

УДК 621.382.28

В.М. ЛИТВИНЕНКО

Херсонський національний технічний університет

І.М. ВІКУЛІН

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНІ НА ЗВОРОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

У статті розглянуті причини і механізми впливу поверхні на зворотні характеристики р - n структур. Зроблено огляд технологічних методів обробки структур напівпровідникових приладів, у тому числі і методів гетерування, спрямованих на запобігання впливу поверхневих ефектів на електричні параметри приладів. Проаналізовані механізми впливу методів гетерування на параметри приладів, запропоновані оптимальні режими їх проведення. Приведені експериментальні результати використання методів гетерування в технології напівпровідникових приладів.

Ключові слова: поверхня, гетерування, зворотний струм, кремній, домішки, р - n перехід.

В.Н. ЛИТВИНЕНКО

Херсонский национальный технический университет

И.М. ВИКУЛИН

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ НА ОБРАТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В статье рассмотрены причины и механизмы влияния поверхности на обратные характеристики р-п структур. Сделан обзор технологических методов обработки структур полупроводниковых приборов, в том числе и методов геттерирования, направленных на предотвращение влияния поверхностных эффектов на электрические параметры приборов. Проанализированы механизмы влияния методов геттерирования на параметры приборов, предложены оптимальные режимы их проведения. Приведены экспериментальные результаты использования методов геттерирования в технологии полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: поверхность, геттерирование, обратный ток, кремний, примеси, р - n переход.

V.N. LITVINENKO

Kherson National Technical University

I.M. VIKULIN

Odessa National Academy of Telecommunications named after A.S. Popova

INFLUENCE OF SURFACE PROPERTIES ON REVERSE CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES

The reasons and mechanisms of the influence of the surface on the inverse characteristics of p-n structures are considered in the article. An overview is given of technological methods for processing structures of semiconductor devices, including gettering methods aimed at preventing the effect of surface effects on the electrical parameters of devices. The mechanisms of influence of gettering methods on the parameters of instruments are analyzed, optimal modes of their implementation are proposed. Experimental results of the use of gettering methods in the technology of semiconductor devices are presented.

Keywords: surface, gettering, reverse current, silicon, impurities, p - n junction.

Постановка проблеми

Якість роботи активних напівпровідникових структур, до яких відносяться діоди, транзистори, інтегральні схеми і ін., багато в чому залежать від стану їх поверхневого шару в області виходу на поверхню р - n переходу. Такі важливі характеристики діодів і транзисторів як величина зворотного струму і пробивна напруга р - n переходу в великій мірі визначаються обробкою поверхні. Обробка поверхні напівпровідника є дуже важливою технологічною операцією в процесі виготовлення напівпровідникових приладів і схем. У зв'язку з розвитком мікро- і наноелектроніки відбувається зменшення розмірів елементів і габаритів приладів і збільшується відношення поверхні до об'єму і, отже, росте міра впливу поверхні.

Поверхня дуже сильно впливає на експлуатаційні характеристики напівпровідникових приладів, стабільність їх характеристик і, отже, на відсоток виходу придатних приладів і їх надійність при експлуатації. З плином часу експлуатації починається деградація характеристик приладів, тобто вони змінюються, виходять за встановлені стандартом допуски, і прилад виходить з ладу. Зміна параметрів напівпровідникових приладів розпочинається з поверхні і пов'язана з процесами адсорбції-десорбції, дифузії і так далі. Тому в технології застосовуються спеціальні методи поверхневих обробок, спрямовані на поліпшення і збереження стану поверхні (пасивація поверхні шаром діелектрика, герметизація приладів і т. ін.).

Незважаючи на значну кількість робіт по впливу стану поверхні структур напівпровідникових приладів на їх зворотні характеристики, питання контрольованого управління станом поверхні при виробництві багатьох видів напівпровідникових приладів вимагають подальшого розгляду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Інтенсивний розвиток мікроелектроніки, чітка тенденція до мініатюризації робочих елементів, створення новітніх перспективних, конструктивно складних приладів, а також необхідність наявності високоєфективного промислового виробництва сучасних напівпровідникових приладів і інтегральних схем продовжують залишати актуальними питання впливу поверхневих ефектів на параметри і відсоток виходу придатних приладів.

Проведено дослідження поверхневих станів на межі розділу Si - SiO₂ [1]. Для дослідження було використано структуру метал – діелектрик – напівпровідник. Зокрема, досліджували структуру Mo – SiO₂ – Si. Відомо, що іони натрію призводять до ряду ефектів, серед яких утворення центрів захоплення для електронів в SiO₂ і індуквання електронних поверхневих станів на межі розділу Si - SiO₂. Встановлено [1], що в перехідній області діоксид кремнію - кремній має місце нейтралізація заряду рухливих іонів електронним зарядом внаслідок термоелектронної польової емісії із зони провідності кремнію.

У роботах [2, 3] досліджувалися джерела іоннонезалежної деградації параметрів шаруватих структур діоксид кремнію - кремній. При вивченні сколів пластин початкового епітаксійного кремнію методом електронної скануючої мікроскопії з рентгенівським мікроаналізом з подальшою обробкою хімічним виборчим травником Секко (час травлення 1хв) виявлені атоми калію, які утворюють скупчення у вигляді "зірочок". При окисленні пластин епітаксійного кремнію атоми калію, які мають малу енергію активації, переміщуються з об'єму діоксиду кремнію до межі розділу діоксид кремнію - кремній, змінюючи її зарядовий стан. Імовірно можливим джерелом проникнення атомів лужних металів в оксид кремнію могло бути навколишнє оснащення (кварцові труби, кварцові човники і так далі). Однак, результати рентгенівського аналізу навколишнього оснащення дозволяють зробити висновок про те, що це оснащення не може бути джерелом лужних атомів в діоксиді кремнію [3]. Таким чином, на підставі проведених досліджень можна зробити висновок - джерелом лужних металів в діоксиді кремнію є початковий кремній, а не навколишнє оснащення. Причини проникнення атомів лужних металів в кремній можуть бути пов'язані з процесами зростання епітаксимальної плівки і з наявністю домішок в кремнієвій підкладці.

