

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

На правах рукопису

УДК 537.222.2; 537.311; 621.315

КІЛЬЧИЦЬКА ВАЛЕРІЯ ІГОРІВНА

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА
РАДІАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ В СТРУКТУРАХ
КРЕМНІЮ-НА-ІЗОЛЯТОРІ**

(01.04.10 - фізика напівпровідників та діелектриків)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ - 1997

№. 38. 399

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті фізики напівпровідників НАН України, м.Київ

Науковий керівник: - доктор фізико-математичних наук,
проф. наук. співробітник Назаров Олексій Микола

Офіційні опоненти: - доктор фізико-математичних наук,
зав. лабораторією Ширшов Юрій Михайлович
- доктор фізико-математичних наук,
професор Жаркіх Юрій Серафімович

Провідна організація: Інститут фізики НАН України, м.Київ

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00751107 (L)

Захист відбудеться "22" вересня 1997 р. о 16⁰⁰ в ауд. № 46 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д01.01.17 в Київському університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 252127, Київ-127, пр. Глушкова 6, радіофізичний факультет.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці Київського університету імені Тараса Шевченка (м. Київ, вул. Володимирська 58).

Відгуки на автореферат у двох примірниках, засвідчені печаткою, прохання надсилати на ім'я вченого секретаря спеціалізованої ради за адресою: 252033, м. Київ-33, вул. Володимирська 64, Київський університет імені Тараса Шевченка, радіофізичний факультет.

Автореферат розісланий "29" липня 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, доцент

А.Г. Шкавро

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тенденція сучасної мікроелектроніки до створення схем великої інтеграції, які б мали високу швидкість та були надійними при роботі в жорстких температурних та радіаційних умовах, обумовила розвиток у всьому світі в останні роки технології кремнію-на-ізоляторі (КНІ). Головні переваги технології КНІ порівняно з традиційною КМОН технологією пов'язані з повною діелектричною ізоляцією елементів одне від одного.

Для створення приладів та інтегральних схем на основі КНІ структур, покращення їх параметрів необхідно знати електрофізичні характеристики півки кремнію та меж поділу Si-діелектрик. В той же час, незважаючи на численні дослідження в цьому напрямку, властивості КНІ структур вивчені не досить повно, особливо це стосується вітчизняної технології створення КНІ структур. Одна з основних проблем, яка виникає при роботі з КНІ структурами, полягає в існуванні двох меж поділу півка Si - діелектрик, між якими при певних умовах виникає зарядовий зв'язок. В зв'язку з цим застосування традиційних методів для дослідження КНІ структур потребує суттєвої методичної доробки. Крім того, в наслідок існування зарядового зв'язку між межами, на всі параметри робочих приладів впливає стан меж півка - внутрішній діелектрик та заряд у внутрішньому діелектрику. Тому для КНІ систем дуже важливо контролювати якість внутрішнього діелектрика та його межі з півкою.

Незважаючи на підвищену стійкість КНІ приладів до імпульсного іонізуючого впливу, вони дуже чутливі до повної накопиченої дози опромінення, внаслідок того, що кремнієва півка в них з усіх боків оточена шарами діелектрика (затворний діелектрик, внутрішній діелектрик, бокова ізоляція). Найбільш важливою проблемою, притаманною саме КНІ системам, є створення радіаційно-стійкого внутрішнього діелектрика. Тому дуже важливою є задача, яка полягає в розвитку техно-

логічних методів зменшення накопичення радіаційно-індуцированого позитивного заряду у внутрішньому діелектрику КНІ структур.

Одне з найбільш ефективних рішень цієї проблеми полягає в створенні внутрішніх нітридних чи оксинітридних шарів. Однак, найбільш широко розвинутий в світі метод створення КНІ структур - метод іонного синтезу, незважаючи на численні дослідження в цьому напрямку, до цього часу не дозволяє отримати якісну кремнієву плівку на нітридному діелектрику. Метод зонної лазерної перекристалізації полікремнію є вельми перспективним для створення КНІ структур з багат шаровими внутрішніми діелектриками, оскільки потенційно дозволяє проводити перекристалізацію на різних діелектричних шарах, та й до того ж є найдешевшим з існуючих методів.

Мета та завдання роботи. Головною метою роботи є комплексне дослідження електрофізичних характеристик КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію, вивчення впливу іонізуючого опромінення на електричні характеристики КНІ структур і приладів та розробка можливих методів збільшення радіаційної стійкості внутрішнього діелектрика.

У відповідності до поставленої мети досліджень в роботі розв'язувались такі завдання:

1. Адаптація існуючих електрофізичних методів для дослідження КНІ структур.
2. Дослідження електрофізичних характеристик КНІ структур, отриманих методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію та елементів ІС на їх основі, а також вивчення впливу на них γ -опромінення.
3. Дослідження можливості використання ВЧ плазмової обробки для підвищення радіаційної стійкості товстих внутрішніх діелектриків КНІ структур.
4. Дослідження можливості створення методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію КНІ структур з багат шаровими

внутрішніми діелектриками з прошарками нітриду та оксинітриду задля підвищення радіаційної стійкості.

