(C)], \quad (25)$$

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

Або такий розрахунок можна здійснити через ширину об'ємного просторового заряду w_l (як усереднене значення концентрації глибоких рівнів по шару $0 < x < w_l$)

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

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

$$\overline{N_d^*} = \frac{1}{qw_1} \int_{\Delta U_{nl}}^{\Delta U_1} Cd(\Delta U), \quad (27)$$

де ΔU_{nl} – гістерезис імпульсної CV-характеристики при $C = C_{nl}$ (C_{nl} – ємність плоских зон, а ΔU_1 – гістерезис при $C = C_l$, коли досягається максимальна нерівноважність). Тоді

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

Отже, метод нерівноважних імпульсних CV-характеристик дає можливість ефективно оцінити вплив спектра різних домішок в кремнії, які дають глибокі рівні у забороненій зоні (Au, Ni, W, Mo, Ag, Fe, Cu), бо ці домішки визначають термопольову нестабільність параметрів приладних структур ВІС.

Така величина концентрації глибоких рівнів $\overline{N_d^*}$ повинна бути $\ll 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при ширині $w_l \leq 1 \text{ мкм}$. Для їхнього визначення необхідно заморозити всі поверхневі стани Q_{it} та пастки Q_{0i} , тоді швидкість розгортки трапецієдної напруги зміщення повинна бути більшою за $10^6\text{--}10^7 \text{ В/с}$.

Отже, зважаючи на наведене, можна зробити такі висновки:

— величина амплітуди і полярність трапецієдного імпульсу відповідають за ступінь збагачення, збіднення чи інверсію поверхні МОН-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 дає змогу прогнозувати надійність структур ВІС на стадії їхнього формування та виключити із технологічного процесу всі енергозатратні і малонадійні відбракувальні випробування.

1. Литовченко В.Г., Горбань А.П. *Основы физики микроэлектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник*. – К.: Наук. думка, 1978.
2. Колешко В.М., Гойденко П.П., Буйко Л.Д. *Контроль в технологии микроэлектроники*. – М.: Наука и техника, 1979.
3. Novosiadlyi S., Mykhalchuk M. and Fedasyuk D., *Proc. 6-th Int. Conf. "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES'99"*, Krakow, Poland, 1999.– P. 267–270.
4. Павлов Л.П. *Методы измерения параметров полупроводниковых материалов*. – М.: Высшая школа, 1987.
5. Воробьев Ю.В., Добровольский В.Н., Стриха В.И. *Методы исследования полупроводников*. – К.: Высшая школа, 1988.
6. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. *Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур*. – М.: Радио и связь, 1985.
7. Plitwud D.M. *Appl. Phys. Lett*, 55, No. 5: 466 (1989).
8. Usikov V.D. and Romanov V.P. *Phys. State Solid*, 101, No. 503: 503 (1987).