

ДЕГРАДАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ І СЕРТИФІКАЦІЯ СЕНСОРІВ

SENSOR'S DEGRADATION, METROLOGY AND CERTIFICATION

УДК 535.375:537.226

ВПЛИВ АЛЬФА – ОПРОМІНЕННЯ НА КРЕМНІЄВІ МОН-ТРАНЗИСТОРИ

Б.П.Коман

*Львівський національний університет імені І.Франка, факультет електроніки, 79005, м. Львів,
вул. Драгоманова, 50; e-mail: bogdan_28@mail.ru*

ВПЛИВ АЛЬФА-ОПРОМІНЕННЯ НА КРЕМНІЄВІ МОН-ТРАНЗИСТОРИ

Б.П.Коман

Анотація. Робота присвячена дослідженню альфа-радіаційно-індукованих змін характеристик і параметрів кремнієвих МОН-транзисторів з полікремнієвим затвором.

Досліджено вплив альфа-опромінення на порогову напругу U_{th} , крутизну передаточної характеристики S і вихідний опір R_1 . Показано, що альфа-опромінення транзисторів супроводжується монотонним зменшенням U_{th} з часом опромінення.

Аналізуються фізичні механізми радіаційного дефектоутворення. Результати спостережуваних змін параметрів інтерпретуються в рамках моделі радіаційно-індукованих зарядів: додатнього в об'ємі підзатворного діелектрика та на поверхневих станах границі розділу Si-SiO₂. Обговорюється можлива участь іонів водню у формуванні додатнього вбудованого заряду в SiO₂. Аналізуються особливості поведінки густини станів D_{it} на границі Si-SiO₂ з часом опромінення.

Ключові слова: альфа-опромінення, МОН-транзистор, характеристики, параметри, заряд, діелектрик, тунелювання, підпороговий

THE INFLUENCE OF ALPHA-IRRADIATION ON THE SILICON MOS –TRANSISTORS

В.Р.Коман

Abstract. This work aims at the study of alpha-particle-induced changes in the characteristics and parameters of silicon MOS-transistors with poly-silicon gate. The influence of alpha-irradiation on the threshold voltage U_{th} , transconductance S and output resistance R_1 of MOS transistors was studied. It was found that alpha-irradiation is accompanied by U_{th} decrease with irradiation time.

The physical mechanisms of radiation-induced defect creation are analysed. The result of the observed changes of the parameters are interpreted within the model of the radiation-induced charges: positive in the volume under gate insulator and on the surface states of the volume Si-SiO₂. The possibility of the participation of the ions of hydrogen in the formation positive built-in charge in the SiO₂ is discussed. The specialities of the behavior of density of the states D_{it} on the border Si-SiO₂ with the time of irradiation is analysed.

Keywords: alpha-irradiation, MOS-transistor, characteristics, parameters, charge, insulator, tunneling, subthreshold

ВЛИЯНИЕ АЛЬФА-ОБЛУЧЕНИЯ НА КРЕМНИЕВЫЕ МОП-ТРАНЗИСТОРЫ

Б.П.Коман

Аннотация. Работа посвящена исследованию альфа-радиационно-индуцированных изменений характеристик и параметров кремниевых МОП-транзисторов с поликремниевым затвором. Исследовано влияние альфа-облучения на пороговое напряжение U_{th} , крутизну передаточной характеристики S и выходное сопротивление R_{i} . Показано, что альфа-облучение транзисторов сопровождается монотонным уменьшением U_{th} со временем облучения.

Анализируются физические механизмы радиационного дефектообразования. Результаты наблюдаемых изменений параметров интерпретируются в рамках модели радиационно-индуцированных зарядов: положительного в объеме подзатворного диэлектрика и на поверхностных состояниях границы раздела Si-SiO₂. Обсуждается возможное участие ионов водорода в формировании положительного встроенного заряда в SiO₂. Анализируются особенности поведения плотности состояний D_{it} на границе Si-SiO₂ со временем облучения.

Ключевые слова: альфа-облучение, МОП-транзистор, характеристики, параметры, заряд, диэлектрик, туннелирование, подпороговый

Вступ

Дослідження впливу опромінення альфа-частинками на властивості кремнієвих МОН-транзисторів необхідне з наступних причин. Насамперед з метою ціленаправленої радіаційної модифікації напівпровідникових матеріалів та мікроелектронних приладів і чіпів в процесі їх виготовлення [1-3]. Зокрема, одним із напрямів радіаційної модифікації напівпровідників є радіаційне легування, яке здійснюється шляхом контрольованого введення в напівпровідник власних структурних дефектів [4]. Основними особливостями такого легування є локальність, універсальність у відношенні різних матеріалів, сумісність з іншими технологічними процесами та відносно низька вартість радіаційних обробок в поєднанні з високою точністю та відтворюваністю. По-друге – для запобігання в елементах пам'яті ІМС так званих «м'яких» помилок, зумовлених альфа-опроміненням з хімічних елементів, які неминуче присутні в матеріалах корпусу мікросхем [5]. Інтенсивність такого випромінювання лежить в інтервалі $0.004 \dots 45 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} / \text{год}$ з енергією частинок $8 \dots 9 \text{ MeV}$.