5. Дослідження особливостей процесів накопичення радіаційно-індуцированого заряду у внутрішніх багатошарових діелектриках КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації, та порівняння їх з процесами накопичення в окисних внутрішніх діелектриках КНІ структур, отриманих як за допомогою метода перекристалізації полікремнію, так і методом іонного синтезу.

Наукова новизна роботи.

1. Вперше за допомогою комбінації методів термостимульованої поляризації та вольт-фарадних характеристик було досліджено процеси термопольової міграції заряду у внутрішніх діелектричних шарах КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію. Показано, що позитивний заряд у внутрішньому діелектрику початково локалізований біля обох меж поділу, а енергії міграції заряду відповідають енергіям міграції іонів лужних металів.

2. Вперше проведені дослідження впливу ВЧ плазмової обробки на КНІ мезаструктури. Показано, що обробка в ВЧ плазмовому розряді дозволяє суттєво збільшити радіаційну стійкість внутрішніх діелектриків таких структур та меж поділу Si-SiO₂.

3. Вперше досліджено електрофізичні характеристики КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію, з багатошаровими внутрішніми діелектриками типу SiO₂-Si₃N₄-SiO₂. Виявлено, що під час перекристалізації полікремнію відбувається перерозподіл азоту та кисню, який залежить від технології створення шарів внутрішнього діелектрика, що супроводжується зміною електрофізичних властивостей кінцевої структури. Встановлено, що використання термічного окислення нітриду для створення прошарку SiO₂ дає змогу створити КНІ структури з багатошаровими внутрішніми діелектриками з хорошими електричними властивостями кремнієвої плівки та меж поділу плівка-діелектрик.

4. Вперше досліджені особливості накопичення радіаційно-індуцированого заряду в багатошарових внутрішніх діелектриках КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації, та проаналізовані фізичні процеси, які призводять до значного збільшення радіаційної стійкості КНІ структур з багатошаровими внутрішніми діелектриками порівняно з КНІ структурами з одношаровим внутрішнім SiO_2 , отриманими як методом зонної лазерної перекристалізації, так і методом іонного синтезу.

Практична цінність роботи.

1. Запропоновано метод дослідження електричних властивостей внутрішнього діелектрика КНІ структур, який базується на комбінації методів термостимульованої поляризації/деполяризації та вольт-фарадних характеристик. Така комбінація методів дозволяє визначити повний заряд у внутрішньому діелектрику, його центроїд та зміну цих величин при термоциклованні та опроміненні, виділити рухливий та фіксований заряди, визначити енергетичний спектр пасток у внутрішньому діелектрику, а також зробити висновок про обмін заряду через межі поділу діелектрик-напівпровідник. Метод може бути використаний при розробці приладів на основі КНІ структур.
2. Результати дослідження електричних властивостей КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію, можуть бути використані для оптимізації технології та конструкції КМОН ІС на основі КНІ структур.
3. Результати досліджень КНІ структур з багатошаровим внутрішнім діелектриком $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ можуть бути використані для створення ІС та датчиків, спроможних працювати в умовах жорстких радіаційних потоків, що необхідно для приладів військової електроніки та космічної техніки, а також для пристроїв, які працюють на атомних станціях.
4. Використання метода ВЧ плазмової обробки на кінцевій стадії виготовлення приладів на основі КНІ структур є перспективним для підвищення радіаційної стійкості внутрішнього окисного діелектрика.

Положення, які виносяться на захист.

1. Комбінація методів термостимульованої поляризації/деполяризації та вольт-фарадних характеристик для дослідження КНІ структур дозволяє додатково до енергетичного спектру пасток у внутрішньому діелектрику і параметрів меж поділу, визначати величину повного заряду у внутрішньому діелектрику, його центроїд та їх зміну при термопольовому циклюванні та радіаційних впливах, розділяти рухливий та фіксований заряди, а також досліджувати процеси обміну носіями заряду між напівпровідником та діелектриком.
2. ВЧ плазмова обробка КНІ структур значно послаблює накопичення позитивного заряду у внутрішніх шарах SiO_2 та утворення поверхневих станів в таких структурах при опроміненні.
3. Високотемпературний процес лазерної зонної перекристалізації КНІ структур з внутрішнім діелектриком типу $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ супроводжується значним перерозподілом азоту та кисню в структурі, який залежить від технології створення шарів внутрішнього діелектрика, що суттєво впливає на електрофізичні властивості кінцевої КНІ структури.
4. При створенні методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію КНІ структур з багат шаровими внутрішніми діелектриками використання термічного окислення нітриду кремнію для отримання прошарку SiO_2 між кремнієвою плівкою та нітридом дає змогу створювати КНІ структури, які не поступаються за своїми електрофізичними властивостями структурам з внутрішнім одношаровим SiO_2 і значно перевищують їх по радіаційній стійкості.
5. Введення нітридного прошарку у внутрішній діелектрик КНІ структур зсуває центроїд радіаційно-індуцированого позитивного заряду від межі внутрішній діелектрик - плівка вглиб діелектрика та зменшує величину накопиченого під час γ -опромінення заряду, що обумовлює більшу радіаційну стійкість таких структур порівняно з КНІ структурами з одношаровим внутрішнім SiO_2 , створеними як методом зонної лазерної перекристалізації, так і методом іонного синтезу.