Розглянута можливість дослідження поверхні напівпровідникових пластин за допомогою методу растрової оптичної мікроскопії [4]. Експериментальні виміри проводилися за допомогою комп'ютера. Для обробки експериментальних результатів авторами розроблена спеціальна програма. За допомогою даного методу автори спостерігали різні види дефектів на поверхні напівпровідникових структур, а також були зроблені припущення про вплив дефектів на електричні параметри р - n структур.

Використання легкоплавких свинцево-боросилікатних стекол для створення пасивуючих і ізолюючих шарів в напівпровідниковій мікроелектроніці обумовлює інтерес до вивчення їх електрофізичних характеристик. Одним з найважливіших параметрів пасивуючих покриттів є величина рухливого заряду, який повільно релаксує, в їх об'ємі. Методом ізотермічної релаксації ємності визначена величина ефективного поверхневого заряду в пасивуючих покриттях на основі свинцево-боросилікатних стекол [5]. Встановлено, що підвищення температури формування досліджених покриттів веде до збільшення значень ефективного поверхневого заряду. Показано, що ця залежність обумовлена збільшенням концентрації центрів захоплення носіїв заряду при підвищенні змісту кристалічної фази в об'ємі скла.

Мета дослідження

Дана робота присвячена аналізу впливу поверхні на електричні характеристики напівпровідникових приладів і методам запобігання цього впливу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Стан поверхні структур напівпровідникових приладів спричиняє на параметри і характеристики приладів не менш сильний вплив, чим фізичні властивості об'єму напівпровідника [6, 7]. Причиною негативних явищ в напівпровідникових кристалах з р - n переходами можуть бути не лише рівні Тамма і Шоклі, які мають місце навіть на атомарно-чистій поверхні напівпровідника. На реальній поверхні

напівпровідника осідає багаточасова плівка вологи і міститься багато сторонніх домішок, адсорбованих з травників і промивної води. Помітну частину цих домішок складають позитивні іони лужних металів. Під дією напруги, прикладеної до переходу, ці іони дрейфують в плівці вологи, створюючи іонний струм витоку, величина якого росте зі збільшенням вологості. Струм поверхневого витоку часто є основною складовою зворотного струму через р-п перехід.

В технології мікроелектроніки завжди застосовують захист (пасивацію) поверхні напівпровідникових приладів і інтегральних схем. Найкращим для цієї мети є термічно вирошений шар SiO_2 . Проте навіть захищена діелектричним шаром поверхня не завжди залишається стабільною. Річ у тому, що в діелектрику, особливо в області його межі розділу з напівпровідником, можуть бути розташовані включення домішок і їх комплекси з різними структурними дефектами, які зазвичай мають електричний заряд. Під дією електричних полів, завжди існуючих в працюючому приладі, можливе повільне переміщення цих домішок і дефектно - домішкових комплексів, як углиб діелектрика, так і в область межі розділу з напівпровідником. Результат відомий: зміна міри і характеру заповнення електронних станів межі розділу і електричних полів в цій області, дрейф поверхневого потенціалу і пов'язаних з ним характеристик, виникнення локальних витоків і пробою діелектрика.

Позитивний заряд в захисній плівці оксиду кремнію залежно від типу провідності бази діода може приводити або до поверхневого пробою р - n переходу (якщо база n- типу) або до утворення інверсних каналів (на поверхні бази р - типу), що проводять. Довжина каналу залежить від величини зворотної напруги, прикладеної до р- n переходу. Якщо відстань між р- n переходом і омичним переходом невелика, то при великій напрузі канал досягає омичного контакту і шунтує р - n перехід. Це веде до виникнення значних струмів витоку і, як наслідок, до зниження виходу придатних приладів.

Для виключення небажаного впливу стану поверхні на електричні параметри і надійність напівпровідникових приладів розроблені технологічні способи обробки напівпровідникових структур, використання яких дає можливість значно покращити стан їх поверхні.

Є багато різноманітних способів покращання якості поверхні напівпровідникових структур. Основними з них являються:

1. Рідинна очистка поверхні пластин: а) фізична очистка – видалення адсорбованих поверхнею забруднень шляхом простого розчинення; відмивка водою. б) хімічна очистка – передбачає руйнування забруднень або поверхневого шару об'єкта, який очищається, в результаті хімічних реакцій; відмивка водою.

2. Суха очистка і травлення: термообробка; іонне травлення; газове травлення; плазмохімічне травлення; реактивне іонне травлення.

3. Методи гетерування домішок на поверхні напівпровідникових структур: гетерування розплавами; гетерування стеклами; гетерування високолегованими поверхневими шарами, створеними дифузією фосфору і бору; гетерування відпалом в спеціальному середовищі.

Для захисту (пасивації) поверхні напівпровідникових структур від впливу навколишнього середовища використовують діелектричні плівки. Для приладів, які виготовляють на основі кремнію зазвичай використовується його природний окисел SiO_2 . Також широко застосовують комбінації покриттів з використанням SiO_2 , Si_3N_4 та шарів боро- і фосфоросилікатних стеклок. Для приладів, які виготовляються на основі Ge і GaAs, окрім розглянутих захисних плівок використовують ще плівки оксиду алюмінію Al_2O_3 .