Вплив альфа-опромінення на прилади мікроелектроніки в порівнянні з іншими радіаційними впливами (X-, γ -, та НВЧ-опромінення) характеризується певними особливостями: 1) корпускулярна природа опромінення з високою енергією частинок ($\sim \text{MeV}$) та невеликою глибиною проникнення в матеріали ($\sim 20 \mu\text{м}$) [1,2]; 2) висока швидкість генерації первинних дефектів ($\sim 1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$). Зокрема, швидкість

генерації первинних радіаційних дефектів при опроміненні альфа-частинками в 10^7 раз вища, ніж при опроміненні γ -квантами. Це є причиною утворення нових типів радіаційних дефектів (РД), не виявлених після γ -опромінення [6]; 3) в процесі опромінення можливі хімічні зміни на поверхнях та компонентах приладів, зумовлені ядерними перетвореннями хімічних елементів, що входять до їх складу [6,7].

Природа радіаційно-індукованих дефектів в кремнії вивчалася в роботах [1,4-10]. Неоднорідний розподіл РД по глибині, створений альфа-опроміненням може бути використаний для локального керування опором матеріалу та часом життя неосновних носіїв заряду [11]. Встановлено, що в процесі альфа-опромінення утворюються РД, аналогічні генерованим при γ -опроміненні від Co^{60} , а також специфічні дефекти з неперервним енергетичним спектром [7,10,12-14]. Ці дефекти є локально розупорядковані [7] та містять ядро, насичене дивакансіями та оболонкою, що включає комплекси моноакансій з домішками. Енергетичний спектр РД, їх рекомбінаційні властивості, ефективність утворення і термічна стабільність детально вивчені в [4,9].

Повну систематику радіаційних дефектів в кремнії після альфа-опромінення та основні параметри їх енергетичних рівнів приведено в огляді [4]. Однак, незважаючи на велику кількість робіт по радіаційному дефектоутворенню в Si, природа альфа радіаційно-індукованих змін в кремнієвих МОН-транзисторах залишається не встановленою.

1. Метою даної роботи є дослідження альфа-індукованих змін характеристик і параметрів кремнієвих МОН-транзисторів з довжиною каналу $L=2...10$ мкм та встановлення їх можливих фізичних механізмів.

Об'єкти дослідження та умови експерименту

В роботі використовувалися кремнієві n-канальні тестові МОН-транзистори з полікремнієвим затвором довжиною каналу $L=2...10$ мкм і шириною $W=50$ мкм, виготовлені за промисловою технологією на базі кремнієвих пластин типу КДБ (100) з $\rho=20$ Ом*см. Підзатворний діелектрик SiO_2 формувався шляхом комбінованого окиснення р-Si у сухому та вологому кисні. Товщина окислу складала 0,16 мкм. Джерелом альфа-випромінювання був ізотоп ^{238}Pu з енергією частинок 4...5 МеВ і густиною потоку рівною $5 \cdot 10^7 \text{c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Вимірювання ВАХ тестових транзисторів виконувалися на установці «Зонд-А5» з комп'ютерною реєстрацією характеристик.

Експериментальні результати та їх обговорення

Досліджувалися радіаційно-індуковані зміни параметрів U_{th} та S МОН-транзисторів, оскільки саме вони є найбільш важливими для практичної експлуатації транзисторів. На рис. 1-3 приведені основні результати таких вимірювань.

Досліджені тестові транзистори характеризуються монотонним зростанням U_{th} зі збільшенням

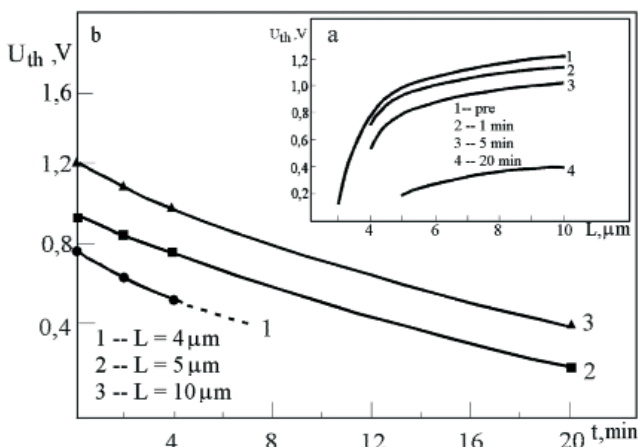


Рис.1 а) залежність порогової напруги МОН-транзисторів з різною довжиною каналу від часу альфа-опромінення;

б) залежність порогової напруги від довжини каналу для різних часів опромінення.

довжини каналу (рис.1, а). Альфа-опромінення зменшує цей параметр з часом опромінення (рис. 1, б), зберігаючи тенденцію залежності $U_{th}(L)$ незмінною. Як видно, радіаційна чутливість по параметру U_{th} зростає зі зменшенням довжини каналу.

Цікавим та практично важливим результатом альфа-радіаційного впливу на досліджувані транзистори є зростання крутизни стоко-затворної характеристики з часом опромінення (рис. 2, а). Причому, цей параметр демонструє закономірне зменшення з ростом довжини каналу незалежно від часу опромінення (рис. 2, б).

