

## ЗАСТОСУВАННЯ МАЛИХ ДОЗ ЕЛЕКТРОННОГО І ГАММА-ОПРОМІНЕННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ФОТОДІОДІВ

Показано, що високоенергетичне електронне і гамма-опромінення та наступний відпал ФДК-137 з  $p^+-n$  структурою використані як засіб поліпшення й вирівнювання основних параметрів (темного струму, чутливості), а також підвищення стабільності й надійності фотодіодів при зберіганні і тривалій експлуатації.

It is shown that high-energy electron and gamma irradiation of ФДК-137 with  $p^+-n$  structure and sequential it's annealing are used as tool for improvement and alignment of main parameters (dark current, sensitivity) as well as increase of diode stability and serviceability during storage and long exploitation.

Аналіз сучасного стану методів поліпшення параметрів напівпровідникових приладів та інтегральних схем на завершальному етапі їх виготовлення показує, що найбільшою ефективністю володіють методи променевої обробки із застосуванням високоенергетичних електронів, які дають істотний економічний ефект. Проникаюче випромінювання (електронне, гамма, рентгєнівське) знаходить все ширше застосування у традиційних задачах підвищення надійності і може застосуватись для дослідження й оцінки довгострокової стабільності параметрів і відбору потенційно ненадійних приладів та інтегральних схем.

У даній роботі електронне і гамма-випромінювання використано для виявлення потенційно ненадійних фотодіодів (ФД) і підвищення їх експлуатаційних характеристик і надійності.

Вплив опромінення електронами та термічного відпалу на характеристики ФД

В якості об'єктів дослідження обрані кремнієві фотодіоди типу ФД-137-К ( $p^+-n$  структура) і ФД-146-К ( $n^+-p$  структура) з конструктивно-технологічними відмінностями [1].

Ці фотодіоди піддавалися впливу потоків швидких електронів з енергією  $E=6$  МеВ на лінійному прискорювачі ЕЛУ-6 інтегральними потоками  $\Phi_e=10^{11}$  і  $\Phi_e=10^{12}$  ел/см<sup>2</sup>.

Оцінка концентрації введених в об'єм напівпровідника точкових дефектів з використанням даних по вільному пробігу електронів з енергією  $E=6$  МеВ показує, що концентрація точкових

радіаційних дефектів  $N_f$  чисельно дорівнює інтегральному потоку  $\Phi_e$ : при  $\Phi_e=10^{11}$  ел/см<sup>2</sup>  $N_f=10^{11}$  см<sup>-3</sup>, при  $\Phi_e=10^{12}$  ел/см<sup>2</sup>  $N_f=10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Для кристалів товщиною до 1 мм поглинання відбувається рівномірно по всьому об'єму напівпровідникового кристалу. З основного потоку поглинається 2 % електронів. Аналіз радіаційного впливу на обернені і прямі вольт-амперні характеристики, вольт-фарадні характеристики, а також на розподіл заряджених центрів проводився в області просторового заряду (ОПЗ)  $p-n$  переходу.

Вольт-амперні характеристики вимірювалися в автоматичному режимі на спеціально розробленій установці. Мінімальне значення вимірюваного струму 1 нА.

Вольт-фарадні характеристики вимірювалися на стандартній установці з допомогою обчислювальної машини Д2-28. Розподіл електрично активних центрів досліджували на установці, описаній в [2]. Вимірювання розподілу електрично активних центрів проводили на двох частотах (100 кГц і 400 кГц) для розділення об'ємних і поверхневих ефектів.

Відзначені параметри вимірювалися до початку опромінення, після кожного опромінення, а також високотемпературного відпалу.

Досліджувалась партія ФД типу ФДК-137 і ФДК-146. Було відзначено, що збільшення інтегрального потоку електронів з енергією  $E=6$  МеВ призводить до росту обернених струмів у всьому діапазоні напруг зміщення (рис.1,2). При цьому

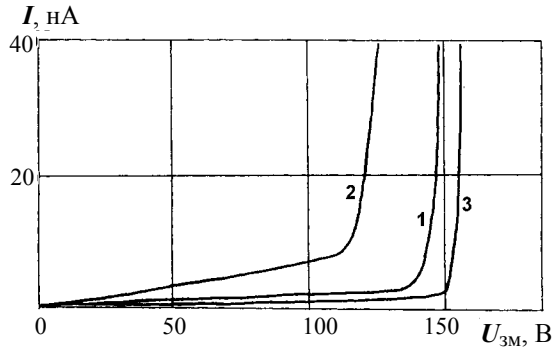


Рис.1. Зворотні ВАХ ФД-137К до і після радіаційно-термічної дії (РТД). До РТД (1); після опромінення електронами з  $E=6$  МеВ  $\Phi_e=1 \cdot 10^{12}$  ел/см<sup>2</sup> (2); після термічного відпалу при  $T=250^\circ\text{C}$  протягом 30 хвилин (3).