В роботі [8] пропонується ефективний спосіб очистки напівпровідникових пластин від органічних і механічних забруднень, домішок. Спосіб передбачає двостадійну обробку в двох ваннах з різними розчинами: в 1-ій ванні знаходиться розчин, який складається із сірчаної кислоти (H_2SO_4) і перекису водню (H_2O_2) у відношенні: $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 1:10$ при $T=120\pm 5^\circ\text{C}$. В другій ванні знаходиться розчин, який складається з водного розчину аміаку (NH_4OH), перекису водню (H_2O_2) і деіонізованої води (H_2O) у відношенні: $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O} = 1:4:20$ при температурі $60\pm 5^\circ\text{C}$. На погляд авторів, в 1-ій ванні відбувається видалення найбільш грубих органічних і жирових забруднень, в 2-ій ванні видаляються ділянки жирових покриттів, які не були видалені в процесі обробки в 1-ій ванні. Як рахують автори, очистка в кислоті (H_2SO_4) дає можливість видалити адсорбовані іони металів і розчинити оксидні плівки на поверхні напівпровідника, пергідроль розкладається з виділенням кисню: $\text{H}_2\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{O}$; атомарний кисень окислює як органічні, так і неорганічні забруднення. Луг (NH_4OH) прискорює реакцію розкладання пергідролу, а також зв'язує в добре розчинні комплекси сполуки. Даний спосіб, як показали автори, у порівнянні з базовими методами обробки напівпровідникових структур дає можливість покращити якість очистки і скоротити тривалість процесу очистки поверхні.

Досліджувався вплив обробки поверхні кремнієвих епітаксійних структур перед першим окисленням в різних хімічних реактивах на зворотні струми діодів, виготовлених на їх основі [9].

Досліджувані зразки перед окисленням очищалися в наступних компонентах хімічної обробки: 1) ($\text{HF}:\text{HNO}_3 = 1: 19$) - обробка впродовж 20 с. 2) СМА - сульфо-малиновий ангідрид (поверхнево - активна речовина) - обробка впродовж 25 хв. 3) HNO_3 - обробка кип'яченням впродовж 50 хв. 4) ПАР -

перекисно-аміачний розчин ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O} = 1:1:4$) - обробка впродовж 7 хв. 5) $\text{CMA} + \text{HNO}_3$ - обробка впродовж 25хв і 50хв відповідно. 6) $\text{CMA} + (\text{HF}:\text{HNO}_3=1:19) + \text{HNO}_3$ - обробка впродовж 25хв, 20с і 50 хв відповідно. Час обробки в кожному з досліджуваних компонентів підбирався експериментально. Окислення досліджуваних зразків проводилося в одному технологічному процесі по режиму: $T=1045^\circ\text{C}$; час процесу - 10 хв; середовище – водяна пара. Товщина вирощеного оксиду складала 0,16 мкм. Після цього проводилася металізація кремнієвих структур і фотолітографія по шару металу з діаметром вікна $D = 1000\text{мкм}$ для отримання структур метал-оксид-напівпровідник (МОН-структур). В результаті проведення експерименту були зняті вольт-фарадні характеристики МОН-структур, оброблених приведеними вище хімічними реагентами. Якість хімічних обробок оцінювали за величиною сумарного поверхневого заряду МОН-структур Q_{SS} і щільності поверхневих станів N_{SS} для кожного виду хімічної обробки, які розраховували з використанням побудованих вольт-фарадних характеристик МОН-структур [9]. Найменше значення сумарного поверхневого заряду і щільності поверхневих станів (відповідно

$Q_{\text{SS}} = 2,8 \cdot 10^{-10}\text{Кл}$ і $N_{\text{SS}} = 1,4 \cdot 10^{11}\text{см}^{-2}$) отримане при використанні обробки в ПАР. Також якість досліджуваних хімічних обробок оцінювали по виходу придатних діодних структур, виготовлених за стандартною планарно – епітаксійною технологією на кремнієвих епітаксійних структурах n- типу провідності з питомим опором 2 Ом·см. і завтовшки 10мкм, очищення яких перед першим термічним окисленням проводилося з використанням цих хімічних компонентів (табл. 1).

Таблиця 1

Вплив різних методів хімічної обробки на зворотні струми діодних структур

Метод хімічної обробки	Вихід придатних діодних структур, %
Обробка в $\text{CMA} + (\text{HF}:\text{HNO}_3=1:19) + \text{HNO}_3$	63
Обробка в HNO_3	69
Обробка в $\text{HNO}_3 + \text{CMA}$	65
Обробка в CMA	70
Обробка в $(\text{HF}:\text{HNO}_3=1:19)$	73
Обробка в ПАР	76

Таким чином, оптимальною з точки зору забезпечення мінімальної величини сумарного заряду на поверхні діодних структур і найбільшого виходу придатних діодів (табл. 1) являється обробка в перекисно-аміачному розчині. Найбільш прийнятною з точки зору екології і економіки є обробка поверхні діодних структур в сульфо-малиновому ангідриді, в якому відсутні шкідливі для обслуговуючого персоналу складові, що виключає необхідність використання спеціального устаткування і захисних засобів. При цьому забезпечується досить високий вихід придатних діодів.

В роботі [10] досліджувався процес впливу відпалу в атмосфері аргону на зворотні характеристики структур випрямно-імпульсного діода Шоттки. Структури діодів Шоттки виготовлялися за ізопланарною технологією. Перед напиленням Mo , що формує бар'єр Шоттки, кремнієві пластини піддавалися відпалу в атмосфері аргону при 750°C впродовж 30 хв. На рис. 1 приведені зворотні гілки ВАХ діодів, виготовлених за базовою (стандартною) технологією, а також при використанні відпалу в середовищі аргону. Видно, що відпал структур діодів дає можливість істотно понизити рівень зворотних струмів діодів. Поліпшення зворотної гілки ВАХ структур діода Шоттки, в результаті їх відпалу в середовищі аргону, автори пояснюють збільшенням висоти бар'єру Шоттки і зменшенням щільності поверхневих станів як на межі розділу метал-напівпровідник, так і на межі розділу $\text{Si} - \text{SiO}_2$.

