

# ДЕГРАДАЦІЯ, МЕТРОЛОГІЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ СЕНСОРІВ

## SENSOR'S DEGRADATION, METROLOGY AND CERTIFICATION

УДК 535.375:537.226

### ВПЛИВ КОМБІНОВАНИХ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ТА ІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ПАРАМЕТРИ КРЕМНІЄВИХ МДН-ТРАНЗИСТОРІВ

*Б. П. Коман*

*Львівський національний університет імені Івана Франка, ф-т електроніки  
(вул. Драгоманова, 50, м. Львів, 79005, Україна; e-mail: bogdan\_28@mail.ru)*

### ВПЛИВ КОМБІНОВАНИХ РЕНТГЕНІВСЬКОГО ТА ІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАНЬ НА ПАРАМЕТРИ КРЕМНІЄВИХ МДН-ТРАНЗИСТОРІВ

*Б. П. Коман*

**Анотація.** В роботі досліджено вплив рентгенівського та імпульсного лазерного ( $\lambda = 1,06$  мкм,  $\tau = 10^{-3}$  с) випромінювань на параметри кремнієвих МДН-транзисторів з довжинами каналів  $1 \dots 10$  мкм. Отримані результати спостережуваних змін параметрів інтерпретуються в рамках моделі додатнього заряду в об'ємі підзатворного діелектрика  $\text{SiO}_2$  та дефектно-домішкової природи міжфазної границі  $\text{Si-SiO}_2$ , потенціальний рельєф якої зазнає структурної трансформації під дією рентгено-лазерної обробки.

**Ключові слова:** МДН-транзистор, рентгенівське опромінення, параметри, лазерна обробка, підпороговий, заряд, напруга, струм, кремній

### EFFECT OF COMBINED X-RAY AND LASER PULSE RADIATION ON THE PARAMETERS OF SILICON MOS-TRANSISTORS

*В. Р. Коман*

In this paper the influence of X-ray and pulsed laser ( $\lambda = 1,06$  мкм,  $\tau = 10^{-3}$  с) radiation the parameters of silicon MOS-transistors with channel length  $1 \dots 10$  мкм. The results of the observed changes in the parameters are interpreted in the framework of positive integer charge in the bulk dielectric undergate  $\text{SiO}_2$ . And defect-impurity nature of the interphase boundary  $\text{Si-SiO}_2$ , the potential relief which undergoes a structural transformation under the influence of X-ray- laser treatment.

**Keywords:** MOS-transistor, X-irradiation, parameters, the laser treatment, subthreshold, charge, voltage, current, silicon

## ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ РЕНТГЕНОВСКОГО И ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ КРЕМНИЕВЫХ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

*Б. П. Коман*

**Аннотация.** В работе исследовано влияние рентгеновского и импульсного лазерного ( $\lambda = 1,06$  мкм,  $\tau = 10^{-3}$  с) излучений на параметры кремниевых МДП-транзисторов с длинами каналов  $1 \dots 10$  мкм. Полученные результаты наблюдаемых изменений параметров интерпретируются в рамках модели положительного заряда в объеме подзатворного диэлектрика  $\text{SiO}_2$  и дефектно-примесной природы межфазной границы  $\text{Si-SiO}_2$ , потенциальный рельеф которой претерпевает структурную трансформацию под действием рентгено-лазерной обработки.

**Ключевые слова:** МДП-транзистор, рентгеновское облучение, параметры, лазерная обработка, подпороговый, заряд, напряжение, ток, кремний

### Вступ

Рентгенівське та імпульсне лазерне опромінення застосовують сьогодні в технології мікроелектроніки для направленої модифікації напівпровідників та зміни їхніх електрофізичних параметрів [1-3]. Причому, дія лише лазерного випромінювання на поверхню напівпровідника може приводити до зміни її структурно-морфологічних та електрофізичних властивостей. Тому застосування, зокрема, класичної лазерної обробки часто обмежується лише лазерно-індукованою генерацією дефектів в приповерхневій області оброблюваних матеріалів. Загалом, унаслідок такого впливу лазерної обробки в технології мікроелектроніки використовується сьогодні для відпалу структурних недосконалостей та механічних напружень, десорбції окисного шару, створення приповерхневих областей, збагачених чи збіднених основними носіями, аж до інверсії [4,5]. Отож практичне використання такої технології для готових мікроелектронних кремнієвих МДН-транзисторів та аналогічних приладів польової електроніки є обмежене в силу складності гетерогенної системи ( $\text{Si-SiO}_2$  - poly Si(метал)) і особливостей їхньої конструкції. Тому спокусливим для технологів є використання планомірного об'ємного дефектоутворення за допомогою комбінованих рентгенівського та лазерного впливів по всьому перерізу МДН-транзистора. Дія таких факторів дасть змогу здійснювати одночасну цілеспрямовану генерацію дефектів певного типу та їхню стабілізацію у всіх складових елементах та границях розділу, що в кінцевому плані зумовить планомірну зміну параметрів

МДН-приладу. Розуміння таких фізичних процесів дозволить також розв'язати в технології виготовлення твердотільних електронних приладів низку важливих практичних задач, зокрема формування приповерхневих шарів відповідної якості, програмовану модифікацію кристалів, створення нових типів приладних структур.