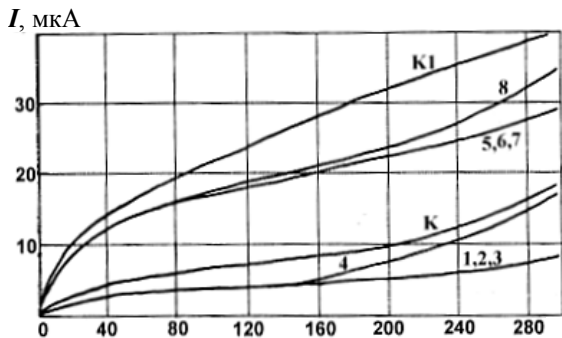


Рис.2. Зворотні ВАХ ФД-146К до і після радіаційно-термічної дії. К (охоронне кільце), (1-4) – до РТД; К1, (5-8) – після опромінення та термічного відпалу при  $T=250^\circ\text{C}$  протягом 30 хвилин.

помітно, що у ФДК-137 із структурою  $p^+-n$  швидкість зміни зворотного струму менша, ніж у ФДК-146 з структурою  $n^+-p$ . Напряга пробною чітко виражена у ФД-137-К і при збільшенні  $\Phi_e$  практично на всіх  $p-n$  переходах зменшується.

При прямих зміщеннях із ростом  $\Phi_e$  струми зменшуються при напругах зміщення  $U_{зм} > 0,4$  В. При  $U_{зм} < 0,4$  В спостерігається збільшення струму у ФДК-137 (рис.3). Водночас на прямих вольт-амперних характеристиках у координатах  $\ln I = f(U_{зм})$  спостерігається зменшення  $\frac{d \ln I}{d U_{зм}}$  для

діодів ФДК-137 при великих  $\Phi_e$ .

Контактний потенціал  $U_k$ , оцінений по прямим ВАХ, із ростом поглинутої дози зменшується. Бар'єрна ємність усіх ФД при відсутності напруги зміщення збільшувалася поки інтегральний потік не досягав значення  $\Phi_e = 10^{12}$  ел/см<sup>2</sup>. Дослідження зміни ємності  $p-n$  переходів ФД при великих  $\Phi_e$  і зворотних зміщеннях показало, що подальше збільшення  $\Phi_e$  призводить до різкого зменшення ємності і пониження контактного потенціалу (рис.4).

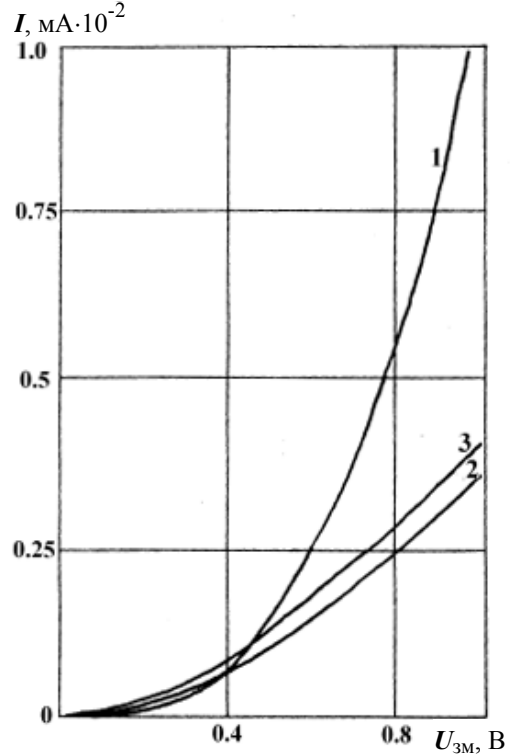


Рис.3. Прямі ВАХ ФД-137К.  $E=6$  МеВ:  $\Phi_e=1 \cdot 10^{13}$  ел/см<sup>2</sup> (1);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{14}$  ел/см<sup>2</sup> (2);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup> (3).