Зменшення щільності поверхневих станів, на погляд авторів, пов'язане з випаром небажаних домішок (наприклад, домішок металів Na , K , Fe , Ni , Cu) з поверхні діодних структур в процесі їх відпалу в середовищі аргону. Для стабілізації поверхні діодних структур необхідно забезпечити її надійний захист від негативної дії навколишнього середовища.

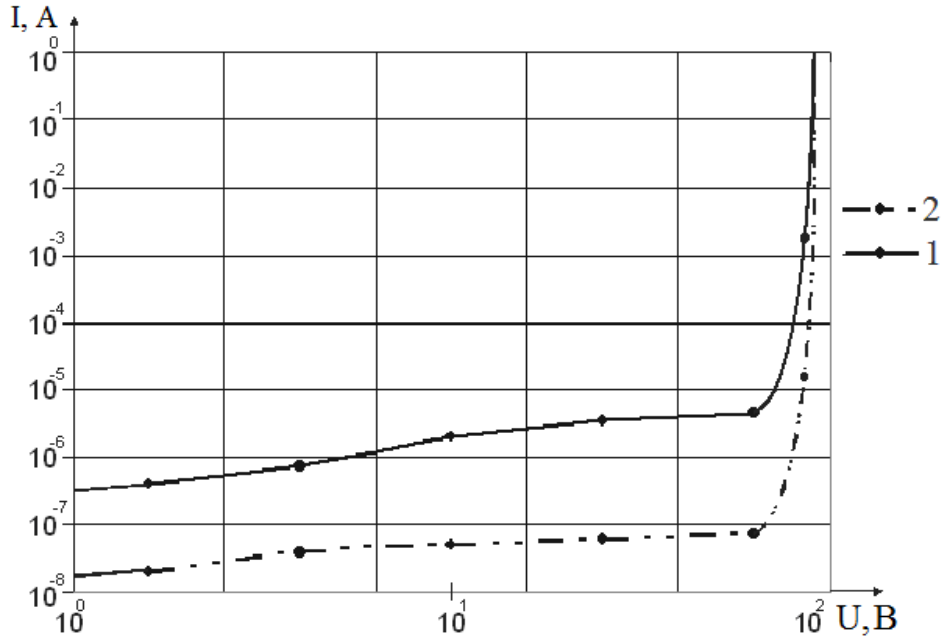


Рис. 1. Зворотні гілки ВАХ діодів:
1 - без відпалу; 2 - після відпалу в середовищі аргону при $T = 750^{\circ}\text{C}$ впродовж 20 хв

В роботі [11] досліджено вплив різних методів термічного окислення на зворотні характеристики кремнієвих планарних діодів з метою вибору найбільш оптимального методу. Були досліджені наступні методи термічного окислення:

1. окислення в парах води (гідротермальне окислення);
2. окислення по циклу сухий - вологий - сухий кисень (комбінований метод);
3. окислення з використанням в якості джерела пари водного розчину 37% - і HCl ($\text{H}_2\text{O} : \text{HCl} = 2 : 1$).

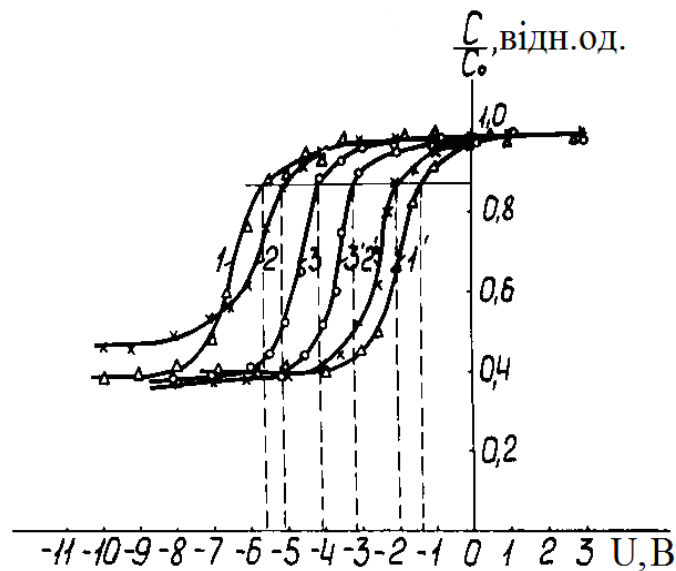


Рис. 2. Експериментальні C - U - характеристики МОН-структур: 1 - гідротермальне окислення; 2 - окислення з використанням в якості джерела пари водного розчину HCl ; 3 - окислення по циклу С - В - С кисень; 1, 2 і 3 - без відпалу; 1', 2' і 3' - після відпалу в середовищі аргону

Структури діодів виготовлялися на кремнієвих епітаксійних плівках за стандартною планарно-епітаксійною технологією. Температура процесу окислення 1050°C . Після проведення окислення пластини відпалювали в атмосфері аргону при температурі процесу окислення. Якість отриманих захисних плівок оцінювалася за величиною і стабільністю сумарного заряду в них, а також за

результатами контролю готових діодних структур по зворотному струму на установці типу "Зонд" (критерій придатності: $I_{зв} < 0,3 \mu\text{A}$ при $U_{зв}=35\text{В}$). Для визначення величини сумарного заряду оксиду і його стабільності використовувалися вольт-фарадні характеристики (ВФХ), виміряні на виготовлених МОН-структурах Al-SiO₂-Si (рис.2).

