

УДК 539.2: 537.222

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНИХ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ МДН-ТРАНЗИСТОРІВ

Б. Коман

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна  
e-mail: bogdan\_28@mail.ru*

Наведено методику дослідження радіаційно-індукованих змін параметрів МДН-транзисторів, що ґрунтується на експериментальних кривих стоко-затворних підпорогових струмів. Уважають, що радіаційно-індукований заряд у підзатворному діелектрику пропорційний до зсуву напруги середини забороненої зони  $\Delta U_{MG}$ . Описано автоматизований експериментальний вимірювальний комплекс на базі IBM-PC для вимірювання підпорогових струмів МДН-транзисторів та програмну реалізацію опрацювання експериментальних результатів.

*Ключові слова:* підпорогові струми, заряд, МДН-транзистор, порогова напруга, параметри, методика.

Нижче запропоновано методику оцінки радіаційно-індукованих змін основних параметрів кремнієвих МДН-транзисторів – порогової напруги  $\Delta U_{th}$  та щільності станів  $D_{it}$  на межі Si-SiO<sub>2</sub> з використанням оригінального автоматизованого експериментального вимірювального комплексу на базі IBM-PC. В основі методики – припущення, що радіаційно-індукований заряд у підзатворному діелектрику SiO<sub>2</sub> пропорційний до зсуву напруги середини забороненої зони  $\Delta U_{MG}$  [1]. Уважають, що радіаційно-індукований зсув порогової напруги  $\Delta U_{th}$  складається з двох адитивних компонент:  $\Delta U_{Not}$ , яка зумовлює зсув напруги завдяки радіаційно-індукованому заряду на пастках підзатворного діелектрика, та  $\Delta U_{Nit}$ , що зумовлює зсув порогової напруги завдяки заряду на пастках поверхневих станів (ПС) границі Si-SiO<sub>2</sub>.

Базовими експериментальними результатами для оцінки  $\Delta U_{MG}$  та компонент  $\Delta U_{Not}$ ,  $\Delta U_{Nit}$  є стоко-затворні криві підпорогових струмів  $I_d(U_G)$  вихідних та опромінених МДН-транзисторів.

### 1. Теорія методу

**Рівняння ВАХ МДН-транзистора в підпороговій області.** Підпороговим називають струм стоку за напруги на затворі, яка менша від порогової ( $U_{B3} \leq U_{пор}$ ). Фізично це означає, що підпороговий струм виникає, коли поверхневий потенціал  $\Psi_s$  є в межах  $\phi_B \leq \Psi_s \leq 2\phi_B$ . Згідно з [2], його визначають так:

$$\psi_S = 2\varphi_B = \left( \frac{2kT}{q} \right) \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right),$$

де  $N_A$  – концентрація легувальних домішок у підкладці;  $n_i$  – власна концентрація носіїв;  $\varphi_B$  – потенціал напівпровідника, визначений як  $\varphi_B = \frac{E_F - E_i}{q}$ .

Цей діапазон характеристик називають слабкою інверсією. Концентрація неосновних носіїв в області близько поверхні дорівнює власній концентрації носіїв для  $\psi_S = \varphi_B$ , а для  $\psi_S = 2\varphi_B$  виникає дрейфова складова струму. Для  $\psi_S < 2\varphi_B$  струм у каналі тече практично лише завдяки дифузії, проте з наближенням  $\psi_S$  до  $2\varphi_B$  виникає дрейфова складова струму.

Припустимо, що струм у підпороговій області має винятково дифузійну природу, запишемо

$$I_D = -qAD_n \frac{\partial n}{\partial x}, \quad (1)$$

де  $A$  – поперечний переріз каналу протікання струму;  $D_n$  – коефіцієнт дифузії електронів. Оскільки струм стоку вздовж каналу є постійним, то останнє рівняння можна переписати у вигляді

$$I_D = qAD_n \frac{[n(0) - n(L)]}{L},$$

де  $n(0)$  – концентрація електронів біля витоку каналу;  $n(L)$  – концентрація, визначена біля стокового кінця каналу.