Дія альфа-опромінення проявляється також і у вихідних ВАХ транзисторів. Визначений з цих характеристик вихідний опір R_i зменшується з часом опромінення (рис. 3, а). Найбільші зміни спостерігалися для транзисторів з $L=4$ мкм, зокрема відносна зміна опору за час опромінення 60 хв. складала 100%.

Для технології МОН-мікроелектроніки важливим практичним результатом є зменшення U_{th} n-канальних транзисторів в процесі альфа-опромінення. Це дозволяє використати такий тип радіаційної обробки для керування величиною U_{th} в процесі промислової технології виготовлення МОН-транзисторів [3]. Рис. 4 демонструє розподіл порогової напруги тестових транзисторів з довжиною каналу 10 і 5 мкм по площі кремнієвої пластини до та після альфа-радіаційної обробки.

Як видно, альфа-опромінення не лише понижує U_{th} досліджуваних транзисторів, але й здійснює площинне «вирівнювання» цієї величини, що збільшує відсоток виходу готових чіпів з зада-

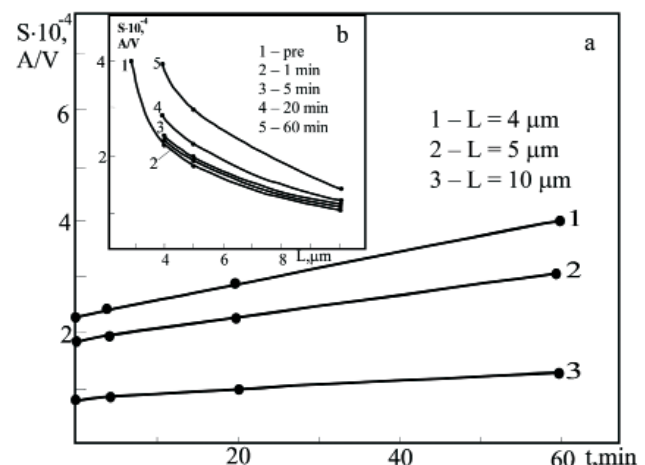


Рис.2 а) залежність крутизни стоко-затворної характеристики МОН-транзисторів з різною довжиною каналу від часу альфа-опромінення;

б) залежність крутизни від довжини каналу транзистора для різних часів опромінення.

ною величиною ($U_{th} \pm \Delta U$). Рис. 4 демонструє факт, що кожна довжина каналу L має оптимальний час опромінення при якому досягається максимально можливий однорідний розподіл транзисторів по параметру U_{th} .

Для підвищення часової стабільності параметрів радіаційно-оброблених транзисторів застосовують різні типи відпалів. Зокрема, фотонний відпал некогерентним світловим випромінюванням [15], та лазерний [16], які забезпечують стабілізацію радіаційних дефектів. Як свідчать контрольні вимірювання, отримані результати є добре відтворюваними для семи партій пластин ($N = 10$) з тестовими транзисторами різної довжини каналів (в тому числі 3 і 4 мкм). Фотонна обробка альфа-опромінених транзисторів за методикою [1,3] неколімованим немонохроматичним УФ-випромінюванням дозволяє забезпечити часову стабілізацію параметрів транзисторів. Зокрема такий вид обробки забезпечує незмінність параметрів впродовж п'яти років в межах точності проведених вимірювань. Оброблені за даною методикою опромінені транзистори мають вищу енергію активації параметрів U_{th} , R_i , S в порівнянні з фотоннонеобробленими.

Неоднорідний характер розподілу U_{th} тестових транзисторів по площі кремнієвої пластини є результатом деякого попереднього розподілу пасток в SiO_2 вихідної структури $Si-SiO_2$ [17]. Радіаційно-індукований заряд акумулюється перш за все в областях з мінімумом первинного заряду. Хоча «рельєф» густини об'ємного заряду після опромінення приходить до рівноваги, радіаційно-індукований заряд акумулюється в областях з меншою зарядовою густиною. В кінцевому випадку, це приводить до зменшення флуктуацій поверхневого потенціалу. Оскільки U_{th} є найбільш чутливим параметром до заряду, локалізованого на пастках підзатворного діелектрика МОН-транзисторів, то саме він буде найбільше зазнавати планарного перерозподілу в процесі опромінення кремнієвої пластини.

Спостережувані альфа-індуковані зміни параметрів транзисторів можуть бути поясненні з врахуванням наступних факторів: 1) створення додатнього вбудованого заряду в підзатворному діелектрику SiO_2 ; 2) збільшення густини поверхневих електронних станів на границі $Si-SiO_2$ і як наслідок – зростання заряду, локалізованого в цій області; 3) участі водневих дефектів у формуванні радіаційно-індукованого заряду.

Для дослідження впливу перших двох факторів на параметри транзисторів використана методика

аналізу підпорогових струмів [18]. Вона дозволяє розділити вклад обох вище згаданих механізмів в радіаційно-індукований зсув U_{th} , оскільки вважається, що $U_{th} = U_{nit} + U_{not}$. Тут U_{nit} – вклад у зсув U_{th} заряду, локалізованого на поверхневих пастках границі $Si-SiO_2$, U_{not} – відповідно на об'ємно – вбудованому заряді підзатворного діелектрика SiO_2 .