Ступінь достовірності. Достовірність отриманих результатів забезпечується використанням надійних методик вольт-амперних, вольт-фарадних характеристик, термостимульованої поляризації/деполяризації, які широко застосовуються для дослідження електрофізичних властивостей напівпровідників та діелектриків. Крім того, проводилось порівняння результатів, отриманих за допомогою різних методик. Було проведено експерименти на зразках, які отримані за допомогою різних технологій та які відрізнялись типом і концентрацією легуючої домішки в кремнієвій плівці, товщиною внутрішнього діелектрика, кремнієвої плівки та затворного діелектрика.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на IV Міжнародній конференції “Фізика та технологія тонких плівок” (Івано-Франківськ, 1993); Material Research Society Meeting (Boston, USA, 1993); III Міжреспубліканському науково-технічному семінарі “Фізико-технологічні проблеми створення КНІ структур та елементів електронної техніки на їх основі” (Львів, 1993); International Symposium on trends and new applications in thin films (Dresden, Germany, 1994); 16th and 17th International symposium of Electrochemical Society on Silicon-on-Insulator technology and devices (San-Francisco, USA, 1994; Los-Angeles, USA, 1996); NATO Advanced Research Workshop “Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices” (Gurzuf, Crimea, Ukraine, 1994); 1-ой Всеросийской конференции по материаловедению и физико-химическим основам технологий создания легированных кристаллов кремния (Кремний-96) (Москва, Россия, 1996).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 10 роботах, перелік яких наведено в кінці автореферату. Всі роботи написані у співавторстві.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох глав, висновків та переліку цитованої літератури з 117 найменувань. Вона викладена на 136 сторінках, які містять друкований текст, 39 малюнків, 12 таблиць.

Особистий внесок автора. В дисертаційній роботі узагальнені результати досліджень, виконаних особисто автором, в межах завдань, сформульованих науковим керівником. Безпосередньо автором проведено аналіз літературних джерел, підготовка експериментів, вимірювання електрофізичних характеристик КНІ структур, обробка та аналіз отриманих результатів. Автор приймав участь в інтерпретації отриманих результатів та підготовці робіт до друку.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета та завдання роботи, наукова новизна, практична цінність та положення, які виносяться на захист. Дано стислий зміст роботи по главам.

Перша глава дисертації присвячена огляду літературних джерел, в яких розглядалися проблеми кремнію-на-ізоляторі. Відмічені переваги використання КНІ структур для створення стійких до зовнішніх впливів швидкодіючих ІС. Коротко розглянуті основні методи створення таких структур. Проаналізовані переваги та недоліки кожного з методів, а також області застосування КНІ структур, отриманих різними методами. Підкреслюється, що метод зонної лазерної перекристалізації полікремнію найбільш доцільний для створення порівняно дешевих радіаційно-стійких інтегральних схем.

Далі розглянуто вплив іонізуючого опромінення на КНІ структури та елементи ІС на їх основі. Описано вплив імпульсного опромінення та повної накопиченої дози опромінення на роботу КНІ МДН-приладів. Відмічено, що КНІ прилади дуже чутливі до повної накопиченої дози внаслідок того, що робоча плівка в них з усіх боків оточена діелектриком. Коротко описано методи створення радіаційно-стійких КНІ МДН-транзисторів, основна увага приділена проблемі створення радіаційно-стійкого внутрішнього діелектрика.

На основі аналізу літературних даних сформульовані основна мета та завдання роботи.

У другій главі розглянуті електричні характеристики КНІ систем і приладів на їх основі, а також описані електрофізичні методи дослідження КНІ структур. Основною проблемою при визначенні електричних параметрів тонкоплівкових КНІ структур за допомогою традиційних методів є існування зарядового зв'язку між межами плівка-внутрішній діелектрик та плівка - затворний діелектрик.

В розділі 2.2 на основі літературних даних ретельно проаналізовані вольт-амперні характеристики (ВАХ) КНІ МДН-транзисторів. Всі характеристики КНІ транзисторів (порогова напруга, ВАХ, крутизна та обернений підпороговий нахил) дуже чутливі до стану межі плівка-внутрішній діелектрик.