Ці концентрації визначають з рівнянь

$$\begin{aligned} n(0) &= p_0 e^{\beta\psi} \\ n(L) &= p_0 e^{\beta\psi_S - \beta U_{BC}}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\psi_S$  – поверхневий потенціал біля витоку. Ефективна поперечна площа каналу дорівнює добутку ширини каналу  $z$  на ефективну товщину інверсного шару в напрямі, перпендикулярному до поверхні. Оскільки концентрація електронів експоненціально залежить від потенціалу  $\psi_S$ , то ефективна товщина каналу дорівнює відстані від поверхні, на якій потенціал зменшується на значення порядку  $\frac{kT}{q}$ . Отже, ефективна товщина

каналу –  $\frac{kT}{q\epsilon_S}$ , де  $\epsilon_S$  – поверхнєве електричне поле, яке в режимі слабкої інверсії задане

виразом

$$\epsilon_S = -\frac{Q_B}{\epsilon_S} = \sqrt{\frac{2qN_A\psi_S}{\epsilon_S}}. \quad (3)$$

Підставимо вирази (2), (3) в (1), отримаємо рівняння ВАХ для підпорогового струму:

$$I_D = \mu_n \left( \frac{Z}{L} \right) \frac{qC_i}{2\beta^2} \left( \frac{n_i}{N_A} \right) \left( 1 - e^{-\beta U_{BC}} \right) e^{\beta\psi_S} (\beta\psi_S)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Тут використано співвідношення Ейнштейна  $D_n = \frac{\mu_n kT}{q}$  і безрозмірний параметр  $a$ , що характеризує структуру.

З виразу (4) випливає, що в підпороговій області струм стоку експоненціально збільшується з підвищенням напруги на затворі  $U_3$  і перестає залежати від напруги стоку при  $U_C > \frac{3kT}{q}$ .

Поверхневий потенціал  $\Psi_S$  біля витoku записують через напругу на затворі  $U_3$  [2] так:

$$\Psi_S = (U_G - U_{FB}) - \frac{a^2}{2\beta} \left\{ \left[ 1 + \frac{4}{a^2} (\beta U_G - \beta U_{FB} - 1) \right]^{1/2} - 1 \right\}. \quad (5)$$

За допомогою формул (4) і (5) можна визначити характерну зміну напруги на затворі  $S$ , необхідну для зміни струму стоку на порядок. За визначенням

$$S \equiv \ln 10 \frac{dU_G}{d(\ln I_C)} = \frac{kT}{q} \ln 10 \frac{d(\beta U_G)}{d(\ln I_C)} = \frac{kT}{q} \ln \left[ 1 + \frac{C_D(\Psi_S)}{C_i} \right] \left\{ 1 - \left( \frac{2}{a^2} \right) [C_D(\Psi_S)/C_i]^2 \right\}.$$

Зазвичай,  $a \gg \frac{C_D}{C_i}$ , тоді

$$S \approx \frac{kT}{q} \ln 10 \left( 1 + \frac{C_D}{C_i} \right). \quad (6)$$

Складова в дужках є відношенням ємнісного дільника  $\frac{C_1 + C_D}{C_i}$ .

У структурах з високою густиною поверхневих станів  $D_{it}$  ефективну ємність поверхневих станів  $C_{it} = qD_{it}$  потрібно "увімкнути" паралельно до ємності збідненого шару  $C_D$ , тобто у виразі (6)  $C_D$  замінити на  $(C_D + C_{it})$ . У цьому разі

$$S_{D_{it}} \approx \frac{kT}{q} \ln 10 \left( 1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_i} \right).$$

У випадку прикладання до підкладки МДН-транзистора зворотного зміщення збільшується поверхневий потенціал  $\Psi_S$  та зменшується ємність збідненого шару  $C_D$ , а отже, змінюється розтяг характерної затворної напруги  $S$ .

Наголосимо на двох важливих характеристиках підпорогового струму. По-перше, струм експоненціально залежить від  $\Psi_S$ . У залежність між  $U_{BC}$  і  $\Psi_S$  входить спад напруги в окислі. Підпорогові криві є лінійними доти, доки транзистор не почне відкриватися. По-друге, для  $U_{BC} > 0,1$  В від'ємний експоненціальний член, що входить у (4), стає дуже малим, і напруга стоку перестає впливати на підпороговий струм.

Незалежність  $I_C$  від  $U_C$  на підпороговій ділянці характерна для довгоканальної поведінки МДН-транзистора.