Підпороговий струм для транзисторів в режимі насичення може бути розрахований, як функція поверхневого згину зон рівнянням [18]:

$$I_d = \sqrt{2} C_m \frac{q N_A L \beta}{\beta} \left(\frac{n_i}{N_A} \right)^2 \exp(\beta \Phi_s)^{-1/2},$$

де Φ_s – поверхневий згин зон; N_A – рівень легування каналу; n_i – власна концентрація носіїв; L_β – довжина Дебая, рівна

$$L_\beta = \left(\frac{\epsilon_s}{\beta q N_A} \right)^{1/2}; \quad \beta = \frac{q}{kT}; \quad C_m = \mu \frac{W}{2L}.$$

На рис. 5 приведені типові криві підпорогових струмів $I_d(U_g)$ для транзистора з $L=10$ мкм, підданого альфа-радіаційній обробці протягом різних часових експозицій. Аналогічні залежності були отриманні також для транзисторів з іншими довжинами каналів. Як видно, збільшення часу опромінення приводить до зсуву кривих підпорогових струмів в сторону від'ємних напруг. Така поведінка описаних ВАХ є аналогічною до залежностей розглядуваного типу для n-каналних МОН-транзисторів після γ - та X-опромінь [18,19] та свідчить про зменшення порогової напруги з часом опромінення внаслідок зростання додатнього вбудованого заряду в підзатворному діелектрику.

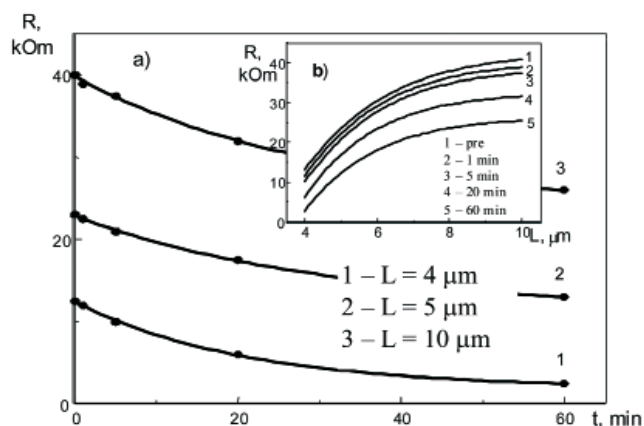


Рис.3. а) залежність вихідного опору МОН-транзисторів від часу альфа-опромінення;

б) залежність вихідного опору від довжини каналу для різних часів опромінення.

Використовуючи методику [18], проведена оцінка адитивного вкладу у зсув порогової напруги компонент U_{Nit} та U_{Not} (рис. 5, 6). Видно, що вклад радіаційно-індукованого заряду підзатворного діелектрика Q_{Not} у результуючий зсув порогової напруги, як і при γ - та X -опроміненнях [18, 19], є значно більший, ніж вклад заряду Q_{Nit} на пастках границі Si-SiO₂. В результаті: $U_{Not} > U_{Nit}$.

Важливим параметром, що характеризує стан границі розділу Si-SiO₂ є густина міжфазних пасток D_{it} . В даній роботі цей параметр визначали за методикою [20], з використанням експериментальних кривих підпорогових струмів в області слабої інверсії, використовуючи формулу:

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left(C_{ox} \left[\frac{q}{kT} / \frac{\partial \ln I_d}{\partial U_d} - 1 \right] - C_d \right),$$

де C_{ox} – ємність одиниці площі підзатворного діелектрика; C_d – ємність області просторового заряду, яка визначається:

$$C_d = \sqrt{\frac{q \varepsilon_s N_\beta}{2(\Phi_s + kT/q)}}.$$

Тут $\Phi_s = \frac{2}{3} \Phi_F$, N_β – рівень легування каналу,

а $\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_\beta}{n_i} \right]$, n_i – концентрація власних носіїв.

Програмна реалізація розрахунків здійснювалася на мові Borland Pascal шляхом зчитування даних експерименту та їх обробки.

На рис.5, в приведена зміна D_{it} МОН-транзистора з часом альфа-опромінення. Як видно, залежність D_{it} ($t_{опр}$) характеризується певними особливостями. Зокрема, стрімко зростає на протязі перших 4-5 хв, досягає максимуму ($\Delta D_{it}/D_{it0} \approx 14\%$) і надалі повільно зменшується з часом опромінення. Причому довгоканальні транзистори ($L=10$ мкм) можуть виявляти таку тенденцію протягом достатньо тривалого часу (до 60 хв).

Приведена оцінка радіаційно-індукованої зміни D_{it} демонструє факт, що зміна концентрації міжфазних електронних станів не дає суттєвого вкладу в експериментально отримані зміни параметрів досліджуваних транзисторів. Тенденція до зменшення D_{it} в процесі опромінення на другій стадії D_{it} ($t_{опр}$) може бути частково зумовлена

термічним відпалом РД, оскільки в процесі опромінення структура транзистора нагрівається до температури $\sim 80...110^\circ\text{C}$.

Закономірності альфа-індукованих змін параметрів МОН-транзисторів, приведенні вище, знаходять задовільне пояснення у загальновідомій моделі радіаційно-індукованого додатнього заряду в підзатворному діелектрику SiO₂. Тим не менше, механізм формування цього заряду на сьогоднішній день не є цілком зрозумілий.