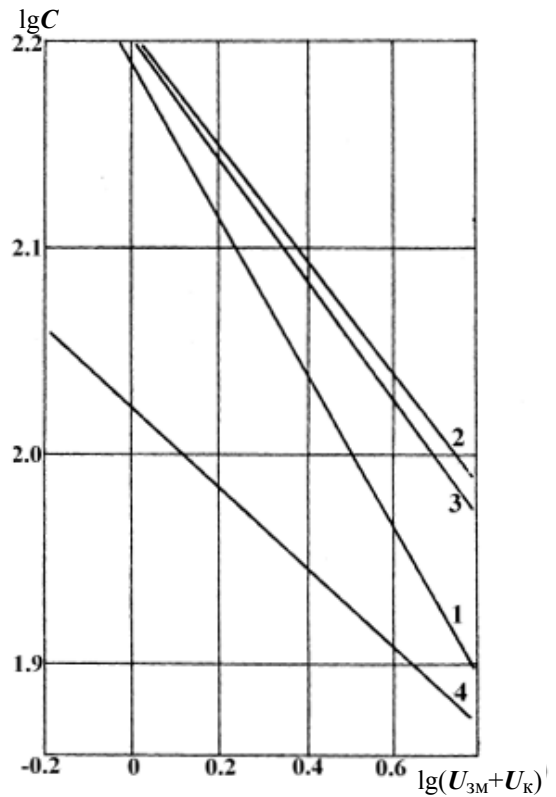


Рис.4. Вольт-фарадні характеристики ФД-137К,  $E=6$  МеВ. До опромінення (1);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{13}$  ел/см<sup>2</sup> (2);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{14}$  ел/см<sup>2</sup> (3);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup> (4).

Вимірювання концентрації електрично активних центрів в області просторового заряду *p-n* переходів ФДК-137 (рис.5), свідчить, що з ростом поглинутої дози збільшується різниця значень концентрацій електрично активних центрів при вимірюваннях на частотах 100 кГц і 400 кГц. Водночас збільшується ширина ОПЗ. Різке збільшення ширини ОПЗ (скомпенсованої області бази, розміщеної в області просторового заряду) відбувається при  $\Phi_e=10^{14}$  ел/см<sup>2</sup>, що відповідає концентрації введених об'ємних точкових радіаційних дефектів  $N_T=10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Така концентрація радіаційних об'ємних дефектів порівнянна з концентрацією носіїв заряду в базі ФД до його опромінення.

Високотемпературний відпал досліджуваних структур після опромінення швидкими електронами проводився в два етапи: при температурі 150°C на протязі 120 хвилин і при температурі 250°C на протязі 30 хвилин.

Температура і час відпалу вибиралися експериментально по контрольним зразкам. Максимальна температура  $T=250^\circ\text{C}$  обмежувалася розходженням між коефіцієнтами термічного розширення скла вхідного вікна фотоприймачів і матеріалу корпусу. Нагрівання у зазначеному режимі більш 30 хвилин призводить до розтріскування скла вхідного вікна.

Термічний відпал структур, підданих опроміненню великими інтегральними потоками електронів, не призводить до оборотних змін характеристик. Як правило, вони помітно погіршуються. Тому можна сказати, що опромінення великими інтегральними потоками швидких електронів з  $N, \text{см}^{-3}$

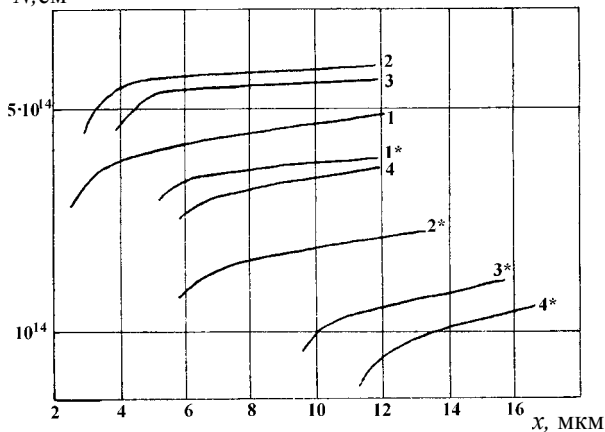


Рис.5. Розподіл заряджених центрів в ОПЗ ФД-137К.  $E=6$  МеВ: до опромінення (1);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{13}$  ел/см<sup>2</sup> (2);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{14}$  ел/см<sup>2</sup> (3);  $\Phi_e=1 \cdot 10^{15}$  ел/см<sup>2</sup> (4). (Без зірочки – при 100 кГц, із зірочкою – при 500 кГц).