**Методика оцінки внеску поверхневих пасток та заряду на пастках підзатворного діелектрика у радіаційно індукований зсув порогової напруги та щільності електронних станів з ВАХ підпорогових струмів МДН-транзистора.**

**Зсув порогової напруги.** Підпорогові струми МДН-транзисторів у режимі насичення, згідно з (4), можна записати аналітично як функцію поверхневого згину зон у вигляді

$$I_C = \sqrt{2} C_m (q N_A L_B / \beta) n_i / N_A)^2 \cdot \exp(\beta \Psi_S)^{-1/2}, \quad (7)$$

де  $\Psi_S$  – згин зон на поверхні;  $N_A$  – рівень легування каналу;  $n_i$  – власна концентрація носіїв;  $L_B$  – довжина Дебая, задана  $L_B = [\epsilon_S / (\beta q N_A)]^{1/2}$ ;  $\beta = q / kT$ , де  $W$  – ширина каналу,  $L$  – його довжина. Використовуючи експериментальні криві підпорогових струмів, можна визначити характерні коефіцієнти та в кінцевому варіанті основні параметри транзистора.

Зокрема, коефіцієнт  $C_m$  визначають з нахилу лінійної ділянки залежності  $\sqrt{I_C} = f(U_3)$  в стані насичення, оскільки:

$$I_C = C_m \cdot C_{ox} (U_3 - U_{thex})^2, \quad (8)$$

де  $\Delta U_{thex}$  – екстрапольоване (на вісь напруги затвору) значення порогової напруги. В цих розрахунках ємність оксиду  $C_{ox}$  приймають за константу (після різних доз опромінення).

На наступному етапі розраховують значення так званого середньозонного струму  $I_{mg}$  з рівняння (2), використовуючи вже відоме значення  $C_m$ . З експериментальних кривих підпорогових струмів для відповідних значень середньозонного струму знаходять відповідне значення середньозонної напруги  $U_{mg}$ . Середньозонний струм, як відомо, відповідає згину зон на значення  $\Phi_b$ , де  $\Phi_b = \left( \frac{kT}{q} \right) \ln(N_A / n_i)$ . Отже, використовуючи

криві підпорогових струмів для різних доз опромінення, розрахункові значення  $I_{mg}$ , визначають радіаційно-індукований зсув порогової напруги  $\Delta U_0$  та середньозонної напруги  $U_{mg}$ .

Щоб розділити внески різних факторів у зсув порогової напруги, треба усвідомити, як кожна з компонент ( $N_{it}, N_{ot}$ ) впливає на характер підпорогового струму. Вплив поверхневих пасток відображає зонна діаграма на рис. 1. Прийнято вважати, що поверхневі пастки у верхній половині забороненої зони – це акцептори, а поверхневі пастки у нижній частині забороненої зони – донори (модельне уявлення). Оскільки в процесі функціонування транзистора енергетичні зони вигнуті вниз (інвертований  $n$  - канал), то щораз більша кількість акцепторних поверхневих пасток потрапляє нижче від рівня Фермі і набуває негативного заряду. Тому реальна експериментальна крива підпорогового струму проходить між середньозонною і пороговою кривими.

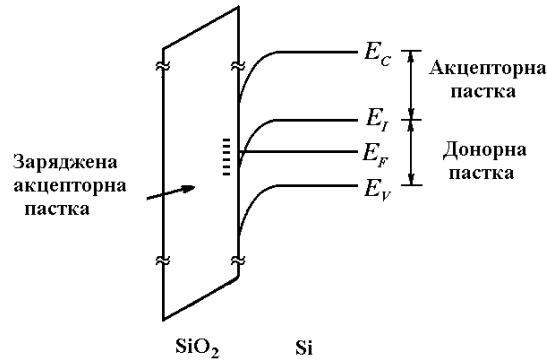


Рис. 1. Зонна діаграма МДН-транзистора в режимі інверсії, що демонструє заряджені акцепторні пастки.