Метою роботи було дослідження впливу комбінованих рентгенівського та імпульсного лазерного опромінення ( $\lambda = 1,06$  мкм) на кремнієві МДН-транзистори та встановлення оптимальних параметрів випромінювань для оптимізації характеристик і параметрів досліджуваних транзисторів. Мета роботи досягалася засобом попереднього низькодозного рентгенівського опромінення (до  $10^3$  Рад) чіпу з тестовими транзисторами з боку планарної структури та подальшою його імпульсною лазерною обробкою з боку підкладки кремнію (тильної) сторони.

### Результати експериментів та їх обговорення

Складність аналізу радіаційних ефектів в напівпровідникових МДН-структурах полягає в тому, що спостережувані зміни електрофізичних параметрів є інтегральним результатом дефектоутворення, який проходить по різних механізмах в напівпровіднику, діелектрику та на їх границі. Для коректної інтерпретації експериментальних результатів необхідне проведення комплексного дослідження, що забезпечує можливість використання незалежних методів контролю процесів утворення та взаємодії дефектів в різних шарах.

Вихідними даними для постановки та розв'язання технологічної задачі по оптимізації основних параметрів кремнієвих МДН-транзисторів за допомогою рентгено-лазерного опромінювання слугували результати експериментальних досліджень по впливу такого виду обробки на спектри струмів термостимульованої деполяризації (ТСД) базових структур Si-SiO<sub>2</sub>. Результати таких досліджень наочно відображають інтегральний спектр пасток для носіїв заряду в структурі та дають змогу прослідкувати імовірні процеси міграції, заповнення та вивільнення носіїв зарядів з пасток під дією зовнішніх факторів та електропольових обробок [6, 7].

Для дослідження спектрів ТСД використовувалися вихідні структури p-Si-SiO<sub>2</sub> площею 1 см<sup>2</sup>, отримані комбінованим окисленням в сухому та вологому кисні при температурі 1150 °С.

Товщина окислу SiO<sub>2</sub> становила 0,16 мкм. Структури попередньо опромінювали рентгеновським випромінюванням упродовж 6-10 хв. зі сторони шару SiO<sub>2</sub> апаратом «РЕИС-И» з мідним антикатодом при напрузі 30кВ і струмі 100 мкА. Лазерну обробку виконували зі сторони підкладки Si за допомогою установки «Квант-16» в режимі модульованої добротності. Тривалість імпульсу складала 10<sup>-3</sup> с. Діаметр лазерного пучка – 0,8–1,0 см.

Спектри термостимульованої деполяризації (ТСД) структур досліджували за стандартною методикою [6]. Поляризацію структур виконували в електричному полі між двома плоскими електродами конденсаторної комірки, розміщеної у вакуумному кріостаті, при температурах ~360 і ~450 К, відповідно. Величина поля поляризації складала 2·10<sup>4</sup> В/см. «Фіксування» електричного стану здійснювалося шляхом різкого охолодження поляризованої структури до кімнатної температури за допомогою продування парів рідкого азоту кризь канали нагрівача комірки. Після охолодження структуру нагрівали в лінійному режимі зміни температури зі швидкістю 0,06...0,1 К/с з синхронним записом струму деполяризації. Для вимірювань струмів термостимульованої деполяризації використовувався електрометр типу В7-30 з автоматичним їх записом на ПК через АЦП. Діапазон температур при розгортанні спектру  $j(T)$  складав 293-500 К.

Енергетичний спектр густини станів дефектної підсистеми розраховували шляхом розв'язку інтегрального рівняння Фредгольма

1 роду, що описує експериментальні спектри ТСД [6]. Опрацьовувався високотемпературний максимум (450 К), оскільки саме він є в основному адекватним за поведінку структури Si-SiO<sub>2</sub> при радіаційних впливах [7].

На рис.1 приведена еволюція спектрів енергетичних станів дефектів вихідної структури p-Si-SiO<sub>2</sub> після рентгено-лазерних обробок зі зростаючою густиною енергії лазерного пучка. Як видно, вихідна структура володіє характерним вузьким енергетичним розподілом станів, з чітко вираженим максимумом, що відповідає максимальній густині станів  $N_{max}$ , та невеликою шириною. Це свідчить про високу концентрацію дефектів у вихідній структурі, що приймають участь у ТСД-процесах, однак їх різновидність відносно невелика. Рентгено-лазерне опромінення дещо розширює енергетичний спектр дефектів завдяки генерації нових типів дефектів та в міру зростання густини лазерного пучка приводить до поступового зменшення  $N_{max}$ .