В розділі 2.3.1 описані особливості вольт-фарадних характеристик (ВФХ) КНІ мезаструктур. У випадку структур напівпровідник - діелектрик - напівпровідник (НДН) використання цієї методики ускладнюється. Повна вимірювальна ємність НДН варактора являє собою послідовне з'єднання трьох ємностей: ємність внутрішнього діелектрика, ємність плівки та ємність підкладки. В розділі проаналізовані вольт-фарадні характеристики НДН структур з різними типами легування плівки та підкладки. При наявності позитивного заряду у внутрішньому діелектрику можна розділити вплив меж плівка - внутрішній діелектрик та підкладка - внутрішній діелектрик на вольт-фарадну характеристику НДН структур. Однак, найбільш просто це здійснити у випадку p-типу легування як плівки, так і підкладки, тому що в цьому випадку при зміні потенціалу однієї межі від збагачення до інверсії протилежна межа знаходиться у стані збагачення і не впливає на ВЧ ВФХ, тоді як в інших випадках необхідно враховувати те, що протилежна межа знаходиться в інверсії і дає вклад в вимірювану ємність. Вимірювання вольт-фарадних характеристик КНІ НДН варакторів дозволяє визначити: тип та концентрацію легування плівки та підкладки, товщину внутрішнього діелектрика, заряди на межах поділу плівка-внутрішній діелектрик та підкладка - внутрішній діелектрик. Запропо-

новано метод визначення величини повного заряду у внутрішньому діелектрику та його центроїда за допомогою величин напруг “плоских зон” обох меж:

$$Q_d = \frac{C_d}{q \cdot S} \cdot [V_{FB1} - V_{FB2}], \quad X_0 = \frac{L \cdot V_{FB2}}{V_{FB1} - V_{FB2}},$$

де Q_d - повний заряд у внутрішньому діелектрику, C_d - ємність внутрішнього діелектрика, q - заряд електрона, S - площа металевого електрода, V_{FB1} , V_{FB2} - напруги “плоских зон” меж діелектрик - плівка та діелектрик - підкладка, відповідно, L - товщина внутрішнього діелектрика, X_0 - центроїд позитивного заряду у внутрішньому діелектрику відносно межі діелектрик-плівка.

Оскільки електричні параметри КНІ приладів залежать від стану межі плівка Si - внутрішній діелектрик та заряду у внутрішньому діелектрику, то для КНІ систем дуже важливо контролювати якість внутрішнього діелектрика. У розділі 2.3.3 пропонується використовувати для дослідження внутрішнього діелектрика КНІ структур комбінацію методів термостимульованої поляризації/деполяризації (ТСП/ТСД) та вольт-фарадних характеристик. Використання такої комбінації методів дозволяє найбільш повно проаналізувати електричні властивості внутрішнього діелектрика, а саме: визначити зміну величини повного заряду у внутрішньому діелектрику та його центроїда при термоциклюванні, виділити рухливий та фіксований заряди, визначити енергії активації процесів у внутрішньому діелектрику, а також проаналізувати процеси обміну заряду між діелектриком та напівпровідником.

В розділі 2.4 представлені результати досліджень переносу заряду у внутрішніх окисних шарах КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію, за допомогою методів ВФХ та ТСП/ТСД. Вигляд спектрів ТСП та ТСД визначається полярністю прикладеної напруги та не залежить від послідовності прикладення напруги різної полярності. Це свідчить про те, що заряд у внутрішньому

діелектрику КНІ структур початково локалізован біля обох меж діелектрик-напівпровідник, на відміну від структур Al-SiO₂-Si, в яких рухливий заряд майже завжди локалізован біля межі Al-SiO₂. Визначені енергії активації міграції заряду у внутрішньому окисному діелектрику 0.9 та 1.5 еВ відповідають енергіям міграції іонів лужних металів.

Третя глава присвячена дослідженню електрофізичних параметрів КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію, з внутрішнім окисним діелектриком та дослідженню вплива іонізуючого опромінення на ці структури.

Внутрішній окис в досліджених структурах мав товщину 1 мкм та був отриман за допомогою термічного окислення. Досліджені КНІ транзистори були виготовлені за КМОН КНС технологією із урахуванням деяких конструктивно-технологічних рекомендацій по підвищенню радіаційної стійкості елементів ІС. Зокрема з метою запобігання утворення радіаційно-індуцированого каналу провідності на нижній межі плівка - внутрішній діелектрик в n-канальних елементах проводилась додаткова глибока імплантація іонів В⁺, яка формувала різко неоднорідний профіль легування з максимумом концентрації легуючої домішки на нижній межі плівки. Додаткове легування забезпечувало високу порогову напругу паразитного n-канального транзистора (~ 45 В) та низьку порогову напругу робочого транзистора (~ 1В). Величини оберненого підпорогового нахилу вольт-амперних характеристик КНІ МДН-транзисторів (80 мВ/декаду) та величини рухливості електронів (~ 650 см²/В·с) та дірок (~ 250 см²/В·с) в каналі порівняні з відповідними величинами в аналогічних структурах на об'ємному кремнії. Близькі величини рухливості в плівках КНІ та в об'ємному кремнії свідчать про те, що малокутові межі, які є основними дефектами в цих плівках, не впливають на процеси перенесення основних носіїв заряду.