енергією  $E=6$  МеВ не може бути використане в якості фізичних досліджень впливу опромінення на параметри і характеристики фотоприймачів.

Високотемпературний відпал фотоприймальних структур, оброблених швидкими електронами малих інтегральних потоків, призводить до різних змін вольт-амперних характеристик ФД при оберненому зміщенні. Так, для структур типу *p<sup>+</sup>-n* (ФДК-137) після відпалу при  $T=150^\circ\text{C}$  протягом 120 хвилин практично не спостерігались зміни струму, тоді як напруга пробою дещо зростала (на 5-10 %). Після відпалу в режимі  $T=250^\circ\text{C}$  при витримці протягом 30 хвилин відбулося дуже різке зниження оберненого струму практично на всіх фотоприймачах. При цьому напруга пробою у переважній кількості *p-n* переходів фотоприймачів зростала відносно початкової і складала 140-160 В.

У ФДК-146 із структурою *n<sup>+</sup>-i-p* практично на усіх фоточутливих площадках спостерігається збільшення обернених струмів при високотемпературному відпалі. Потрібно відзначити відсутність закономірності в реакції на високотемпературну обробку. Лише на одному фотоприймачі (МК 95727И) було отримане зменшення обернених струмів в усьому діапазоні змін напруги зміщення. Причому, після відпалу при  $T=150^\circ\text{C}$  протягом 120 хвилин після опромінення інтегральним потоком  $\Phi_e=10^{12}$  ел/см<sup>2</sup> струми площадок зменшилися майже в 2 рази на відміну від ФДК-137. Після відпалу при  $T=250^\circ\text{C}$  на протязі 30 хвилин обернені струми всіх чотирьох площадок і охоронного кільця у даному ФД знизилися ще в 2 рази. При цьому спостерігається незначний розкид значень оберненого струму всіх площадок в усьому діапазоні зміни напруг оберненого зміщення аж до 300 В.

Для з'ясування впливу зміни заряду на границі оксид-напівпровідник, а також фіксованого заряду в оксиді, нами досліджувалися тестові МДН-конденсатори на основі кремнію. Оксид МДН-конденсаторів був отриманий термічним окислюванням. Товщина оксиду становила 1300-1600 Å. Пластили з МДН-конденсаторами опромінювалися електронами з енергією  $E=6$  МеВ та  $\Phi_e=10^{11}-10^{15}$  ел/см<sup>2</sup>. Після кожного етапу опромінення вимірювалися повна ємність і диференціальна ємність МДН-структури при різних напругах зміщення. На основі аналізу зміни диференціальної ємності ми одержали розподіл поверхневих рівнів у забороненій області тестових кремнієвих МДН-структур у залежності від їх напруги зміщення (рис.6).

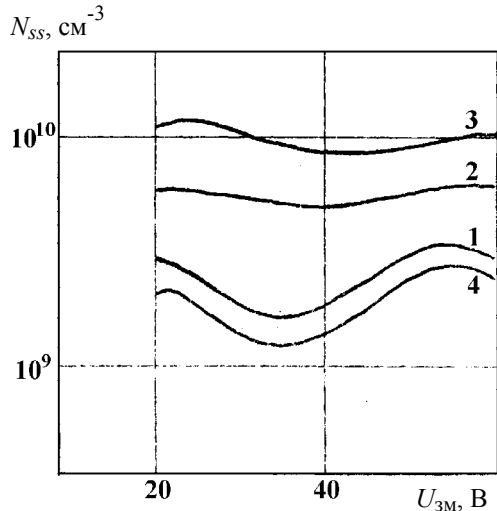


Рис.6. Залежність густини поверхневого заряду на границі SiO<sub>2</sub>-Si від напруг зміщення на МДН-структурі. E=6 МеВ при: Φ<sub>e</sub>=1·10<sup>12</sup> ел/см<sup>2</sup> (1); Φ<sub>e</sub>=1·10<sup>13</sup> ел/см<sup>2</sup> (2); Φ<sub>e</sub>=1·10<sup>14</sup> ел/см<sup>2</sup> (3); після відпалу при T=250°С протягом 30 хвилин (4).