По досягненні енергії лазерного пучка значення 3,5 Дж/см<sup>2</sup> густина станів  $N_{max}$  сягає відносного мінімуму, але її спектр зазнає енергетичного розширення. Даний факт свідчить про зменшення кількості дефектів унаслідок їхнього відпалу, структурної трансформації чи електричної нейтралізації та збільшення їхнього різноманіття. Після лазерного опромінення з енергією вище  $E_{min}$  густина станів  $N_{max}$  в Si-SiO<sub>2</sub> поступово зростає, а енергетичний спектр (по ширині) еволюціонує в сторону аналогічного спектру вихідної структури, що свідчить про складні регенераційні процеси в дефектній підсистемі під дією лазерного опромінення.

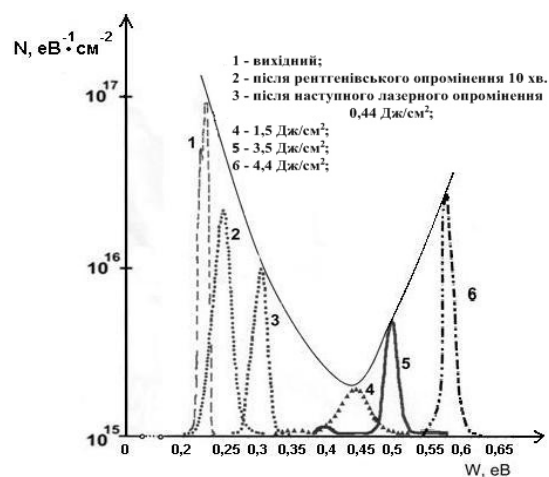


Рис.1. Енергетичний спектр розподілу густини станів структур Si-SiO<sub>2</sub> за даними ТСД.



Подальше збільшення енергії лазерного пучка супроводжується зворотнім зміщенням кривої підпорогових струмів (криві 5,6), що свідчить про зростання порогової напруги транзистора за рахунок зменшення додатного заряду, індукованого в підзатворному діелектрику на попередніх стадіях. Описані тенденції поведінки кривих підпорогових струмів транзисторів після рентгено-лазерного впливу є типовими для досліджуваних транзисторів з довжинами каналів 1-10 мкм і використовувалися в подальшому для дослідження фізичних механізмів радіаційно-індукованих змін їхніх параметрів.

Згідно [8,11], основний вклад у радіаційно-індуковані зміни параметрів кремнієвих МДН-транзисторів вносять зарядові процеси в об'ємі підзатворного діелектрика  $\text{SiO}_2$  та на поверхневих станах міжфазної границі розділу  $\text{Si-SiO}_2$ . Тому чутливими параметрами до таких процесів є порогова напруга польового транзистора  $U_{\text{пор}}$  та густина станів  $D_{\text{it}}$ . Як встановлено в [11], рентгеноно-індукований зсув порогової напруги  $U_{\text{пор}}$  складається з двох адитивних компонент:  $\Delta U_{\text{Not}}$  - що обумовлює зсув напруги за рахунок радіаційно-індукованого заряду на пастках в підзатворному діелектрику та  $\Delta U_{\text{Nit}}$  - за рахунок заряду на поверхневих станах границі  $\text{Si-SiO}_2$ . Тобто:  $U_{\text{пор}} = \Delta U_{\text{Nit}} + \Delta U_{\text{Not}}$ .

На рис. 4 приведена залежність порогової напруги від густини енергії лазерних імпульсів двох кремнієвих МДН-транзисторів з довжиною каналу 10 мкм та різними часами попередньої рентгенівської обробки. Обидва транзистори володіли однаковими значеннями вихідної порогової напруги -1,28 В. Після попереднього рентгенівського опромінення (5 хв.) порогова напруга першого транзистора закономірно понизилася до 1,15 В ( $X^*$ ). Другий транзистор після рентгенівського опромінення (10 хв.) зменшив  $U_{\text{пор}}$  до 1,05 В ( $X^{**}$ ). Подальша лазерна обробка пучками з різною густиною енергії лазерних імпульсів продемонструвала, що залежність  $U_{\text{пор}}(E)$  характеризується трьома стадіями. На першій стадії при зростанні густини енергії лазерного імпульсу до 3 Дж/см<sup>2</sup>  $U_{\text{пор}}$  стрімко зменшується. На другій — в інтервалі енергій 3-3,5 Дж/см<sup>2</sup> залишається практично незмінною та приймає мінімальне значення. Подальше збільшення енергії (стадія 3) супроводжується зворотною тенденцією - наростанням порогової напруги.

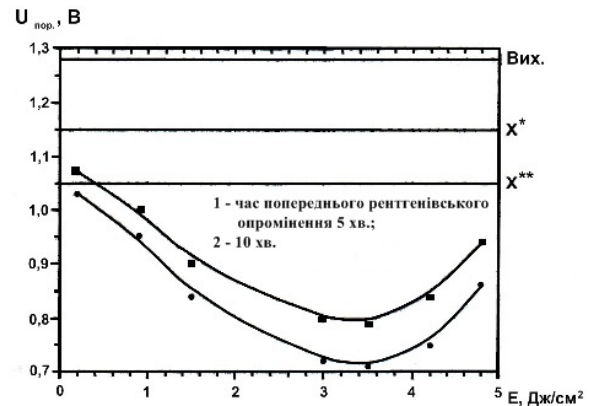


Рис.4. Залежність порогової напруги кремнієвого транзистора від густини енергії лазерного пучка.