В розділі 3.3 представлено результати досліджень впливу γ -опромінення на електрофізичні параметри КНІ МДН-транзисторів. Зсув по-

рогової напруги КНІ транзисторів, обумовлений накопиченням позитивного заряду в затворному діелектрику, не перевищував 0.15 В як в п-, так і в р-канальних транзисторах. Зміна оберненого підпорогового нахилу характеристик, яка обумовлена генерацією поверхневих станів (ПС), була незначна (менше 25% при дозах 10^6 рад (Si)). Зменшення величин рухливості носіїв заряду в каналі не перевищувало 20% при дозах 10^6 рад (Si). Однак, в п-канальних транзисторах окрім незначного зсуву ВАХ в бік від'ємних напруг при дозах 10^6 рад (Si) з'являвся значний підпороговий струм витоку, викликаний утворенням інверсійного каналу біля нижньої межі плівка Si - внутрішній SiO₂ за рахунок накопичення позитивного заряду в товстому внутрішньому окисі. Це підтвердилось дослідженнями ВАХ паразитних транзисторів, для яких внутрішній діелектрик служить затворним, а напруга прикладається до підкладки. Значне накопичення позитивного заряду у внутрішньому діелектрику призводило до зсуву порогової напруги паразитного транзистора до 40 В. Таким чином, основним фактором, який обмежує стійкість КНІ МДН-транзисторів до повної накопиченої дози опромінення, є значне накопичення позитивного заряду у внутрішньому окисі, яке незважаючи на додаткове глибоке легування п-канальних транзисторів, викликало появу в них значних струмів витоку (до 10^{-4} А) по нижньому каналу при дозах опромінення $\sim 10^6$ рад (Si).

Оскільки основним фактором, який обмежує стійкість КНІ структур до повної дози опромінення, є накопичення позитивного заряду у внутрішньому діелектрику, то виникає задача дослідити можливі методи зменшення цього накопичення. В розділі 3.4 запропоновано використовувати для цього низькотемпературну ВЧ плазмову обробку. Оскільки при ВЧ плазмовій обробці водень може відігравати суттєву роль у відпалі заряду, а нанесення полікремнію, як відомо, вповільнює його дифузію, то при ВЧ плазмовій обробці використовувався додатковий підігрів для збільшення дифузійної здатності водню. Показано, що ВЧ плазмова обробка з потужністю 1.6 Вт/см² в середовищі N₂+H₂

з підігрівом до 200°C дозволяла значно зменшити напруги “плоских зон” в таких структурах (з -22 до -2 В).

Зменшення позитивного заряду в діелектрику при ВЧ плазмовій обробці може бути пов'язано як з нейтралізацією електрично активних дефектів атомарним воднем з утворенням зв'язків Si-H та Si-OH, так і з упорядкуванням структури діелектрика із зменшенням напружених та обірваних зв'язків. У випадку простого насичення SiO₂ воднем структура дійсно буде мати малий позитивний заряд в окисі і концентрацію поверхневих станів, однак наступне опромінення призводить до розриву зв'язків Si-H та Si-OH і ефективного встроювання дефектів в SiO₂ та утворення ПС на межі Si-SiO₂. У випадку упорядкування аморфної сітки SiO₂ повинно спостерігатися зменшене накопичення позитивного заряду і утворення поверхневих станів при опроміненні.

Дослідження впливу опромінення на попередньо оброблені в ВЧ плазмі структури, показали, що така обробка дозволяє значно послабити накопичення заряду в окисі, а також зменшити викликане опроміненням утворення поверхневих станів. Таким чином, ВЧ плазмова обробка призводить не стільки до нейтралізації електрично активних дефектів, скільки до упорядкування структури SiO₂ та межі поділу, що і зумовлює більшу радіаційну стійкість внутрішніх окисних шарів КНІ структур, попередньо оброблених в ВЧ плазмі.

В четвертій главі представлені результати досліджень електрофізичних характеристик КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію, в яких задля підвищення радіаційної стійкості як внутрішній діелектрик використовувалась багат шарова система з прошарками нітриду та оксинітриду. Також було проведено порівняння електричних параметрів таких структур із параметрами структур з внутрішнім окисним діелектриком. Тонкий верхній шар SiO₂ в багатшаровій діелектричній системі SiO₂-Si₃N₄-SiO₂, необхідний для забезпечення якісної межі півка - внутрішній діелектрик,

було отримано двома методами: окислення під тиском та термічним окисленням нітриду кремнію.

Дослідження вольт-амперних характеристик КНІ МДН-транзисторів з різними внутрішніми діелектриками, в яких тонкий верхній окис (150\AA) було отримано за допомогою окислення під тиском, показали, що порогові напруги транзисторів з багатошаровими внутрішніми діелектриками та з окисним внутрішнім діелектриком близькі між собою та не перевищують -1 В (для р-канальних транзисторів). Густина ПС на межі плівка - затворний діелектрик, розрахована по величині оберненого підпорогового нахилу ВАХ, трохи більше для структур з багатошаровими внутрішніми діелектриками. Рухливості дірок в каналі незначно відрізнялись для структур з різними внутрішніми діелектриками та складала $300\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для структур з внутрішнім SiO_2 , $280\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ для структур з прошарком нітриду у внутрішньому діелектрику. Таким чином, отримані результати демонструють можливість створення КНІ структур з багатошаровими внутрішніми діелектриками, які за своїми електрофізичними властивостями зрівняні з КНІ структурами з внутрішнім окисом.