Один із механізмів його генерації ґрунтується на іонізаційній моделі. Зокрема, вона передбачає генерацію електронно-діркових пар в процесі опромінення та їх просторове розділення внаслідок суттєвих відмінностей рухливостей електронів і дірок в об'ємі SiO₂ [21,22]. Запропоновані також інші моделі формування додатнього радіаційно-індукованого заряду в Si-SiO₂ структурах [5,23-25].

Встановлена участь іонів водню у процесах радіаційного дефекто утворення в Si-SiO₂ формуванні додатного заряду в SiO₂ [5,26-28], поверхневих станів [29-32] і електретного стану [33]. За результатами [7] енергетичний спектр водневих дефектів в альфа-опроміненні Si-SiO₂ структурах має певний розподіл з максимумом в районі 0,8еВ. Тому фізична інтерпретація радіаційно-індукованих змін в кремнієвих транзисторах є можлива лише з врахуванням «водневого фактору».

Інша модель радіаційно-індукованого заряду в кремнієвих МОН-транзисторах передбачає, що основна частина енергії при гальмуванні альфа-частинки передається електронам [34]. В результаті виникає каскадний процес іонізації з народженням пар електрон-дірка. Подалі генерація додатнього індукованого заряду відбувається, наприклад, по іонізаційній моделі, описаній вище.

Вакансії утворюються також в результаті пружного розсіювання частинок на атомах Si. Ці акти небагато чисельні (≈ 35 на частинку). Хоча в силу співвідношення мас атому Si в акті взаємодії може бути передано до 0,44Е в середньому каскаді передається всього 9 кеВ, тобто 0,2% першопочаткової енергії частинки. Ця енергія також витрачається на утворення вакансій в наступних зіткненнях з ланками Si - Si. Вклад в загальне чисто вакансій від цього процесу є співмірний з кількістю вакансій, народжених в результаті прямого пружного зіткнення альфа-частинки з атомами Si. В подальшому перебіг розсіювання залежить від енергії альфа-частинки, як E_α^{-2} що обумовлює генерацію пар Френкеля переважно в кінці пробігу. Крім того, альфа-опромінення