Таким чином, практично важливим результатом є існування оптимального значення густини енергії лазерного пучка, що забезпечує мінімальні значення порогової напруги після низькодозової попередньої рентгенівської обробки.

Важливим параметром, що формує властивості МДН-транзисторів є густина електронних станів на границі  $\text{Si-SiO}_2$  -  $D_{\text{it}}$ . Значення цього параметра є визначальним для характеристики ступені досконалості міжфазної границі, однак фізична природа її сьогодні далека від однозначної інтерпретації. Цей фактор суттєво впливає на ефективну рухливість носіїв в каналі транзистора, а значить і його швидкодію.

Розрахунки  $D_{\text{it}}$  виконувалися згідно методики [9], з використанням кривих підпорогових струмів. Програмна реалізація розрахунків виконана на мові Borland Pascal.

На рис. 5 приведені залежності густини станів від густини енергії лазерного пучка для вихідних транзисторів, описаних вище. Вихідні транзистори володіли густиною станів  $6 \cdot 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Попередня рентгенівська обробка закономірно приводить до збільшення густини станів ( $10^{12} - X^*$ , і  $4 \cdot 10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} - X^{**}$ ), відповідно. Подальша дія лазерного опромінення виявила аналогічну тристадійну залежність, спостережувану вище для  $U_{\text{пор}}$  (рис.4). На першій стадії густина станів неухильно зменшується, досягаючи мінімальних значень на другій, при густині лазерного пучка в інтервалі 3- 3,5 Дж/см<sup>2</sup>. Збільшення густини лазерного пучка на третій стадії, після досягнення мінімуму  $D_{\text{it}}$ , супроводжується зростанням

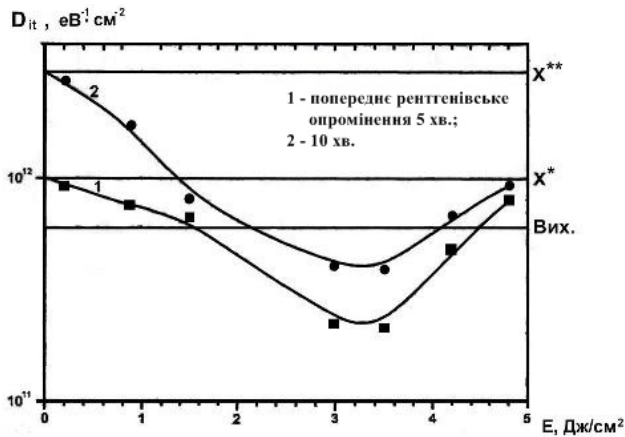


Рис.5. Залежність густини станів на міжфазній границі Si-SiO<sub>2</sub> від густини енергії лазерного пучка після попереднього рентгенівського опромінення.

Закономірність отриманих результатів підтверджується аналогічними дослідженнями на транзисторах з довжинами каналів 2 і 4 мкм (Табл.1, 2).

Як видно, густина енергії 3-3,5 Дж/см<sup>2</sup> є критичною для кремнієвих транзисторів, оскільки забезпечує мінімальні значення порогової напруги та густини станів міжфазної границі розділу Si-SiO<sub>2</sub>. Загалом, така післятехнологічна обробка сформованих МДН- транзисторів в межах окремого чіпу дозволяє серійно отримувати транзистори з заданими параметрами [1 2].

Дія рентгенівського випромінювання супроводжується генерацією радіаційних дефектів по всьому об'єму напівпровідникової структури і класифікація яких в кремнії приведена в [13]. Однак такі дефекти є термодинамічно нерівноважні, в результаті чого основні параметри напівпровідників нестабільні в часі внаслідок релаксації дефектно- домішкової системи. Тому одним з ключових завдань радіаційної фізики є розв'язання проблеми часової стабільності параметрів напівпровідників та напівпровідникових структур на їх основі після радіаційного впливу. З метою стабілізації дефектної структури моно- та полікристалічних об'єктів після дії радіації, як правило, застосовують термічний та лазерний відпал. Однак застосування термічного відпалу для кремнієвих МДН-транзисторів є проблематичним через високі значення ефективних температур відпалу радіаційних дефектів (400-500 °C) [14]. Технологія лазерного відпалу достатньо

апробована для моно-та полікристалів і використовується на різних технологічних етапах мікроелектронного виробництва, але не може бути тотально застосована до сформованих кремнієвих МДН-транзисторів в силу специфіки їхньої конструкції. Слід відмітити, що технологія лазерного відпалу дозволяє отримувати результати, які принципіально не можуть бути досягнуті термовідпалом. Це, зокрема, висока досконалість кристалічної структури, підвищення ефективності легування, можливість отримання метастабільних пересичених систем, локальність відпалу в трьох вимірах та ін.