Однак, виміри вольт-фарадних характеристик КНІ мезаваракторів показали присутність значного позитивного заряду в таких багатошарових внутрішніх діелектриках. Було висунуто гіпотезу, що цей ефект пов'язан із трансформацією багатошарових діелектриків, яка відбувається під час перекристалізації, що підтверджується дослідженням хімічного складу цих діелектриків до і після перекристалізації за допомогою метода вторинної іонної мас спектрометрії (ВІМС). Порівняльний аналіз цих спектрів свідчить про те, що під час високотемпературної перекристалізації відбувається перерозподіл азоту та кисню в багатошаровому діелектрику, що призводить до повної трансформації тонкого верхнього шару окису, отриманого в реакторі зниженого тиску, в оксинітрид. Тому, щоб запобігти такій трансформації тонкого верхнього шару окису, оптимізувалась технологія його створення. Спек-

три ВІМС внутрішніх багатошарових діелектриків, в яких верхній шар окису було отримано за допомогою окислення нітриду кремнію, показали, що хоча після процесу перекристалізації і спостерігається деяке проникнення кисню в нітридний шар та атомів азоту в товстий нижній окис, однак, зберігається чітко виражений тонкий верхній шар SiO_2 . Величини повного заряду в такому внутрішньому діелектрику, розраховані з ВФХ КНІ варакторів, зрівняні з величинами, які спостерігаються у внутрішньому одношаровому SiO_2 .

Аналіз накопичення радіаційно-індуцированого заряду в багатошарових внутрішніх діелектриках $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ (0.2-0.15-0.05 мкм) КНІ структур проводився в діапазоні доз від 10^4 до $5 \cdot 10^6$ рад (Si). Крім того, було проведено порівняння з процесами накопичення заряду у внутрішніх окисних діелектриках КНІ структур, створених як методом зонної лазерної перекристалізації, так і методом іонного синтезу. Повний накопичений позитивний заряд був значно менше у випадку структур з нітридним прошарком (в 3.5 раза при напрузі на підкладці 9.6 В). Крім того, введення нітридного шару у внутрішній діелектрик зсувало центроїд радіаційно-індуцированого заряду від межі Si-SiO_2 вглиб діелектрика. Слід також зауважити, що внутрішні окисні шари, отримані різними методами, мають близькі величини накопиченого заряду, його центроїда та однаково залежність цих величин від прикладеної під час опромінення напруги, незважаючи на суттєву різницю в технології їх створення.

Послаблене накопичення позитивного заряду у внутрішньому діелектрику та його локалізація далі від межі з плівкою призвели до того, що зсув порогової напруги паразитних транзисторів в таких структурах був в 4 рази менший, ніж в структурах з внутрішнім SiO_2 . Крім того, на відміну від структур з внутрішнім окисом, в структурах з багатошаровими внутрішніми діелектриками не спостерігалось будь-яке помітне збільшення густини поверхневих станів, викликане опромі-

ненням, що найбільш ймовірно пов'язано з блокуючими властивостями шару нітриду для пересування дірок та водню.

Зменшення накопиченого радіаційно-індуцированого позитивного заряду в шарах $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ при малих дозах опромінення пояснюється наявністю електронних пасток в нітридному шарі чи на межі $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$, які частково компенсують заряд дірок, що підтверджувалось дослідженнями ВФХ КНІ варакторів. При значних дозах опромінення та низьких зовнішніх полях, які використовувались в даній роботі, зсув порогової напруги транзисторів перевищував напругу, прикладену до підкладки під час опромінення, що свідчить про те, що при таких умовах головну роль в накопиченні заряду відіграє електричне поле об'ємного заряду, створеного опроміненням. Сумарне поле в обох діелектриках, розраховане за допомогою експериментальних значень повного заряду та його центроїда, на кілька порядків менше зовнішнього поля. Тобто відбувається майже повна компенсація електричного поля в діелектрику і процес накопичення заряду насичується, а величина радіаційно-індуцированого заряду в обох діелектриках близька до критичної. Показано, що переміщення при цьому центроїда заряду вглиб діелектрика, яке відбувається при заміні окисного внутрішнього діелектрика на багат шаровий, знижує величину критичного радіаційно-індуцированого заряду. Цим і зумовлено зменшене накопичення заряду в багат шарових діелектриках порівняно з одношаровим окисом при опроміненні високими дозами.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Показано, що аналіз вольт-фарадних характеристик КНІ мезаструктур дає змогу визначати не тільки тип та концентрацію легування плівки та підкладки, величини заряду біля обох меж діелектрик-напівпровідник, товщину внутрішнього діелектрика, а й величину повного заряду у внутрішньому діелектрику, його центроїд та зміну цих величин при термопольових та радіаційних впливах.