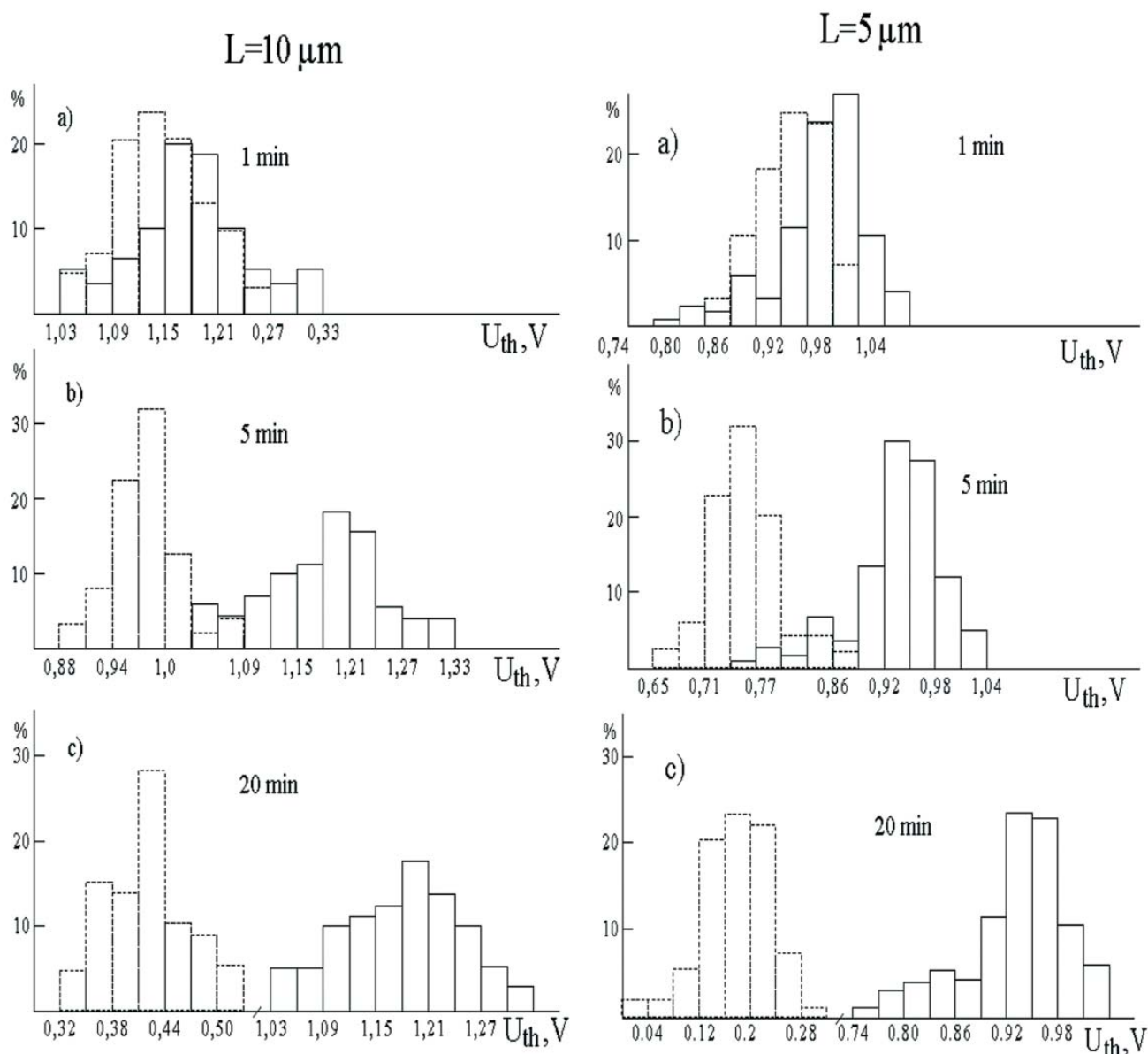


Рис.4. Гістограми розподілу порогової напруги МОН-транзисторів по площі кремнієвої пластини ($D=102$ мм) після різних часів альфа-опромінення (Суцільна лінія – до опромінення, пунктирна – після опромінення).

МОН-транзисторів супроводжується звільненням електронів з поверхневих станів границі Si-SiO_2 і приповерхневого шару Si – підкладки товщиною декілька мкм та їх тунелювання до міжфазного шару SiO_2 з наступною рекомбінацією на донорних пастках цього шару. В ролі останніх виступають трьохвалентні атоми Si^{3+} [19]. Даний механізм зумовлює часткове зниження густини поверхневих станів на границі Si-SiO_2 після певного часу опромінення і продемонстрований на рис. 5, в. Крім того, радіаційно-індуковані дірки, захопленні на діркові пастки біля границі Si-SiO_2 , будуть взаємодіяти з електронами, що тунелюють з підкладки. Одночасно, процесом, конкуруючим

до вищеописаного, є дифузія вивільнених протонів з водневомісних комплексів на поверхневих станах Si-SiO_2 . Час дифузії крізь об'єм SiO_2 на характерну глибину – 3 нм (області протяжності додатнього заряду в SiO_2) [19] становить 0,05 с, що є реальною величиною. На цій стадії взаємодія H^+ з комплексами Si-O-Si супроводжується зростанням концентрації Si^{3+} [5,25].

Також SiOH -комплекс може дисоціювати внаслідок захоплення дірки (h^+) на напруженні зв'язки з утворенням дефектів Si^{3+} [5].

Найбільш імовірним джерелом протонів є координатно-зв'язані молекули води $(\text{H}_2\text{O})_k$ в межах границі Si-SiO_2 [30], комплекси SiOH та

SiH [5]. Для прикладу, при дії іонізуючого випромінювання проходить розрив слабого зв'язку між кремнієм і воднем, що приводить до виникнення незаповненого зв'язку кремнію, або поверхневої пастки з виділенням протонів: ${}_3O \equiv Si - H \rightarrow {}_3O \equiv Si - H^+$.

Можливе утворення також гідроксильної групи OH⁻ внаслідок розпаду комплексів SiOH та переміщення її до границі кремній – окисел [35]. У випадку альфа-опромінювання імовірним є розрив зв'язків Si-Si на границі Si-SiO₂ при захопленні дірок, генерованих випромінюванням. Наслідком є утворення P_b-центрів (ПС) і додатньо заряджених E'-центрів в окислі. Зворотня реакція проходить при тунельному переході електрона з кремнію на E'-центр з наступним відновленням Si-Si зв'язку.

Закономірності зміни заряду на поверхневих станах, що відображає зміна U_{Nit}, є проблематичні в інтерпретуванні. Це зумовлено, насамперед, відсутністю на сьогоднішній день достовірної моделі міжфазної границі Si-SiO₂. Дефектно-домішкова природа границі Si-SiO₂ та закономірності поведінки U_{Nit} дають змогу припустити, що спостережувані відносно невеликі радіаційно-індуковані зміни Q_{Nit} (U_{Nit}) є результатом перебудови дефектно-домішкових комплексів, які характерні для між фазової границі. Встановлено, що центри типу P_{bo} – і P_{bl} є відповідальними лише за 50% станів спектру N_{ss}(φ_s)

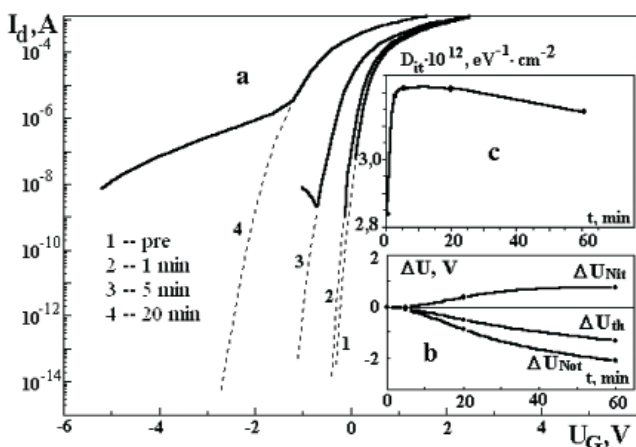


Рис.5. а) криві підпорогових струмів МОН-транзисторів (L=10 мкм) після різних часів опромінювання.