В даній роботі лазерна обробка попередньо рентгено-опромінених структур проводилася зі сторони вільної поверхні підкладки (рис.2), що забезпечило вплив на дефектну структуру по всьому об'єму МДН-структури. Крім того, спектральний діапазон використовуваного лазерного випромінювання ( $\lambda = 1,06$  мкм) дозволяє впливати не лише на дефектну структуру кремнію (60% поглинання), але й на границю розділу Si-SiO<sub>2</sub> та зарядові центри в підзатворному діелектрику SiO<sub>2</sub>, оскільки решта-40% світлового лазерного потоку проникає до границі розділу та в об'єм діелектрика.

На рис.6 приведена часова залежність відносної зміни порогової напруги після рентгенівського опромінення (1) та після рентгено-лазерної обробки (2). Як видно, поведінка  $U_{пор}$  після рентгенівської обробки характеризується значною нестабільністю і супроводжується навіть зміною знаку цього впливу. Рентгено-лазерна обробка (крива 2) забезпечує значно вищу часову стабільність  $U_{пор}$  без зміни знаку цього параметру з часом. Тому в практичному аспекті використання другого виду обробки має безсумнівну перевагу і може знайти використання для оптимізації параметрів МДН-структур в технології кремнієвої мікро- та наноелектроніки.

Приведені вище результати дослідження комбінованої дії рентгенівського та лазерного випромінювань свідчать про складний вплив лазерного опромінення на кремнієву МДН-структуру. Зокрема, крім стабілізаційного фактору, який притаманний лазерній обробці радіаційно-опромінених напівпровідників, імовірними механізмами дії використовуваного лазерного опромінення є вплив на зарядовий стан та структуру границі розділу, а також електронну підсистему підзатворного діелектрика SiO<sub>2</sub>.

Таблиця 1

**L=2мкм**

$E, \text{ Дж/см}^2$			0,2	0,9	1,5	3	3,5	4,2	4,8
$U_{\text{пор.}}, \text{ В}$	Вих. 0,95	Х-опр 0,81	0,78	0,7	0,65	0,55	0,57	0,67	0,79
$D_{\text{it}}, \text{ еВ}\cdot\text{см}^{-2}$	Вих. $2,7 \cdot 10^{11}$	Х-опр $7,4 \cdot 10^{11}$	$6,7 \cdot 10^{11}$	$4,7 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$9,4 \cdot 10^{10}$	$9 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{11}$

Таблиця 2

**L=4мкм**

$E, \text{ Дж/см}^2$			0,2	0,9	1,5	3	3,5	4,2	4,8
$U_{\text{пор.}}, \text{ В}$	Вих. 1,1	Х-опр 1,0	0,95	0,92	0,9	0,86	0,85	0,88	0,98
$D_{\text{it}}, \text{ еВ}\cdot\text{см}^{-2}$	Вих. $5 \cdot 10^{11}$	Х-опр $8,7 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{11}$	$4,7 \cdot 10^{11}$	$0,7 \cdot 10^{11}$	$0,6 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	$6,4 \cdot 10^{11}$

Фізичні механізми описаних закономірностей змін параметрів кремнієвих МДН-транзисторів можуть бути пояснені лише з урахуванням електроніки головних дефектів, притаманних таким структурам.

Найбільш прийнятною концепцією природи міжфазної границі є модель, згідно якої на границі Si-SiO<sub>2</sub> і приповерхневому шарі SiO<sub>2</sub> локалізовані комплекси домішкових атомів, які характеризуються наявністю обірваних зв'язків і володіють в основному амфотерними властивостями. Експериментально ідентифіковано два типи поверхневих станів – P<sub>В0</sub> і P<sub>В1</sub> – центри, що являють собою обірвані зв'язки кремнієвого атома, оточеного відповідно трьома атомами кремнію (-Si=Si<sub>3</sub>) і двома атомами кремнію та одним атомом кисню (-Si=Si<sub>2</sub>O). Імовірними також є й інші типи дефектів, однак їх експериментальна ідентифікація утруднена в силу низької концентрації.

На рис. 7а приведена модель класифікації зарядів у вихідній структурі Si-SiO<sub>2</sub> з типовими зарядовими центрами, аналогічно [10]. Найбільш характерною властивістю таких об'єктів є наявність в них, як відомо, додатнього вбудованого заряду в SiO<sub>2</sub> та заряду електронних локалізованих станів на міжфазній границі Si-SiO<sub>2</sub>. Ситуація ускладнюється тим, що на границі розділу Si-SiO<sub>2</sub> в приграничному шарі SiO<sub>2</sub> існує додатній фіксований заряд



Рис.6. Часова залежність відносної зміни порогової напруги після рентгенівського опромінення та рентгено-лазерної обробки.