2. Запропоноване використання комбінації методів вольт-фарадних характеристик та термополяризації для дослідження внутрішніх діелектриків КНІ структур дозволяє визначити зміну величини повного заряду та його центроїда у внутрішньому діелектрику при термопольовому циклюванні, енергії активації процесів в діелектрику, розділити рухливий та фіксований заряди, а також зробити висновок про обмін заряду через межі поділу.
3. Внутрішні окисні діелектрики КНІ структур, створених методом зонної лазерної перекристалізації, мають енергії міграції позитивного заряду, які відповідають енергіям міграції іонів лужних металів (натрію та калію), однак рухливий заряд в них початково локалізований біля обох меж поділу діелектрик-напівпровідник.
4. Традиційно використовується для запобігання появи радіаційно-індуцированого струму витоку біля нижньої межі кремнієвої плівки, метод додаткового глибокого легування іонами V^+ не є ефективним для КНІ структур з товстим окисним внутрішнім діелектриком та при великих дозах опромінення.
5. Обробка в ВЧ плазмі КНІ структур дозволяє значно послабити накопичення радіаційно-індуцированого позитивного заряду у внутрішніх окисних діелектриках та утворення поверхневих станів, що свідчить про значне упорядкування їх структури.
6. На основі досліджень хімічного складу внутрішніх багатошарових діелектриків до і після перекристалізації встановлено, що в процесі високотемпературної перекристалізації відбувається перетворення тонкого верхнього шару SiO_2 , отриманого в реакторі зниженого тиску, в оксинітрид, що призводить до деградації електричних властивостей КНІ структур. Використання термічного окислення нітриду дозволяє створити тонкий верхній шар SiO_2 , який зберігається під час перекристалізації.
7. Вперше показано, що метод зонної лазерної перекристалізації при оптимізації технології створення багатошарового внутрішнього діелек-

трика типу $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ дозволяє отримувати КНІ структури з електрично якісними кремнієвою плівкою та межами поділу плівка-діелектрик.

8. Вперше продемонстровано, що КНІ структури з багатошаровими внутрішніми діелектриками, створеними методом зонної лазерної перекристалізації, мають більшу радіаційну стійкість, ніж КНІ структури з внутрішнім одношаровим SiO_2 .

9. Показано, що введення нітридного шару у внутрішній діелектрик зсуває центроїд радіаційно-індуцированого позитивного заряду далі від межі плівка - внутрішній діелектрик вглиб діелектрика та суттєво зменшує повну величину накопиченого позитивного заряду у внутрішньому діелектрику, порівняно із внутрішніми одношаровими окисними діелектриками КНІ структур, отриманими як методом іонного синтезу, так і методом зонної лазерної перекристалізації полікремнію. В структурах з багатошаровими внутрішніми діелектриками, на відміну від структур з одношаровим окисом, не спостерігається збільшення густини поверхневих станів, викликане опроміненням, що пов'язано із блокуванням нітридним шаром пересування дірок та водню.

10. Зменшення накопичення позитивного заряду під час опромінення в багатошарових внутрішніх діелектриках порівняно з одношаровим SiO_2 пояснюється як наявністю електронних пасток в нітридному шарі та на межі $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ (особливо при малих дозах опромінення $\sim 10^4$ рад (Si)), так і зміною умов формування об'ємного заряду (при високих дозах опромінення). Сумісно з переміщенням центроїда захопленого заряду вглиб діелектрика це обумовлює значне підвищення радіаційної стійкості КНІ транзисторів.

Основні результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Руденко Т.Е., Руденко А.Н., Назаров А.Н., Лысенко В.С., Кильчицкая В.И. Электрофизические свойства ZMR КНИ структур: методы исследования и экспериментальные результаты // Микроэлектроника. - 1994. - Т.23. - вып.6. - с.18-31.

2. Nazarov A.N., Lysenko V.S., Gusev V.A., Kilchitskaya V.I. C-V and thermally activated investigations of ZMR SOI meza structures // SOI technology and devices / ed. by S. Cristoloveanu. - Procced. of 16 Intern. Symp. - 1994. - V.94-11. - p.236-244.
3. Назаров А.Н., Лысенко В.С., Михайлов С.Н., Ткаченко А.С., Павлюк М.И., Молостов А.Н., Кильчицкая В.И. Влияние ВЧ плазменной обработки на перенос и накопление заряда в слоях двуоксида кремния структур Al-полиSi-SiO₂-Si // Микроэлектроника. - 1994. - Т.23. - вып.3. - с.39-46.
4. Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е., Руденко А.Н., Кильчицкая В.И., Гиваргизов Е.И., Лиманов А.Б. Свойства КНИ структур, полученных методом лазерной зонной перекристаллизации поликремния на многослойных диэлектриках // Микроэлектроника. 1994. - Т.23. - вып.6. - с.32-38.
5. Lysenko V.S., Nazarov A.N., Rudenko T.E., Rudenko A.N., Kilchitskaya V.I., Givargizov E.I., Limanov A.B. Properties of SOI MOSFETs obtained on multilayer buried dielectrics // SOI technology and devices / ed. by S. Cristoloveanu. - Procced. of 16 Intern. Symp. - 1994. - V.94-11. - p.324-332.
6. Barchuk I.P., Kilchitskaya V.I., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Rudenko T.E., Djurenko S.V., Rudenko A.N., Yurchenko A.P. Effect of ionizing irradiation on the charge buildup in multilayer buried dielectrics of SOI structures // SOI technology and devices / ed. by P.L.F. Hemment. - Procced. of 17 Intern. Symp. - 1996. - V.96-3. - p.292-301.
7. Барчук И.П., Вовк Я.Н., Кильчицкая В.И., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е. и др. Исследование воздействия ионизирующего излучения на электрофизические свойства внутренних многослойных диэлектриков КНИ структур, полученных методом лазерной зонной перекристаллизации // Микроэлектроника. - 1996. - Т.25. - вып.5. - с.346-353.