б) залежність зсуву порогової напруги та вкладу його адитивних компонент (UNit та UNot) від часу альфа-опромінювання, розрахованих з кривих підпорогових струмів (а).

в) залежність густини станів на границі Si-SiO₂ від часу опромінювання (розраховані з кривих підпорогових струмів (а)).

границі [35]. Однак слід враховувати, що в процесі радіаційного опромінювання проходить звільнення та наступна локалізація рухомих іонів на границі Si-SiO₂, яка не лише збільшує густину станів, але й приводить до виникнення піку густини станів N_{ss} в області енергій ~260 меВ [37]. Суттєво, що його максимальне значення практично співпадає з концентрацією нейтральних іонів, локалізованих на границі. Таким чином, мобільні іони біля границі Si-SiO₂ частково нейтралізуються через захоплення електронів з напівпровідникової підкладки МОН-структур засобом тунелювання. Це може приводити до зменшення густини станів на границі Si-SiO₂.

Приведені висновки є в деякій мірі наближеними, оскільки за даними електрофізичних досліджень важко розділити адитивний вклад всіх можливих зарядових центрів у повний заряд окислу та врахувати їх «радіаційну чутливість».

Висновки

Досліджено вплив альфа-опромінювання на характеристики та параметри кремнієвих МОН-транзисторів. Встановлено, що дія опромінювання призводить до зміщення кривих підпорогового струму $I_d(U_G)$ в сторону від'ємних напруг. Суттєвих змін зазнають основні параметри транзисторів: U_{th} , S, R_i та густина електронних станів на границі Si-SiO₂ – D_{it} . Зокрема, найбільш важливий параметр – U_{th} монотонно зменшується з часом опромінювання. Радіаційна чутливість зростає в міру зменшення довжини каналу транзистора.

Радіаційно-індуковані зміни параметрів МОН-транзисторів пояснюються в рамках моделі, що передбачає генерацію під дією опромінювання додатнього вбудованого заряду в підзатворному діелектрику SiO₂ та зміну густини поверхневих електронних станів на границі розділу Si-SiO₂ і як наслідок – зміну заряду, локалізованого на цих станах. Обговорюється участь водню та особливості альфа-радіаційного дефектоутворення в кремнієвих МОН-транзисторах.

Встановлено, що для довгоканальних транзисторів (L=10 мкм) при тривалих часах опромінювання (більше 4-5 хв) густина станів D_{it} виявляє тенденцію до зменшення. Така поведінка D_{it} знаходить своє пояснення в рамках моделі часткової нейтралізації додатніх іонів в приграничній області SiO₂ електронами, що тунелюють з підкладки кремнію, а також можливим термовідпалом РД в процесі опромінювання.

Література

1. Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С. и др., Радиационные методы в твердотельной электронике. — М.: Радио и связь, 1990. — 184 с.
2. Ленков С.В., Мокрицкий В.А., Гаркавенко А.С., Зубарев В.В., Завадский В.А., Радиационное управление свойствами материалов и изделий опто- и микроэлектроники: Монография. — Одесса: Астропринт, 2002. — 297 с.
3. Пат. 72308 Україна С2 7Н01L21/00 Спосіб отримання кремнієвого МДН-транзистора. — Коман Б.П., Морозов Л.М.; — №2002087054; заявл. 28.08.2002; опубл. 15.02.2005. Бюл. №2.
4. Козлов В.А., Козловский В.В., Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и α -частицами // ФТП. — 2001. — Т.35, №7. — С. 769 — 795.
5. Першенков В.С., Попов В.Д., Шальнов А.В., Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных схем. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 256 с.
6. Губская В.И., Звячин В.И., Кучинский П.В. и др., Радиационные дефекты в n-Si, облученном α -частицами // ФТП. — 1979. — Т.13, №1. — С. 171 — 173.
7. Кучинский П.В., Ломако М.В., Петрунин А.П., О распределении дефектов при облучении кремния неколлимированным пучком α -частиц // ЖТФ. — 1984. — Т.54, №10. — С. 343 — 345.
8. Корнюшин С.И., Лисовский И.П., Литвинов Р.О. и др., Изменение свойств МДП-структур под действием γ -облучения // Укр. физ. журн. — 1981. — Т.22, №7. — С. 1323 — 1327.
9. Indusekhar H., Kumar V., Sengupta D. Investigation of Deep Defects Due to α -particle irradiation in n-Silicon // Phys. Stat. Sol. (a). — 1986, v.93, №2. — P. 645 — 653.
10. Берман Л.С., Маляренко А.М., Ременюк Н.Д. и др., Распределение радиационных дефектов и физическая природа аномальных спектров DLTS в кремниевых диодах, облученных α -частицами // ФТП. — 1988. — Т.22, №5. — С. 844 — 848.
11. Губская В.И., Звячин В.И., Кучинский П.В. и др., Применение радиоизотопных источников α -частиц для контроля и управления временем жизни носителей заряда в полупроводниковых приборах // Электронная техника, сер. 2, Полупроводниковые приборы. — 1978. — №8. — С. 102 — 106.
12. Берман Л.С., Ременюк А.Д., Шуман В.Б., Исследование α -радиационных дефектов в n-базе кремниевых диодов // ФТП. — 1981. — Т.15, №6. — С. 1155 — 1158.
13. Губская В.И., Кучинский П.В., Ломако В.М. и др., Исследование радиационных дефектов в кремниевых p-n-переходах при альфа-облучении // ФТП. — 1981. — Т.15, №2. — С. 421 — 422.
14. Губская В.И., Кучинский П.В., Ломако В.М., Образование и термическая стабильность радиационных дефектов в p-Si, облученном α -частицами // ФТП. — 1986. — Т.20, №6. — С. 1055 — 1059.
15. Хайбуллин И.Б., О перспективах практического применения импульсного отжига. — М.: ЦНИИ Электроника, 1983, №9294/84. — 49 с.
16. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В. и др., Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. — М.: Наука, 1982.
17. Sevastianov S.B., Gerasimenko N.N., Vershinina N.V. Inhomogeneities in Irradiated Si-SiO₂ Structures // Phys. Stat. Sol. (a). — 1984. — v. 86, №2. — P. 717 — 727.
18. 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. — v. 48, №2. — P. 133 — 136.
19. Коман Б.П. Вплив рентгенівського опромінення на кремнієві МДН-транзистори // Укр. фіз. журн. — 2000. — Т.45, №12. — С. 1440 — 1445.
20. Gaitan M., Russell T.J. Measurement of Radiation-Induced Interface Traps Using MOSFETs // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 1984. — v. S — 31, №6. — P. 1256 — 1260.
21. Брожек Т.М., Киблик В.Я., Литовченко В.Г. и др., Радиационно-стимулированные эффекты в слоистых структурах МДП. — К.: 1988. — 34 с. (Препр. НАН Украины. Инс-т полупроводников; 4 — 88).
22. Ionizing Radiation effects in MOS-Devices and Circuits / ed. By T.P. Ma, P.V. Dressendorfer. — J. Wiley and Sons, NY., 1989.
23. Revesz A.G. Chemical and structural aspects of the irradiation behavior of SiO₂ films and silicon // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 1977. — v. NS — 24. — 2102 p.
24. Grunthner F.J., Maserjian J. Experimental observations of the chemistry of the SiO₂/Si interface // IEEE Trans. Nucl. Sci. — 1977. — v. NS — 24. — P. 2108 — 2115.
25. Sah C.T. Origin of interface states and oxide charges generated by ionizing radiation // IEEE T-