нерухомих іонів Si<sup>3+</sup>, локалізований заряд мобільних іонів лужних металів Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> та іонів водню H<sup>+</sup>. Вони збуджують потенціальний рельєф міжфазної границі, суттєво впливаючи на рухливість носіїв в каналі транзистора. Крім того, незважаючи на багатопланові дослідження електрофізичних властивостей Si-SiO<sub>2</sub>, природа додатнього заряду та механізм формування міжфазних електронних станів залишаються далекими від розуміння. Однак встановлено, що у формуванні всіх властивостей приймають участь іони Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, та H<sup>+</sup>. Показано, що радіаційне опромінювання приводить до зміни зарядового стану дефектів в об'ємі SiO<sub>2</sub> та на міжфазній границі Si-SiO<sub>2</sub>

[11,15,16]. Експериментальні дані [15,17] свідчать про багатофакторну участь водню у формуванні властивостей Si та SiO<sub>2</sub>. Однак, якщо для монокристалів Si ситуація вважається в достатніх межах зрозумілою [18], то участь водню у явищах переносу в SiO<sub>2</sub> та Si-SiO<sub>2</sub> є далеко від розуміння. Однією з причин є низьке значення енергії активації атома водню (~ 0,1 eВ) та його надзвичайна реакційність, що утруднює однозначну ідентифікацію механізмів протонного переносу в Si-SiO<sub>2</sub>. Крім того, значна кількість експериментальних результатів однозначно стверджує про присутність в об'ємі та на поверхні шарів SiO<sub>2</sub> значної кількості протонвмісних угруповань [18-20]. Причому координатно-зв'язані молекули води (H<sub>2</sub>O)<sub>к</sub> володіють найбільшою протонною активністю, а в МДН-структурах вони дисоціюють на межах Si-SiO<sub>2</sub> та SiO<sub>2</sub>-метал [19]. Вважається, що лужні метали є джерелом додатнього заряду в окислі. Максимальна концентрація іонів Na<sup>+</sup> спостерігається на межах метал-оксид та кремній-оксид.

На відміну від об'єму SiO<sub>2</sub>, де іони Li, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, створюють високий відносно дна зони донорний рівень [21,22], локалізовані біля межі розділу іони модифікують спектр поверхневих станів в інтервалі енергій, який відповідає забороненій зоні Si.

Цілком очевидно, що з позицій представленої моделі заряджених центрів та з врахуванням їхньої природи вплив зовнішніх факторів зводиться до зміни зарядового стану описаних центрів та створення на їхній основі стабільної зарядової конфігурації, яка забезпечує оптимальне значення параметрів транзисторів.

Насамперед попереднє рентгенівське опромінення МДН-транзистора призводить до часткового «розрихлення» міжфазної границі Si-SiO<sub>2</sub> іонами H<sup>+</sup>, які звільняються рентгенівськими квантами в об'ємі SiO<sub>2</sub> та дифундують до неї. Їхня локалізація на зв'язках дефектно-домішкових комплексів межі Si-SiO<sub>2</sub> супроводжується спотворенням зв'язків та зміною механічних напружень (рис.7б). Однак електричний потенціальний рельєф може навіть дещо покращитися внаслідок того, що в процесі опромінення значна частина локалізованих на границі розділу іонів Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, перелокалізується в об'єм SiO<sub>2</sub>, заповнюючи більш стабільні пастки [7].

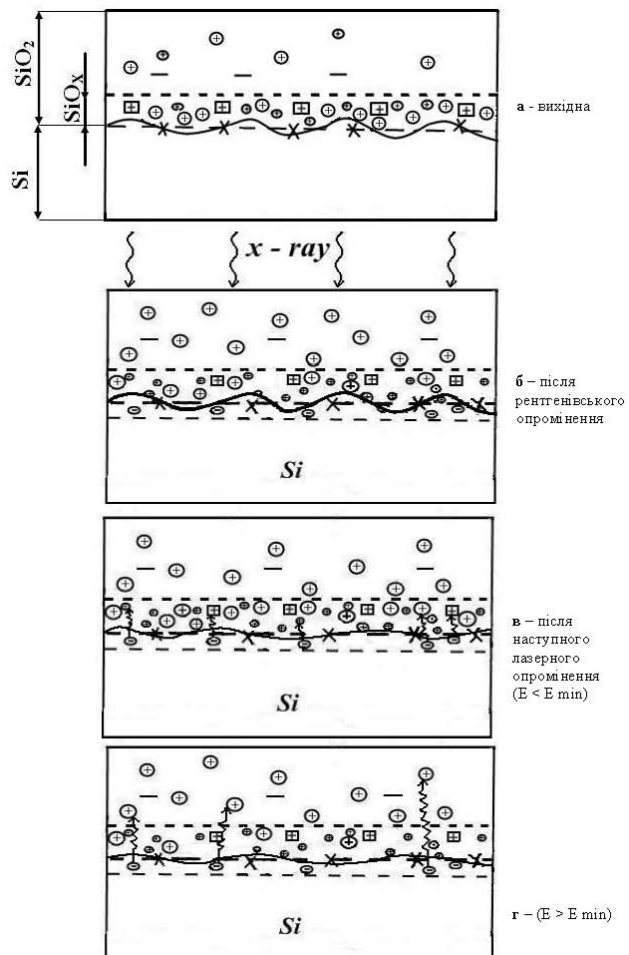


Рис.7. Модель класифікації зарядів у вихідній структурі Si-SiO<sub>2</sub> (а), їхня зміна після рентгенівського опромінення (б) та наступної лазерної обробки. ( позначення зарядів : ⊕ – рухомий заряд іонів Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> ; ⊕ – рухомий заряд H<sup>+</sup> на структурний недосконалостях; ⊕ – додатній (фіксований) вбудований заряд в окислі SiO<sub>2</sub> ;

⊗ – локалізований заряд на поверхневих пастках границі Si – SiO<sub>2</sub>; — – від’ємний заряд, захоплений в<sup>+</sup> окислі ).