Уводимо напругу розтягування  $U_{SO}$  як різницю напруг між середньозонною напругою і пороговою:

$$U_{SO} = U_o - U_{mg} \quad (9)$$

Тоді зсув порогової напруги внаслідок дії поверхневих пасток – це різниця напруг розтягу на відповідних кривих підпорогового струму, а саме:

$$U_{N_{it}} = (U_{SO})_2 - (U_{SO})_1, \quad (10)$$

де індекси 2 і 1 відповідають кривим підпорогового струму для різних доз (рівнів) опромінення. Збільшення кількості поверхневих пасток визначають так:

$$N_{it} = \Delta U_{N_{it}} \cdot C_{ox} / q, \quad (11)$$

де  $C_{ox}$  – ємність оксиду підзатворного  $\text{SiO}_2$  на одиницю площі, яку задають

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}, \quad t_{ox} - \text{товщина оксиду.}$$

Внесок радіаційно-індукованого заряду в оксиді у зсув порогової напруги не залежить від напруги зміщення на затворі й лише зсуває криву підпорогового струму ліворуч (для додатно захоплених дірок, створених опроміненням).

На підставі описаної вище моделі зонної схеми з зігнутими зонами можна стверджувати, що зсув між підпороговими кривими на рівні середньозонних напруг – це зсув, зумовлений захопленням зарядом в оксиді:

$$U_{N_{ot}} = (U_{mg})_2 - (U_{mg})_1. \quad (12)$$

Отже, збільшення кількості захопленого заряду в оксиді треба розрахувати так:

$$N_{ot} = C_{ox} U_{N_{ot}} / q. \quad (13)$$

**Розрахунок щільності станів.** Згідно з працею [3], середнє значення концентрації поверхневих пасток на одиничний інтервал енергії

$$\bar{D}_{it} = \frac{1}{q} \left[ \left( \frac{q}{kT} \frac{\partial \ln I_C}{\partial U_3} - 1 \right) C_{ox} - C_D \right], \quad (14)$$

де  $C_D$  – ємність збідненого шару за фіксованого значення поверхневого потенціалу

$$\left( \Psi_S = \frac{2}{3} E_F \right), C_D = \sqrt{\frac{q \varepsilon_{si} N_B}{2 \left( \phi_S + \frac{kT}{q} \right)}}, \text{ а } E_F = \frac{kT}{q} \ln \left[ \frac{N_B}{n_i} \right].$$

Тут  $C_{ox}$  – ємність підзатворного окислу на одиницю площі;  $N_B$  – концентрація легувальної домішки в каналі;  $n_i$  – концентрація власних носіїв. Величину  $\left( \frac{\partial U_3}{\partial \ln I_C} \right) = S$  – розмах напруги на затворі в разі зміни струму стоку на порядок, визначають з кривих підпорогових струмів.

Отже, для заданого транзистора всі величини, крім параметра  $S$ , є сталими. Тобто можна вважати, що нахил кривих підпорогових струмів заданий щільністю станів.

Програмну реалізацію розрахунків виконують мовою Borland Pascal і реалізують зчитуванням даних експерименту та їхнього опрацювання, визначення розмаху  $S$ , підставивши їх у розрахункову формулу обчислення  $D_{it}$  від дози (часу) опромінення. Структурно програма складається з декількох частин.

У першій частині програма відкриває файл з даними експерименту та зчитує їх. У другій частині за допомогою методу найменших квадратів відбувається апроксимація експериментальних результатів. Як наслідок, отримують функціональну залежність між струмом стоку і напругою затвору. В третій частині методом половинного ділення знаходять значення напруги, за якого значення струму змінюється на порядок щодо максимального значення (обчислюють параметр  $S$ ). У четвертій частині вводять значення фізичних величин і за формулою (14) обчислюють густину станів. Остання, п'ята частина відповідає за збереження результатів обчислень. Залежно від відповіді на запит відбувається створення або відкриття вже створеного файлу, у який заносять результати розрахунку.

## 2. Експериментальний вимірювальний комплекс.

### Методика експериментальних досліджень та комп'ютерного опрацювання результатів вимірювань

Комплекс передбачає можливість вимірювання параметрів приладів у вигляді “чіпів”, а також напівпровідникових елементів, сформованих у межах тестових ІМС. Для таких досліджень вимірювальний комплекс з'єднують із зондовим автоматом “Зонд-А5”. Загальний вигляд і будова зондового автомата (а) та предметного столика з тримачем і досліджуванним “чіпом” (б) показані на рис. 2.

Зондовий автомат “Зонд-А5” призначений для контактування вимірювальних зондів у разі міжопераційного контролю параметрів інтегральних мікроструктур і напівпровідникових приладів на напівпровідниковій підкладці в режимі автоматичного та ручного вимірювань.