- rans. Nucl. Sci. – 1976. – v. NS – 23. – 1563 p.
26. Svensson C.M. The defect structure of the Si-SiO₂ interface, a model based on trivalent silicon and its hydrogen compounds // The physics of SiO₂ and its interfaces. ST. Pantelides. Ed. Pergamon Press. Elmsford. NY. – 1978. – 328 p.
 27. Revesz A.G. Defect structure and irradiation behavior of noncrystalline SiO₂ // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1971. – v. NS – 18. – 113 p.
 28. Lenahan P.M. Radiation induced trivalent silicon defect buildup at the Si-SiO₂ interface in MOS structures // IEEE Trans. Nucl. Sci. – 1981. – v. 28, №6. – P. 1459 – 1461.
 29. Лисовский И.П., Литовченко В.Г., Романова Г.Ф. и др., Полевой механизм генераций подвижных протонов и формирование дефектов в МДН-структурах // Укр. физ. журн. – 1993. – 38, №10. – С. 1532 – 1539.
 30. Литовченко В.Г., Горбань А.П. Основи фізики мікроелектронних систем метал-діелектрик-напівпровідник. – К.: Наукова думка, 1978. – 280 с.
 31. Vuillaume D. Nature of the mechanism of interface state creation on electrically stressed metal-oxide-semiconductors structures // Appl. Phys. Lett. – 1991. – v. 59, №24. – P. 3118 – 3120.
 32. Vuillaume D. The influence atmosphere hydrogen on the energetic distribution in the abilities of γ -irradiation and injection charge // Journ. Appl. Phys.. – 1991. – v. 70, №11. – P. 6902 – 6907.
 33. Koman B.P., Galchynskyy O.V., Kovalyuk R.O. Alfa-particle irradiation induced defects in SiO₂ films of Si-SiO₂ structured // NIMB. – 1996. – №116. – P. 389 – 392.
 34. Берман Л.С., Иванов А.М., Строкан Н.Б., К вопросу об эффективности образования вакансионных центров в n-Si при облучении α -частицами // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т.19, №20. – С. 24 – 27.
 35. Симаков А.Б., Башин А.Ю., Радиационно-стимулированное термическое окисление кремния // Микроэлектроника. – 2007. – Т.36, №1. – С. 62 – 65.
 36. Gary J. Gerardi, Edward H. Poindexter, Philip J. Caplan. Interface traps and Pb centers in oxidized (100) silicon wafers // Appl. Phys. Lett. – 1986. – v. 49, №6 (11). – P. 348 – 350.
 37. Дмитриев С.Г., Маркин Ю.В., Проявление процесса денейтрализации подвижного заряда в SiO₂ при спектроскопии границы раздела кремний-окисел // ФТП. – 1998. – Т.32, №12. – С. 1445 – 1449.