Отож попередня рентгенівська дія, не вносячи суттєвих радіаційних пошкоджень в структуру Si-SiO<sub>2</sub>, по суті частково очищує межу розділу від домішкових іонів, тобто розблоковує іони Si та власні дефекти P<sub>В0</sub> і P<sub>В1</sub> від домішок в приграничному шарі SiO<sub>2</sub>, прилеглому до Si. Таким чином описана обробка створює попередні умови для ефективного впливу на зарядовий стан центрів, що формують основні властивості структур Si-SiO<sub>2</sub>.



На першому етапі (при густині лазерного пучка  $E < E_{\min}$ ) дія лазерного опромінення супроводжується зменшенням  $D_{it}$  та  $U_{\text{пор}}$  з ростом густини енергії пучка, що зумовлено збільшенням додатнього заряду в об'ємі  $\text{SiO}_2$  (рис. 4 і 5). Останнє підтверджується також поведінкою кривих підпорогових струмів (рис.3). В рамках приведеної зарядової моделі фізичними механізмами спостережуваних змін є фотоіонізація приграничного до  $\text{SiO}_2$  шару  $\text{Si}$  лазерним випромінюванням, частина якого проникає до межі розділу  $\text{Si}-\text{SiO}_2$ . Генеровані електрони тунелюють до границі розділу, де нейтралізують в приграничному шарі  $\text{SiO}_2$  іони  $\text{Si}$  та решту додатніх іонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ . Таким чином вплив заряду додатніх іонів, локалізованого в об'ємі  $\text{SiO}_2$ , зростає (рис.7в). Наслідком цих процесів є зменшення густини станів на міжфазній границі  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  (стадія 1) та порогової напруги, відповідно. Зрозуміло, що інтенсивність описаних процесів зростає в міру збільшення густини лазерного пучка, оскільки збільшується кількість елементарних актів внутрішнього фотоэффекту і відповідних процесів нейтралізації додатніх іонів в приграничному шарі  $\text{SiO}_2$ .

На другому етапі ( $E = E_{\min}$ ) впливу лазерного опромінення на характерні параметри  $D_{it}$  та  $U_{\text{пор}}$  процеси нейтралізації додатнього заряду в приграничному шарі  $\text{SiO}_2$  досягають насичення внаслідок скінченої кількості додатніх пасток  $\text{Si}^{3+}$ . Електричний рельєф міжфазної границі розділу набуває найбільшої досконалості-мінімум  $D_{it}$  (стадія 2, рис. 5).

На третьому етапі ( $E > E_{\min}$ ) електрони, які тунелюють крізь перехідний шар, в силу заповнення додатніх пасток, дифундують в об'єм  $\text{SiO}_2$ , де нейтралізують об'ємні іони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , зменшуючи таким чином величину додатнього заряду в підзатворному діелектрику (рис.7г). Під дією високих густин лазерного випромінювання міжфазна границя  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  зазнає структурних перебудов, що супроводжується зростанням  $D_{it}$ . Механізмами такої перебудови можуть бути: 1) вплив об'ємного геттера, створеного внаслідок акустичної деформації підкладки при дії лазерного пучка, що приведе до зміни складу границі  $\text{Si}-\text{SiO}_2$ ; 2) геттерний ефект з участю Е-центрів, створених попередньою радіаційною обробкою, і реалізований неоднорідним їх розподілом по об'єму внаслідок поглинання підкладкою лазерного випромінювання; 3) пряма трансформація де-

фектно-домішкових комплексів під дією лазерного випромінювання, яке в силу специфіки спектрального діапазону частково проникає до межі  $\text{Si}-\text{SiO}_2$ .

Таким чином, спостережувані зміни параметрів  $D_{it}$  та  $U_{\text{пор}}$  кремнієвих МДН-транзисторів під дією лазерного опромінення носять пороговий характер і суттєво залежать від попереднього рентгенівського опромінення, дефектно-домішкової природи міжфазної границі розділу та іонної «чистоти» підзатворного діелектрика  $\text{SiO}_2$ .

### Висновки

Досліджено вплив комбінованих рентгенівського та імпульсного лазерного ( $\lambda = 1,06$  мкм,  $\tau = 10^{-3}$ с) випромінювань на характеристики та параметри кремнієвих МДН-транзисторів з полікремнієвим затвором. Встановлено вплив такого виду обробки на поведінку кривих підпорогових струмів стоко-затворних характеристик, порогову напругу  $U_{\text{пор}}$  та густину електронних станів  $D_{it}$  на міжфазній границі  $\text{Si}-\text{SiO}_2$ . Отримані оптимальні значення густини енергії лазерного пучка, що забезпечують після обробки мінімальні значення параметрів  $D_{it}$  та  $U_{\text{пор}}$  кремнієвих МДН-транзисторів.