На вставці схематично зображено тримач головок багатозондовий (3) зі столиком (8), на якому вакуумною присоскою зафіксована пластина (9) з “чіпом” (12), що містить досліджувані тестові МОН-транзистори, контактні зонди (10) з відвідними провідниками до вимірювальної схеми (11).

Для вимірювань досліджуваний чіп розміщують на робочому столику за допомогою спеціального тримача, його можна переміщувати вздовж координат  $X$  та  $Y$  у неперервному або дискретному режимах з певним кроком.

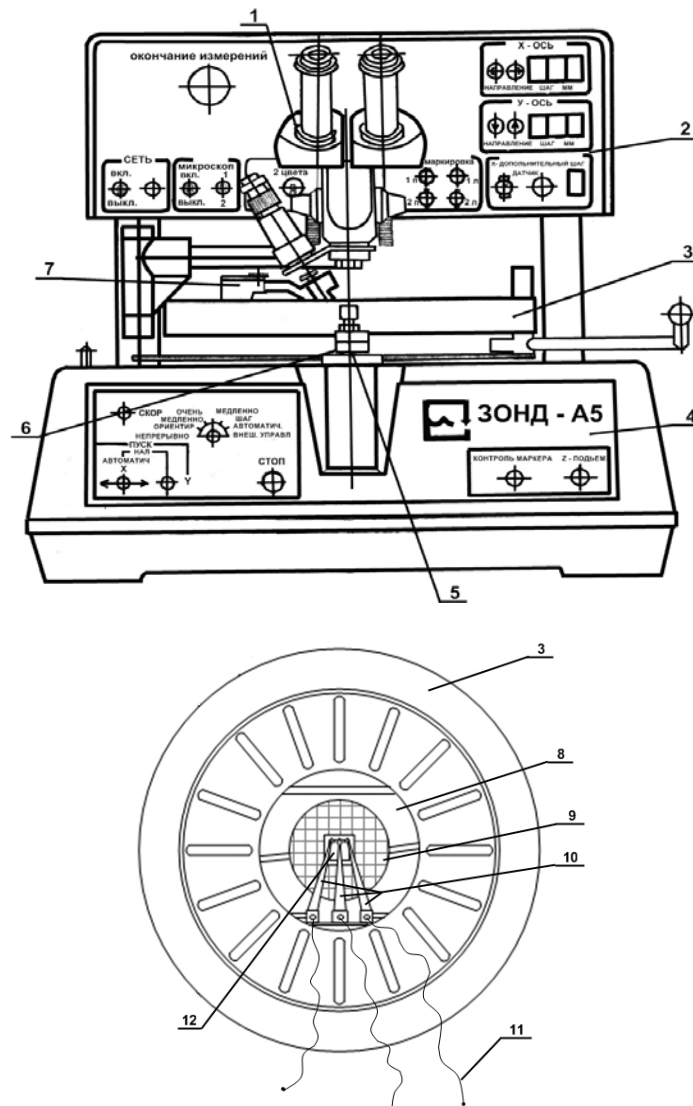


Рис. 2. Загальний вигляд зондового автомата «Зонд –А5» (а) та предметного столика з тримачем головок багатозондовим з досліджуванім «чіпом»:

1 – оптична головка ОГМС – П2 ТУЗ – 3. 674 – 71 з бінокюлярами оптичного мікроскопа; 2 – електронний блок автомата для програмного керування зондами по напрямках (x) і (y) та процесом вимірювання; 3 – тримач головок багатозондовий з вимірювальними зондами (на вставці – у збільшеному вигляді); 4 – корпус (несуча станина), на якому змонтовані вимірювальна та оптична система з вмонтованим електронним блоком перемикачів режимів вимірювань та керування маркерів; 5 – гвинт вертикального переміщення тримача головок з вимірювальними зондами; 6 – механізм переміщення та фіксації вимірювальних зондів; 7 – пристрій координатного переміщення освітлювача мікроскопа.

Контакт виміральної схеми з транзисторами відбувається за допомогою вольфрамових зондів (12), які контактують з відповідними площадками "чіпа", що відображають контактні виходи транзисторів різної довжини каналу. Надання контакту зондів виконують за допомогою бінокулярного мікроскопа, що входить до складу автомата "Зонд-А5".