8. Назаров А.Н., Михайлов С.Н., Лысенко В.С., Ткаченко А.С., Кильчицкая В.И. Влияние ВЧ плазменной обработки на процессы переноса заряда и дефектообразование в пленках двуокси кремния // Физика и технология тонких пленок / Материалы IV Международной конф. - Ивано-Франковск. - 1993. - ч.2. - с.321.
9. Djurenko S.V., Kilchitskaya V.I., Lysenko V.S., Nazarov A.N., Rudenko A.N., Rudenko T.E., Yurchenko A.P. Physical properties of ZMR SOI materials with multilayered buried dielectrics // Physical and Technical Problems of SOI structures and Devices / Workshop Abstract. - Ukraine. - 1994. - p.67-68.
10. Барчук И.П., Вовк Я.Н., Кильчицкая В.И., Лысенко В.С., Назаров А.Н., Руденко Т.Е. и др. Свойства тонкопленочных систем КНИ с многослойными скрытыми диэлектрическими слоями // Тезисы докладов 1-ой Всероссийской конф. по материаловедению и физико-химическим основам технологий получения легированных кристаллов кремния (Кремний-96). - Москва. - 1996.

SUMMARY

Kilchitska V.I. "Investigations of electrical properties and radiation effect in silicon-on-insulator". Thesis (manuscript) applied for a degree of Candidate of Science in Physics and Mathematics. Speciality 01.04.10 - semiconductor and dielectric physics. Kyiv University after Taras Shevchenko, Kyiv, 1997.

The results of investigations of electrical parameters of SOI structures fabricated by ZMR technique and effects of ionizing radiation published in 10 papers are summarized. For the first time, it has been shown, that RF plasma treatment of SOI structures significantly decreases positive charge buildup and surface state density in such structures under irradiation. It was found that optimization of the preparation processes of the initial buried dielectric layers provides ZMR SOI-structures with multilayer buried isolation $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ which are characterized by high quality of both Si film and interfaces. It was found out that introduction of nitride layer into

the buried oxide shifts radiation-induced charge centroid from Si-SiO₂ interfaces deep into insulator and essentially decreases the total radiation-induced positive charge density.

АННОТАЦІЯ

Кильчицкая В.И. "Исследование электрофизических свойств и радиационных эффектов в структурах кремния-на-изоляторе". Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 - физика полупроводников и диэлектриков. Киевский университет имени Тараса Шевченка, Киев, 1997.

Защищается 10 научных работ, в которых представлены результаты исследования электрофизических параметров КНИ структур, созданных методом зонной лазерной перекристаллизации поликремния, и влияние на них ионизирующего облучения. Впервые показано, что ВЧ плазменная обработка КНИ структур значительно ослабляет накопление положительного заряда во внутреннем окисном слое и образование поверхностных состояний на границе в таких структурах при γ -облучении. Установлено, что оптимизация процесса создания слоев многослойного внутреннего диэлектрика позволяет с помощью метода зонной лазерной перекристаллизации создавать КНИ структуры с многослойными внутренними диэлектриками SiO₂-Si₃N₄-SiO₂, не уступающие по электрофизическим параметрам КНИ структурам с однослойным внутренним SiO₂ и значительно превосходящие их по радиационной стойкости. Обнаружено, что введение нитридного слоя во внутренний окисел сдвигает центрост радиационно-индуцированного заряда от границы Si-SiO₂ вглубь диэлектрика и существенно уменьшает его величину.

Ключові слова: кремній на ізоляторі, електрофізичні методи дослідження, багатошаровий внутрішній діелектрик, зонна лазерна перекристалізація, радіаційна стійкість, ВЧ-плазмова обробка.

Підписано до друку 02.07.97р. Формат 60x84/16.
Ум. друк. арк.1,0. Обл.-вид. арк. 1,0.
Наклад 100. Зам. 223.

Відділ оперативної поліграфії
Центру Міжнародної освіти
227-12-75, 227-37-86

433615

AB 38.399