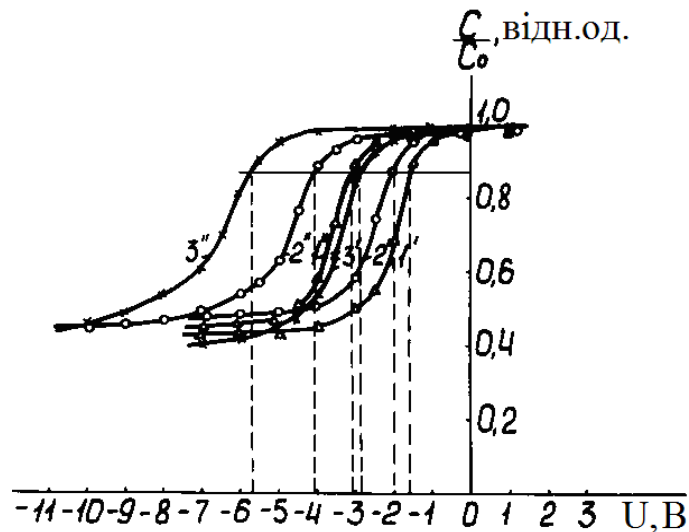


Рис. 3. C-U – характеристики МОН-структур: 1', 2', 3' – після відпалу в середовищі аргону; 1'', 2'', 3'' – після термопольової обробки

Стабільність заряду в оксиді оцінювали, здійснивши термопольову обробку досліджуваних МОН-структур ($T=1050^\circ\text{C}$, $U_{зм}=30\text{В}$, $t=1\text{час}$) і оцінивши величину зрушення ВФХ в порівнянні з початковою (рис.3). Порівняльні параметри кожного з досліджуваних методів окислення, одержані після проведення експериментальних партій, наведені в табл. 2 і 3.

Відпал кремнієвих структур в середовищі аргону, який проводиться після завершення процесу окислення, призводить до зрушення вольт-фарадних характеристик МОН-структур управо (рис.2). Це свідчить про зменшення сумарного позитивного заряду на межі розділу Si - SiO₂. Причому найбільше зрушення ВФХ спостерігається для МОН-структур, виготовлених з використанням гідротермального окислення, що можна пояснити за допомогою моделі аутодифузії натрію і інших швидкокодифундуючих домішок з оксиду при високотемпературних термообробках. Згідно цієї моделі ефективність видалення швидкокодифундуючих домішок шляхом дифузії з оксиду в газову фазу в процесі високотемпературних обробок в інертному середовищі залежить від концентрації силанольних ОН-груп, наявних в оксиді. У плівці двоокису кремнію, отриманого за допомогою гідротермального окислення, концентрація ОН-груп найбільш висока в порівнянні з плівками, отриманими іншими досліджуваними методами, що і забезпечує найбільш глибоке очищення оксиду від домішок.

Термопольова обробка МОН-структур викликає зрушення ВФХ вліво (рис.3), що вказує на збільшення сумарного позитивного заряду в окисній плівці. Найменший дрейф заряду в гідротермальном оксиді після термопольової обробки (рис.3) автори пояснюють кращим очищенням оксиду від швидкокодифундуючих домішок в процесі високотемпературного відпалу в середовищі аргону [11].

Таким чином, оптимальним можна рахувати метод гідротермального окислення з подальшим відпалом в середовищі аргону, що дозволяє отримувати окисні плівки з низькими значеннями сумарного заряду і хорошою його стабільністю, що забезпечує значне підвищення відсотка виходу придатних діодних структур за рахунок зменшення рівня їх зворотних струмів (табл. 2, 3).

В роботі [12] досліджувався вплив охоронних кілець і поверхневого заряду на межі розділу Si-SiO₂ на значення пробивної напруги р-n переходу затворної області транзистора. Охоронні кільця формувалися дифузією бору з подальшою розгонкою домішки. Наявність поверхневого заряду призводить до збільшення концентрації домішки в приповерхневому шарі, через що ширина збідненої області поблизу поверхні відрізняється від ширини ОПЗ в об'ємі епітаксійного шару. Напруженість поля збільшується зі збільшенням концентрації домішки в приповерхневому шарі. Автор показав, що за рахунок використання охоронних кілець можна суттєво понизити значення напруженості на поверхні напівпровідника. Це дає можливість значно підвищити напругу пробою р-n переходу затворної області транзистора.

Таблиця 2

Залежність “зарядових” характеристик оксиду від методу його одержання

Метод окислення	Номер експериментальної партії	$Q_{ss} \cdot 10^{-10}$, Кл	$N_{ss} \cdot 10^{11}$, см ⁻²
Гідротермальне окислення	1	2,80	1,75
	2	2,25	1,41
	3	3,20	2,00
Окислення по циклу С-В-С кисень	4	6,20	3,88
	5	5,10	3,19
	6	5,55	3,47
Окислення з використанням в якості джерела пари водяного розчину НСІ	7	3,21	2,01
	8	3,20	2,00
	9	2,79	1,74

Примітка: Q_{ss} і N_{ss} - сумарний заряд і щільність поверхневих станів на межі розділу Si - SiO₂; $N_{ss} = Q_{ss}/qS$, де q- заряд електрона; S - площа металевого контакту структури Al-SiO₂-Si.

Таблиця 3

Вплив різних методів термічного окислення на зворотні струми діодних структур

Метод окислення	Вихід придатних діодних структур, %
Гідротермальне окислення	75
Окислення по циклу С-В-С кисень	68
Окислення з використанням в якості джерела пари водяного розчину НСІ	63

З метою поліпшення стану поверхні структур діодів Шоттки і зменшення рівня їх зворотних струмів було запропоновано використовувати гетерування за допомогою проведення дифузії бору в робочу сторону структур після формування захисного шару SiO₂ [13]. Структури діода були виготовлені за ізопланарною технологією. На рис. 4 приведений скорочений технологічний маршрут виготовлення діодних структур з використанням дифузії бору, яка проявляє гетеруючу властивість. На кремнієву епітаксійну плівку 1 n-типу провідності завтовшки 3мкм і питомим опором 0,6 Ом·см, осаджену на n⁺-підкладку 2, після стандартної хімічної обробки послідовно наносять шари нітриду 3 і двооксиду кремнію 4 (рис.4). Методами фотолітографії формують меза-структури.