**Опис автоматизованої виміральної системи.** Для експериментального вимірювання підпорогових ВАХ МДН-транзисторів використовують вимірвальний комплекс на основі IBM-PC та зовнішнього блока з незалежним живленням, що з'єднується з ПК стандартним інтерфейсом "Centronix". Блок охоплює буферні схеми, два цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), а також багатофункціональний високорозрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП). Блок-схема вимірального комплексу показана на рис. 3.

Програмне забезпечення в середовищі Borland Turbo Pascal 7.0 дає змогу повністю автоматизувати процес вимірювання ВАХ напівпровідникових приладів.

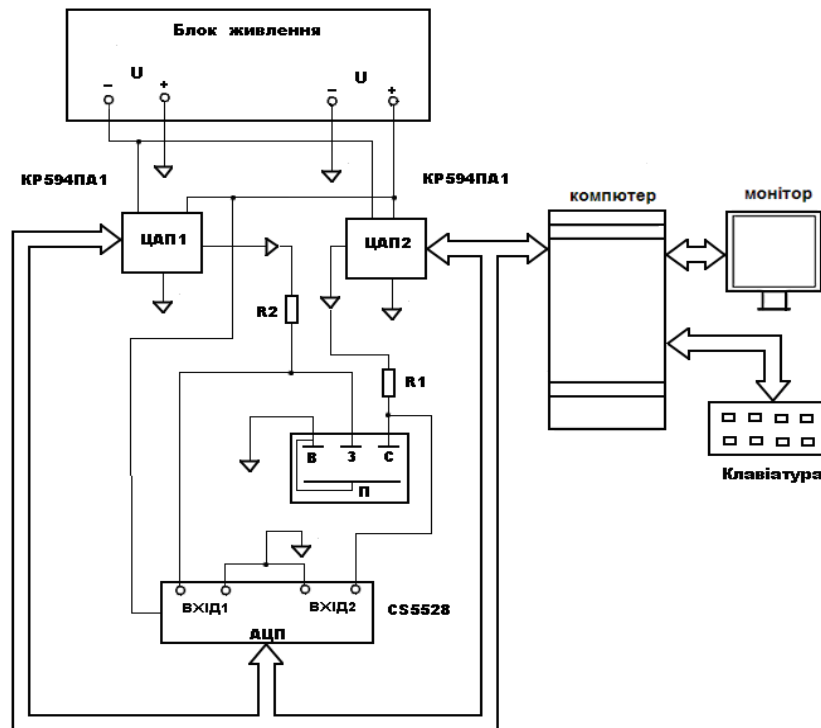


Рис. 3. Схема для вимірювання підпорогових струмів стоко-затворних характеристик польових транзисторів (зі спільним витоком).

У вимірвальній системі застосовано 12-розрядні ЦАП типу КР594ПА1, що живляться від напруги +5 та -15 В. До виходу кожного ЦАП приєднано операційні підсилювачі К140УД7. Обидва цифро-аналогові перетворювачі дають змогу формувати вихідну напругу в межах від -5 до 5 В, що достатньо для роботи з тими типами



напівпровідникових приладів, які ми досліджували. Розрядність ЦАП 12 біт забезпечує мінімальний крок зміни вихідної напруги

$$h = \frac{5 - (-5)}{2^{12}} = \frac{10}{4096} \approx 0,0025 \text{ В}.$$

У системі застосовано 24-розрядний аналого-цифровий перетворювач Cirrus Logic серії CS55xx, що об'єднує великий набір функцій. Зокрема, CS55xx має вхідний мультиплексор, що дає змогу комутувати до восьми вхідних сигналів на вхід підсилювача з програмно керованим коефіцієнтом підсилення. Після підсилення вимірювана напруга подається на  $\Delta - \Sigma$  модулятор четвертого порядку.

Для резекції завод з частотою 50 (60) Гц слугують цифрові фільтри з різними частотами дискретизації. Потрібну частоту дискретизації вибирає програма.

Перетворювачі серії CS55xx оптимізовані для роботи з джерелом живлення +5 В та джерелом опорної напруги +2,5 В. У цьому разі передбачено внутрішні кола для формування негативної опорної напруги, що дає змогу вимірювати вхідні сигнали в діапазоні  $\pm 100$  мВ з використанням однополярного джерела живлення та опорної напруги.