Характерний вигляд густини розподілу поверхневих рівнів узгоджується з літературними даними: виявлене збільшення густини поверхневих рівнів на границях забороненої зони. На рис.6 по осі абсцис відкладена напруга зміщення на МДН-структурі. Крайні значення напруги зміщення відповідають випадку, коли рівень Фермі збігається з краєм відповідної зони. З наведених залежностей видно, що зі збільшенням інтегрального потоку опромінення росте густина станів поверхневих рівнів у забороненій зоні й одночасно відбувається вирівнювання їхнього енергетичного спектра. Порогова напруга змінюється в сторону великих значень, а при Φ<sub>e</sub>=10<sup>15</sup> ел/см<sup>2</sup> ємність МДН-структури, а отже, і область просторового заряду напівпровідника, практично не змінюються аж до напруг пробою діелектрика. Крім того, напруга пробою діелектрика зменшується, але водночас зменшується і ємність МДН-структури.

Аналіз особливостей характеристик ФД на основі вивчення конструктивно-технологічних даних дозволяє зробити такі припущення про можливий механізм впливу опромінення швидкими електронами з енергією E=6 МеВ на характеристики ФД. Вольт-амперні характеристики ФД структур добре описуються за допомогою співвідношення:

$$I = I_s \exp\left(\frac{U}{mkT} - 1\right), \quad (1)$$

де U – напруга зміщення, I<sub>s</sub> – струм насичення, kT – тепловий потенціал, m – постійний коефіцієнт

(1 ≤ m ≤ 2). Для несиметричного p-n переходу

$$I_s = S e^2 n_i \rho \mu \sqrt{\frac{D}{\tau}}, \quad (2)$$

де S – площа p-n переходу, ρ – питомий опір бази, μ – рухливість основних носіїв заряду в базі, D – коефіцієнт дифузії неосновних носіїв заряду в базі, τ – час життя неосновних носіїв заряду бази.

Вплив зростання концентрації радіаційних дефектів позначається як на об'ємних, так і на поверхневих властивостях p-n структур, якщо врахувати, що в досліджуваних структурах внаслідок великої ширини області просторового заряду стан p-n переходу біля границі напівпровідник-окисел у значній мірі буде визначити ВАХ.

Збільшення концентрації об'ємних дефектів буде впливати на пряму вітку вольт-амперної характеристики згідно до виразу:

$$U_{p-n}(\Phi) = \frac{mkT}{e} \ln \left[ \frac{I \cdot n_{0n} \cdot e^{-k_n \Phi}}{S \cdot e \cdot n_i^2} \sqrt{\frac{\tau_{p0} k_1}{D_p (k_1 + \tau_{p0} \Phi)}} \right], \quad (3)$$

де k<sub>1</sub> – коефіцієнт, обернений до коефіцієнта радіаційної зміни часу життя неосновних носіїв заряду (в нашому випадку розглянуто p<sup>+</sup>-n структура), k<sub>n</sub> – коефіцієнт, який при множенні на концентрацію основних носіїв заряду дає швидкість вилучення носіїв заряду при опроміненні.

Численні експерименти не підтверджують даної залежності, що пов'язано зі зміною властивостей бази при опроміненні. З ростом поглинутої дози електронів зростає опір бази внаслідок зменшення концентрації носіїв заряду і рухливості, що підтверджують виміри розподілу заряджених центрів (рис.5), причому швидкість зміни прямого падіння напруги U<sub>p-n</sub> на p-n переході і падіння напруги на базі U<sub>б</sub> при різних струмах різні: при малих прямих струмах падіння напруги на діодній структурі зменшується, а при великих струмах збільшується, що і було відзначено в експерименті.