Вважається, що в процесі рентгенівського опромінення відбувається часткове звільнення додатніх іонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  з міжфазної границі  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  на пастки в об'ємі підзатворного діелектрика  $\text{SiO}_2$ . Наступна лазерна обробка супроводжується нейтралізацією додатнього заряду іонів  $\text{Si}^{3+}$  приграничного шару  $\text{SiO}_2$  до монокристалу  $\text{Si}$  за рахунок тунелювання електронів з підкладки, звільнених в процесі фотоіонізації.

Зміни параметрів  $D_{it}$  та  $U_{\text{пор}}$  кремнієвих МДН-транзисторів під дією лазерного опромінення носять пороговий характер і суттєво залежать від попереднього рентгенівського опромінення, дефектно-домішкової природи міжфазної границі розділу та іонної «чистоти» підзатворного діелектрика  $\text{SiO}_2$ .

### Список використаної літератури

1. Васильева И. В., Ефремов Г. А., Козловский В. В. и др. Радиационные процессы в технологии материалов и изделий электронной техники.-М.: Энергоатомиздат, 1997.-273с.

2. Вавилов В. С., Горин Б. М., Данилин Н. С. и др., Радиационные методы в твердотельной электронике. – М.: Радио и связь, 1990. – 184 с.
3. Готра З.Ю., Бобицький Я.В. Лазерні методи обробки в мікроелектроніці.- Л.; Світ, 1991. -166с.
4. Гнатюк В. А., Городниченко Е. С. Влияние импульсного лазерного излучения на морфологию и фотоэлектрические свойства кристаллов InSb// ФТП. – 2003.–Т.37,В.4. – С.414-418.
5. Емельянов В. И., Кашкарров П. К. Дефектообразование в приповерхностных слоях полупроводников при импульсном лазерном воздействии // Поверхность.Физика, химия, механика. – 1990. – №2. – С. 77 – 85.
6. Гороховатский Ю. А, Бордовский Г. А. Термоактивационная токовая спектроскопия высокоомных полупроводников и диэлектриков. – М.: Наука, 1991.– 341 с .
7. Коман В. Р., Galchynskyy O. V., Kovalyuk R. O. Alfa-particle irradiation induced defects in SiO<sub>2</sub> films of Si-SiO<sub>2</sub> structured // NIM **B**. – 1996. – №116. – P. 389 – 392.
8. 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.
9. 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.
10. Зу. С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 – х книгах. – 2 – е перераб. и доп. изд. – М.: Мир, 1984.
11. Коман Б. П. Вплив рентгенівського опромінення на кремнієві МДН-транзистори //Укр. фіз. жур. – 2000. – Т.45, №12. – С. 1440 – 1445.
12. Пат. 86018 Україна Н01L2 7Н01L21/26 Спосіб отримання кремнієвого МДН-транзистора. – Коман Б. П., Морозов Л. М.; – №2005 09623; заявл. 13.10.2005; опубл. 25.04.2007. Бюл. №2.
13. Козлов В. А., Козловский В. В. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и  $\alpha$ -частицами //ФТП. – 2001. – Т.35, В.7. – С. 769 – 795.
14. Вовк О. В., Лелеченко В. П., Солошенко В. И. и др. Влияние термообработки на параметры границы раздела структур Si – SiO<sub>2</sub> после радиационных воздействий//ФТП.– 1993. – Т. 27. – В.8. – С. 1349–1353.
15. Mrstik B. J., Rende R. W. Si-SiO<sub>2</sub> interface generation during x-ray irradiation and during post-irradiation exposure to a hydrogen ambient. // IEEE Trans. Nucl. Phys. –1991. – V.38, N 6. – P.1101–1107.
16. Бормонтов Е. Н., Левин М. Н., Кадменский Г. И. Влияние радиационного воздействия на характеристики МДП-транзистора. // Письма в ЖТФ.-2004.– – Т. 30, В. 9. – С. 73-81.
17. Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов А. В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. Энергоатомиздат, М., 256 с. (1988).
18. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. М.: Наука, 2010.-216с.
19. Литовченко В. Г., Горбань А. П. Основы физики микрорелектронных систем металл-диэлектрик-полупроводник. К.,Наукова думка, 1978.-326с.
20. Griscom D. L. Diffusion of radiolytic molecular hydrogen as a mechanism for the post-irradiation buildup of interface states in SiO<sub>2</sub> on Si structures. // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 58, N 7. – P.2524–2533.
21. Дмитриев С. Г., Маркин Ю. В. Проявление процесса денейтрализации подвижного заряда в SiO<sub>2</sub> при спектроскопии границы раздела кремний-окисел // ФТП.– 1998. – Т. 32. – В.12.– – С. 1445–1449 .
22. Дмитриев С. Г., Маркин Ю. В. Аномальный эффект Шотки на границе раздела полупроводник-диэлектрик. // ФТП. – 1996. – Т.30. – В.7. – С. 1231–1234 .