Як джерело опорної напруги в реалізованому варіанті використано мікросхему REF192 фірми Analog Devices. Ця мікросхема є високоточним джерелом опорної напруги  $+2,5 \pm 0,002$  В, з вихідним струмом до 1 мА та малим температурним дрейфом. На її вхід подається напруга +5 В, що знімається з виходу інтегрального стабілізатора KP142EH5A, розміщеного на платі блока живлення.

Наявність вхідного діапазону 25 мВ, цифрового фільтра на 50 Гц, а також висока розрядність і зумовили вибір його як основного елемента в схемі реєстрації малих струмів.

Конструктивно зовнішній блок складається з трьох друкованих плат: плата цифрового виведення та цифрових генераторів (зібрана з використанням мікросхем K580BB55 та KP594ПА1 і регістрів серії K555 як буферних елементів), плата малих струмів на базі АЦП CS5528 та блока живлення на напруги +5, -6, +12 і -12 В. Напругу +5 В використовують для живлення цифрових мікросхем, -6 В – для блока малих струмів, +12 і -12 В – для живлення операційних підсилювачів.

Блок живлення зібраний за класичною схемою: він складається з трансформатора, діодного моста для вирівнювання змінної напруги, фільтра та інтегрального стабілізатора для кожної напруги. В блоці використано такі мікросхеми-стабілізатори напруги: KP142EH5A (+5В), KP142EH5Б (-6В), KP142EH8Б (+12В,-12В). Мікросхема K580BB55 – це програмований паралельний інтерфейс уведення/виведення. У цій реалізації входи шини даних обох мікросхем через буферні елементи з'єднані з шиною даних інтерфейсу Centronics. Вибір потрібної мікросхеми відбувається програмно. Кожна мікросхема K580BB55 має три регістри, які можна програмно налаштувати як на виведення, так і на введення, також у системі існує 48 ліній цифрового виведення. З них 24 лінії з'єднані відповідно з входами двох ЦАП, а 2 лінії використовують для передавання даних у послідовному форматі на мікросхему CS5528. Решта ліній не задіяна, їх можна використати, наприклад, для керування зовнішніми цифровими пристроями, індикації чи подальшого розширення можливостей системи. Всі плати змонтовані в металевому корпусі. Приєднання до об'єкта дослідження виконано за допомогою екранованого коаксіального кабелю (на передню панель приладу винесені роз'єкти типу CP-50).

Загалом програма для керування експериментом оформлена у вигляді процедур, основні з яких – процедури встановлення заданої напруги на виходах цифро-аналогових

перетворювачів – *SetDAC1Voltage* та *SetDAC2Voltage*, процедура вибору вхідного каналу АЦП *SelectInput* і процедура зняття відліку з входу АЦП – *GetADCVoltage*, параметрами якої є номер вхідного каналу та значення діапазону вхідних напруг.

**Методика вимірювання підпорогових струмів стоко-затворних характеристик транзисторів.** Для цього використовують обидва цифро-аналогові перетворювачі: перший – для формування напруги стік-витік, а другий – для формування напруги затвор-стік. Для вимірювання струму стоку необхідний перетворювач струм-напруга, яким у найпростішому випадку може бути активний опір. Два виходи АЦП можна використовувати для вимірювання цих напруг.

Випробування засвідчили, що застосування резистивного перетворювача струм-напруга дає змогу реєструвати струми порядку  $10^{-11}$  А. Тому для роботи в інтервалі струмів до  $10^{-11}$  А треба застосовувати додаткові схеми перетворення струм-напруга.

Для зняття однієї точки вольт-амперної характеристики виставляють деяку напругу стік-витік, використовуючи один з ЦАПів. Далі, змінюючи за допомогою іншого ЦАП напругу витік-затвор від 0 до  $U_{вз}=U_{\max}$  через певні фіксовані інтервали та використовуючи один з входів АЦП, налаштований програмно на відповідний діапазон, вимірюють через другий вхід АЦП спад напруги на опорі  $R_2$ . Це значення використовують для розрахунку відповідного струму.

На рис. 4 для прикладу показано типові криві підпорогових струмів кремнієвих МДН-транзисторів, отриманих після рентгенівського опромінення в експлуатаційному режимі з використанням описаного вимірювального комплексу.