У загальному випадку обернений струм I<sub>об</sub> через p-n перехід має дві складові: об'ємну і поверхневу. Без урахування поверхневих ефектів обернений струм являє собою суму генераційного струму I<sub>Г</sub> і дифузійного струму (струму насичення) I<sub>s</sub>.

$$I_{об} = I_s + I_G. \quad (4)$$

У випадку великої площі p-n переходу в області

його контакту з оксидним захисним шаром на поверхні кристала можуть виникнути істотні втрати по поверхневим каналам. Урахування явищ, що відбуваються на поверхневій границі оксид-напівпровідник, дозволяє дати однозначне пояснення причин зміни оберненого струму при опроміненні.

При опроміненні фотодіодів швидкими електронами поряд з об'ємними ефектами, що призводять до росту оберненого струму за рахунок збільшення генераційного струму  $I_T$  через збільшення ширини ОПЗ (рис.5), відбувається зміна зарядового стану приповерхневої області напівпровідника й оксиду, що викликає збільшення оберненого струму як внаслідок зміни геометрії ОПЗ, так і внаслідок зміни швидкості поверхневої рекомбінації. При цьому характер поведінки обернених струмів у процесі опромінення різний для  $p^+-n$  і  $n^+-p$  переходів [3-12].

Виникнення втіленого позитивного заряду в об'ємі поверхневого оксиду змінює геометрію області просторового заряду, що виходить на границю оксид-напівпровідник. Так, у випадку  $p^+-n$  структури із ростом поглинутої дози зростання позитивного фіксованого заряду буде викликати спочатку розширення області просторового заряду біля поверхні (внаслідок відтоку від неї дірок) у  $p$ -область. При цьому відбувається ефективно розширення області просторового заряду, що приводить до росту оберненого струму за рахунок збільшення ефективності збору носіїв заряду, а також генераційної складової, обумовленої збільшенням площі ОПЗ, що виходить за границю Si-SiO<sub>2</sub>. (Оцінка площі ОПЗ біля поверхні для ФД-137К дає величину, що складає 0,3% від загальної площі  $p-n$  переходу. У процесі опромінення вона може зрости ледь не в два рази. При цьому, якщо врахувати, що швидкість поверхневої рекомбінації може експоненційно змінюватися в залежності від величини поверхневого потенціалу, то для даних структур поверхневі ефекти повинні бути визначальними у зміні обернених струмів при опроміненні зокрема, а також у процесі збереження та експлуатації).

У  $n^+-p$  структурах швидкість зростання обернених струмів, як правило, більша через значне збільшення ефективної області просторового заряду  $p-n$  переходу, що виходить до поверхні, оскільки для створення інверсного шару в слабко легованій  $p$ -області  $n^+-p$  структури необхідне накопичення меншого позитивного заряду.

Експериментальним підтвердженням наявно-

сті поверхневих рівнів на границі Si-SiO<sub>2</sub> можна вважати спостережуване зростання значення бар'єрної ємності при нульовій напрузі зміщення при малих поглинутих дозах електронів, коли зміною концентрації основних носіїв заряду в базі діоду можна знехтувати.

З огляду на те, що ємність напівпровідникової структури  $C$  при оберненому зміщенні визначається як зміною заряду в об'ємі напівпровідника (мілкі і глибокі центри), так і зміною заряду на поверхневих рівнях, можна записати:

$$C = \frac{dQ}{dU} = \frac{dQ_v}{dU} + \frac{dQ_s}{dU} = S \cdot \left( \frac{e\epsilon\epsilon_0(N_v + N_s)}{2(U_{3M} + U_K)} \right)^\alpha, \quad (5)$$

де  $S$  – площа  $p-n$  переходу,  $\epsilon$  – діелектрична проникливість,  $N_v$ ,  $N_s$  – концентрації об'ємних і поверхневих центрів у перерахунку до об'єму,  $U_{3M}$  – напруга оберненого зміщення,  $U_K$  – контактний потенціал,  $\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт, який визначається градієнтом вимірювань концентрації у базовій області.

Як видно з (5), зміна ємності  $p-n$  переходу при опроміненні може відбуватися внаслідок збільшення як ефективної площі переходу, так і концентрації поверхневих центрів (що є підтвердженням припущення зростання оберненого струму завдяки збільшенню швидкості поверхневої рекомбінації), а також зміни концентрації об'ємного заряду. Зазначені ефекти мають протилежні напрямки зміни, внаслідок чого зміна ємності  $p-n$  переходу різна при різних інтегральних потоках електронів: при малих  $\Phi_e$  визначальним є зростання ємності  $C_s$  внаслідок росту концентрації швидких поверхневих станів. Вимірювання концентрації електрично активних центрів при різних частотах на тестових структурах дає оцінку часу перезарядження  $\tau_s \approx 10^{-6}$  с, а на фотодіодних структурах  $\tau_s \approx 4 \cdot 10^{-7}$ . Термічний відпал тестових структур МДН-конденсаторів при  $T = 250^\circ\text{C}$  протягом 30 хвилин призводить практично до повного відновлення початкового розподілу поверхневих станів за енергіями (рис.6.), а також до зменшення порогової напруги (при якій починається зміна ємності МДН-конденсатора).