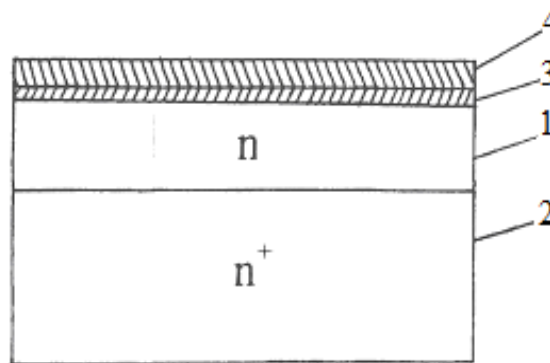


Рис. 4. Кремнієва епітаксійна структура після осадження шарів нітриду кремнію і двооксиду кремнію

Окислення меза - структур проводилося при температурі 1050°С. Товщина захисного шару двооксиду кремнію 5 складала 0,7 мкм. Потім проводиться дифузія бору в робочу сторону пластини методом відкритої труби з джерела В₂О₃ при температурі 950°С упродовж 30 хв в суміші аргону (100л/г) і сухого кисню (4л/г). При цьому на поверхні захисного шару двооксиду кремнію утворюється плівка боросилікатного скла 6 (рис.5).

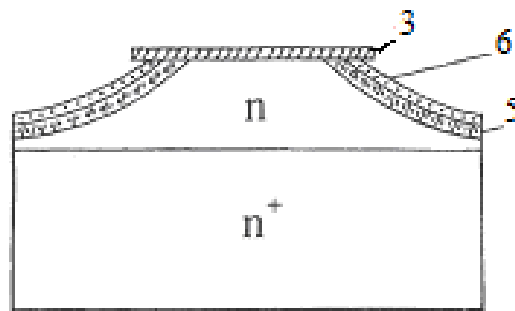


Рис. 5. Кремнієва меза-структура після проведення гетерируючої дифузії бору

Видалення нітриду кремнію 3 з контактних вікон проводиться в киплячій ортофосфорній кислоті. Після хімічної обробки на робочу сторону пластин методом вакуумного термічного випару осаджують шар нікелю 7, завтовшки 0,3 мкм і проводять методами фотолітографії формування випрямляючих контактів діаметром 60 мкм. Пластини з сформованими діодними структурами шліфуються з боку підкладки, проводиться формування омічного контакту шляхом послідовного нанесення на зворотну сторону пластин шарів титану 8, нікелю 9 (методом вакуумного термічного випару) і золота 10 (методом гальванічного осадження) (рис.6).

Використання розробленої технології дало можливість підвищити вихід придатних діодних структур по зворотному струму (в середньому на 8%). Позитивну дію дифузії бору автори [13] пояснюють таким чином. В процесі проведення дифузії бору на поверхні захисної півки SiO_2 формується шар боросилікатного скла, який проявляє гетеруючу дію по відношенню до домішкових забруднень, які зазвичай потрапляють у вирощуваний при термічному окисленні шар SiO_2 із стінок кварцевої труби і окислювального середовища. За рахунок гетерируючої дії шару боросилікатного скла в процесі дифузії здійснюється глибоке очищення захисного оксиду і межі розділу Si - SiO_2 від сторонніх домішок, що дозволяє значно зменшити зворотні струми діодних структур і, отже, підвищити вихід придатних діодів.

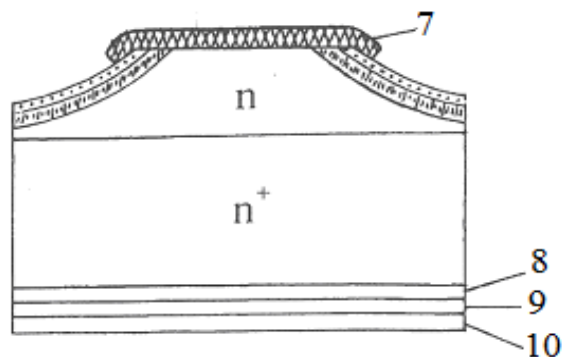


Рис. 6. Діодна структура після формування омічного контакту на зворотній стороні пластини

Авторами роботи [14] досліджувався вплив процесу гетерування кремнієвих пластин на властивості двоокису кремнію, отриманого шляхом термічного окислення, і на межу розділу Si - SiO_2 . Гетеруючий шар створювався шляхом обробки неробочої сторони кремнієвої пластини безперервним лазерним випромінюванням з щільністю потужності $E_{m0} = 5,5 \cdot 10^5$ Вт/см², кроком і швидкістю сканування $H = 250$ мкм і $V = 60$ см/с відповідно. Діелектричні півки отримували в результаті термічного окислення кремнію в середовищі сухого кисню. Про поліпшення властивостей діелектричних півок, вирощених на пластинах, на яких проводилось гетерування, свідчать результати електронно-мікроскопічних досліджень на просвіт півок завтовшки 20 нм, які вказують на однорідність їх структури. Про вплив гетерування судили за результатами контролю параметрів тестових МОН-конденсаторів з розвиненим рельєфом, зокрема струму витоку при напрузі на затворі $U = 5$ В і пробивної напруги. Тестовий конденсатор вважався придатним, якщо величина струму витоку для нього складала менше 10^{-10} А. Збільшення виходу придатних конденсаторів з 55 до 80 % і величини пробивної напруги з 10...17 В до 13...20 В, тобто у 1,3 рази говорить про перевагу пластин, що пройшли лазерне гетерування. З використанням таких пластин були виготовлені МОН СБІС. Проведені авторами

дослідження показали, що лазерна обробка неробочої сторони кремнієвих пластин перед термічним окисленням при температурі, що перевищує температуру подальших тривалих високотемпературних процесів, дозволяє в 2 рази понизити щільність заряду, в 1,8 разу - щільність поверхневих станів на межі розділу кремній - двоокис кремнію, а також надійність роботи МОН СБІС. Вирощені на таких пластинах плівки двоокису кремнію мали поліпшену структуру, більш високу стабільність заряду і високоякісну межу розділу.