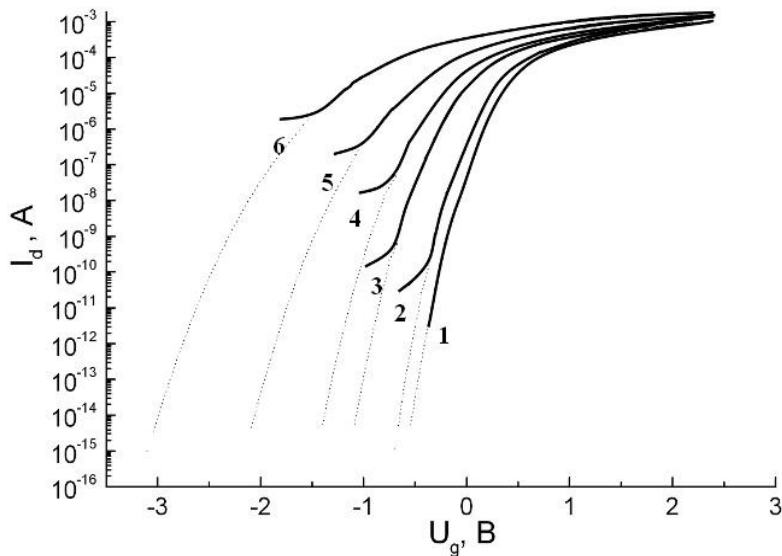


Рис. 4. Криві підпорогових струмів кремнієвого МДН-транзистора ( $L = 4$  мкм), опромінених рентгенівським випромінюванням експлуатаційному режимі:

1 – вихідний; 2–6 – після опромінення 0,5 (2), 2 (3), 3 (4), 5 (5), 10 (6) хв ( $U = 4$  В).

Описану методику застосовано для дослідження рентгеноіндукованих змін параметрів кремнієвих *n*-канальних МДН-транзисторів з довжинами каналів 2–10 мкм [4].

1. *McWhorter F. G., Winokur P. S.* Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistor // *Appl. Phys. Lett.* – 1986. – Vol. 48. N 2. – P. 133–136.
2. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов: В 2 т. – М.: Мир, 1984.
3. *Gaitan M., Russell T. J.* Measurement of Radiation-Induced Interface Traps Using MOSFETs // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1984. – Vol. S-31. – N 6. – P. 1256–1260.
4. *Коман Б. П.* Вплив рентгеновського опромінення на кремнієві МДН-транзистори // *Укр. фіз. журн.* – 2000. – Т. 45. – № 12. – С. 1440–1445.

#### METHODS FOR INVESTIGATION OF RADIATION-INDUCED CHANGES IN THE PARAMETERS OF MOS-TRANSISTORS

**B. Koman**

*Ivan Franko National University of L'viv,  
50 Dragomanov St., UA-79005 Lviv, Ukraine  
E-mail: bogdan\_28@mail.ru*

We present the methods for investigation of radiation-induced changes in the parameters of MOS transistors, which are based on the experimental curves of currents sub-threshold. It is believed that the radiation-induced charge in the under-gate insulator voltage shift is proportional to the mid-gap UMG. The experimental automated measuring complex is described basing on the IBM-PC. It is aimed at measuring the sub-threshold currents of the MOS-transistors and software implementation of experimental data processing.

*Key words:* subthreshold currents, charge, MOS-transistors, threshold voltage, parameters, methods.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МДН-ТРАНЗИСТОРОВ

**Б. Коман**

*Львовский национальный университет им. Ивана Франко,  
ул. Драгоманова, 50, 79005, Львов, Украина  
E-mail: bogdan\_28@mail.ru*

Приведена методика исследования радиационно-индуцированных изменений параметров МДН-транзисторов, базирующаяся на экспериментальных кривых сток-затворных подпороговых токов. Сделано предположение о том, что радиационно-индуцированный заряд в подзатворном диэлектрике пропорционален сдвигу напряжения

ISSN 2224-087X. Електроніка та інформаційні технології. 2012. Випуск 2  
середины запрещенной зоны  $\Delta$ UMG. Описаны автоматизированный экспериментальный измерительный комплекс на базе IBM-PC для измерения подпороговых токов МДН-транзисторов и программная реализации обработки экспериментальных результатов.

*Ключевые слова:* подпороговый ток, заряд, МДП-транзистор, пороговое напряжение, параметры, методика.

Стаття надійшла до редколегії 12.02.2012

Прийнята до друку 17.04.2012