Отриманий результат дещо не узгоджується з експериментальними результатами для ФДК-146, у яких після термічного відпалу виявлене збільшення оберненого струму в усьому діапазоні напруг зміщення практично без зниження, а часом при зростанні оберненого струму.

Очевидно, при відновленні енергетичного спектра розподілу швидких поверхневих станів не супроводжується зменшенням втіленого позитивного заряду, що утворюється в оксиді при опроміненні. При цьому в діодах із  $p^+-n$  структурою в базовій  $n$ -області біля поверхні рівень Фермі розташований ближче до краю зони провідності, ніж в об'ємі бази, а в діодних структурах типу  $n^+-p$  – ближче до краю зони провідності. Якщо припустити, що ймовірність захоплення поверхневими рекомбінаційними центрами електронів вища, ніж дірок, то очевидно, що в  $n^+-p$  структурах з базою  $p$ -типу зниження рівня Фермі сприяє їх інтенсивному захопленню, що визначає значний ріст оберненого струму як у процесі опромінення, так і після високотемпературного відпалу. Це зумовлює прискорення міграції позитивного заряду до границі розділу кремній-оксид.

Отже, опромінювання і наступний відпал ФДК-137 з  $p^+-n$  структурою можуть бути рекомендовані як засіб поліпшення і вирівнювання основних параметрів (темнового струму, чутливості), а також підвищення стабільності і надійності ФД при збереженні і тривалій експлуатації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Baxter R.E.* Semiconductor impressed voltage preconditioning screening // *Evaluation Engineering*. - 1969. - **8**, №3. - P.15-17.
2. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. А.Е.Ладыгина. - М.: Сов. радио, 1980.
3. *Sah C.T.* Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation. // *IEEE Trans. on Nucl. Sc.* - 1976. - **23**, №6. - P.1563-1568.
4. *Болисов В.А., Попов В.Д., Сизов А.В.* Кинетика накопления заряда в  $\text{SiO}_2$  // *Кинетические явления в полупроводниках и диэлектриках*. - Сб. научн. трудов МИФИ. - 1985. - С.275.
5. *Гуртов В.А.* Основы физики структур металл-диэлектрик-полупроводник. - Петрозаводск: Гос. Университет, 1983.
6. *Климкова М.А., Ниязова Д.Р.* Исследования радиационно-стимулированной гетеродиффузии в Si методом электронно-дырочных переходов // Ташкент: ФАП, 1969.
7. *Смирнов Л.С.* Легирование полупроводников методом ядерных реакций. - Новосибирск: Наука, 1981.
8. *Киблик В.Я., Литвинов Р.О., Литвиченко В.Г. и др.* Влияние облучения на генерационно-рекомбинационные характеристики МДН-структур // *УФЖ*. - 1977. - **22**, №7. - С.1098-1103.
9. *Чернышев А.А., Ведерников В.В., Галеев А.П., Горюнов Н.Н.* Радиационная отбраковка полупроводниковых приборов и ИС // *Зарубежная электронная техника*. - 1979. - №5(200). - С.3-25.
10. *Физические основы надежности интегральных схем* / Под ред. Ю.Г. Миллера. - М., 1976.
11. *Галеев А.П., Елисеева С.А., Кармазикова Э.М., Харлина Г.Н.* Анализ параметров транзисторов, подвергнутых гамма-обработке с целью выбора критериев отбора // *Диэлектрики и полупроводники*. - 1980. - **18**. - С.64-67.
12. *Ведерников В.В., Галеев А.П., Горюнов Н.Н., Ладыгин Е.А., Чернышев А.А.* Использование ионизирующих излучений для испытаний полупроводниковых приборов // *Электронная техника*. Сер.2. - 1980. - **7**(143). - С.124-127.