Серед методів гетерування швидкокристалізуючих домішок особливе місце займають низькотемпературні методи. Більшість відомих технологічних прийомів гетерування небажаних домішок здійснюються з використанням високотемпературного відпалу ($T \geq 800^\circ\text{C}$). Проте, високотемпературний відпал небажаний для багатьох типів напівпровідникових приладів, оскільки призводить до деградації їх характеристик. Прикладами таких приладів можуть служити варикапи із зворотним градієнтом концентрації домішки в базі і НВЧ - діоди. У зв'язку з цим виникла необхідність проведення досліджень по розробці низькотемпературних методів гетерування небажаних домішок без використання високотемпературного відпалу. Одним з таких напрямів є використання плівок халькогенідних стекол для низькотемпературного гетерування [15, 16]. Як показали дослідження, аморфні плівки халькогенідних стекол володіють гетеруючою дією по відношенню до різного роду небажаних домішок на поверхні структур напівпровідникових приладів.

В результаті виконаних авторами [15] комплексних досліджень встановлено, що застосування гетерування за допомогою аморфної плівки скла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ перед відпалом плівки алюмінію дає можливість значно підвищити відсоток виходу придатних варикапних структур. В якості початкового матеріалу для виготовлення варикапів використовувалися леговані фосфором кремнієві епітаксійні шари з питомим опором $1,2 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і завтовшки $5,5 \mu\text{м}$, вирощені на низькоомних підкладках n-типу. Структури варикапів виготовлялися за планарно-епітаксійною технологією. Р - n перехід створювався дифузією бору. Гетерування здійснювалося таким чином. На робочу сторону кремнієвих пластин методом термічного випару у вакуумі осаджувалася аморфна плівка скла завтовшки $0,4\text{-}0,5 \mu\text{м}$ при температурі підкладки 27°C , проводився відпал структур при 300°C , у процесі якого рухливі іони лужних металів "поглинаються" плівкою скла. Після цього плівка скла видалялася з поверхні пластин в травнику. Окрім аморфної плівки скла $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ ефективними для гетерування домішок виявилися також плівки халькогенідних стекол $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ і $\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$. Ефективність гетерування оцінювалася по результатам контролю готових варикапних структур по зворотному струму (критерій придатності: $I_{\text{зв}} \leq 0,3 \text{ мкА}$ при $U_{\text{зв}} = 30 \text{ В}$). У табл. 4 приведені результати контролю варикапних структур по зворотному струму. Видно, що гетерування плівкою скла дає можливість підвищити вихід придатних варикапних структур. Варикапні структури, виготовлені з використанням гетерування плівками халькогенідних стекол, мали рівні зворотних струмів в 3-10 разів нижчі у порівнянні із структурами, при виготовленні яких гетерування не застосовувалося.

Таблиця 4

Вплив гетерування плівками халькогенідних стекол різних складів на зворотні струми варикапних структур

Склад плівок, які використовувались для гетерування	Вихід придатних варикапних структур, %
$\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$	71,5
$\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$	70,3
$\text{As}_{50}\text{Se}_{50}$	68,6

Примітка. На варикапних структурах, виготовлених без застосування гетерування, вихід придатних складів $66,5 \%$.

На рис. 7 показані зворотні гілки ВАХ варикапних структур, виготовлених на частинах однієї пластини: з використанням гетерування плівкою скла $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ (крива 1) і без гетерування (крива 2). Видно, що використання гетерування дає можливість значно зменшити рівень зворотних струмів варикапу.

Було проведено опробування використання плівок халькогенідних стекол для підвищення надійності планарних і меза-планарних діодів [16]. Планарні діоди виготовлялись на легованих фосфором кремнієвих епітаксійних шарах товщиною $6 \mu\text{м}$ і питомим опором $0,3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ за стандартною планарно-епітаксійною технологією. Для захисту р-n переходу використовувалася плівка двоокису кремнію товщиною $0,8 \mu\text{м}$, одержана методом термічного окислення. Для виготовлення меза-діодів використовувалися леговані фосфором кремнієві епітаксійні шари n - типу провідності з питомим опором $30 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і завтовшки $6,5 \mu\text{м}$. Застосовувалася стандартна меза-планарно-епітаксійна технологія. Меза-структури захищали плівкою SiO_2 товщиною $0,6\text{-}0,7 \mu\text{м}$, яку одержували високочастотним плазмовим розпиленням. Перед розділом пластин зі сформованими діодними структурами на кристали поверх захисної плівки SiO_2 наносилася методом лазерного випару аморфна плівка скла товщиною $0,5\text{-}0,7 \mu\text{м}$. Температура підкладки при напilenні була 27°C . За допомогою фотолітографії в захисному шарі скла розкривалися вікна для приєднання виведень до кристалу. Для поліпшення адгезії плівки халькогенідного скла до шару SiO_2 і проявлення нею гетеруючих властивостей після розкриття вікон проводився відпал діодних структур при температурі 290°C . Після цього планарні діоди складали в скляні, а меза-діоди в металокерамічні

корпуси. Діоди випробовувалися в камері вологи при температурі 40°C і відносній вологості 98% впродовж 480 г. Після випробувань проводився контроль діодів по зворотному струму (критерій придатності: $I_{зв} \leq 0,02$ мкА при $U_{зв} = 12$ В для планарних і $I_{зв} \leq 0,10$ мкА при $U_{зв} = 40$ В для меза-діодів).

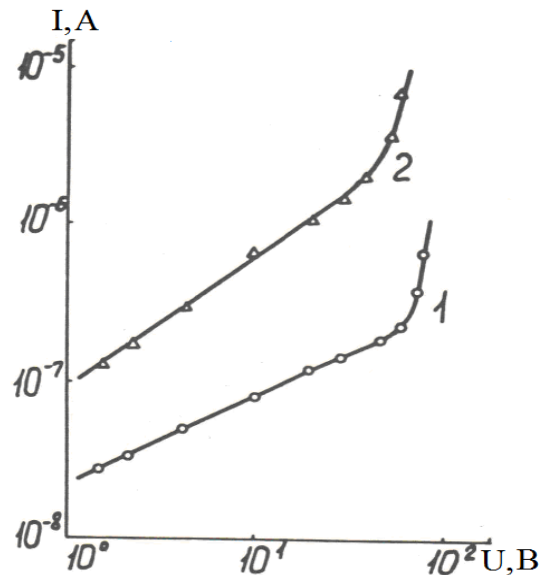


Рис. 7. Зворотні гілки ВАХ варикапних структур: виготовленої із застосуванням гетерування плівкою халькогенідного скла (крива 1) і без застосування гетерування (крива 2)

В результаті проведеного контролю планарних і меза-планарних діодів по рівню зворотного струму після випробувань на вологостійкість виявилось, що діоди додатково захищені плівкою халькогенідного скла мають вихід придатних на 6-8% вищий у порівнянні з приладами, захищеними тільки плівкою SiO_2 . Випробування діодів на надійність (витримка під електричним навантаженням впродовж 500 год.) показали зниження на 4-6 % кількостей деградуючих в процесі випробувань приладів за рахунок використання додаткового захисту р - n переходу плівкою халькогенідного скла.

Висновки

Таким чином, проведений огляд і аналіз впливу поверхні на зворотні характеристики р - n структур і застосуванням методом запобігання цього впливу свідчить про необхідність використання додаткових технологічних способів обробки поверхні напівпровідникових структур, в тому числі і методів гетерування, у виробництві напівпровідникових приладів і інтегральних схем. Застосування методів покращання стану поверхні структур напівпровідникових приладів в серійному виробництві дає можливість істотно поліпшити функціональні характеристики напівпровідникових приладів і інтегральних схем і підвищити їх надійність.

Список використаної літератури

1. Золочевский Ю.Б., Романов В.П., Соколов А.Ю. Исследование нейтрализации заряда подвижных ионов в области межфазовой границы диоксид кремния – кремний структуры $\text{Mo} - \text{SiO}_2 - \text{Si}$ // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6-4. – С. 651-656;
2. Кулинич О.А. Изучение макродефектов в кремнии современными методами исследований / О.А. Кулинич, М.А. Глауберман // 2-я УНКФП: укр. научн. конфер. по физ.полупров., 2004 г.: тезисы докл. - Черновцы, 2004. - С. 390.
3. Смынтына В.А. Влияние дефектов исходного кремния на процессы дефектообразования в диоксидах кремния / В.А. Смынтына, О.А. Кулинич, М.А. Глауберман и др. // СВЧ - техника и микроволновые технологии: 16-я Международная Крымская микроволновая конференция, 2006 г.: труды конфер. - Севастополь, 2006. - С. 608 – 609.
4. Григорьян В., Горюнов Н., Маняхин Ф. Исследование качества полупроводниковых структур методом фотоответного изображения. –Технология электронной промышленности. - №1, 2005. – С. 72-75.
5. Парчинский П.Б. Исследование медленнорелаксирующего заряда в пассивирующих покрытиях на основе свинцово-боросиликатных стекол методом изотермической релаксации емкости / П.Б. Парчинский, С.И. Власов, А.А. Насиров // Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып. 18. – С. 65-70.

6. Горшков А.П. Физика поверхности полупроводников: Учебное пособие / А.П. Горшков, С.В. Тихов. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 101с.
7. Ахмаева А.Р. Исследование взаимосвязи конструкции и технологии изготовления полупроводниковых приборов с пробивным напряжением / А.Р. Ахмаева // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - № 1 (28), 2013. – С. 26-31.
8. Шангереева Б.А. Способ очистки поверхности кремниевых пластин для изготовления мощных транзисторов / Б.А. Шангереева, А.И. Муртазалиев, Ю.П. Шангереев // Международный научный журнал «Инновационная наука». - №11, 2015. – С. 133-135.
9. Литвиненко В.Н. Исследование влияния химической обработки поверхности кремниевых диодных структур на их обратные токи / В.Н. Литвиненко, Г.Г. Дощенко, А.В. Короленко // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2011». – Выпуск 4. Том 9. – Одесса: Черноморье, 2011. – С. 9-11.
10. Литвиненко В.Н. Повышение надежности диодов Шоттки / В.Н. Литвиненко // Вестник ХНТУ. – № 3 (29), г. Херсон, 2007. - С. 313-315.
11. Литвиненко В.Н. Оптимизация технологии получения защитного окисла для кремниевых р-п структур / В.Н. Литвиненко, А.Д. Кучерук, Н.В. Богач, А.В. Салатенко // Вестник ХГТУ № 1(3), г. Херсон, 1998. – С. 83- 85.
12. Шахмаева А.Р. Конструктивно-технологические методы улучшения параметров полупроводниковых приборов / А.Р. Шахмаева, П.Р. Захарова // Вестник СГТУ, 2012. - №1(63), Выпуск 1. – с. 36-40.
13. Литвиненко В.Н. Оптимизация технологии изготовления кремниевого диода с барьером Шоттки/ В.Н. Литвиненко, А.В. Короленко, Самойлов Н.А., Журба А.М. // Вестник ХНТУ № 3 (32), г. Херсон, 2007 р.- С.94-96.
14. Пилипенко В.А. Влияние лазерного геттерирования кремниевых пластин на свойства границы раздела Si – SiO₂ / В.А. Пилипенко, Д.В. Вечер, В.В. Понарядов, В.А. Горушко, В.С. Сякерский, Т.В. Петлицкая // Вестник БГУ. Сер. I.- №1, 2008. – С. 23-25.
15. Литвиненко В.М. Вплив технологічних факторів на зворотні струми кремнієвих діодів / В.М. Литвиненко, М.В. Богач. - Херсон: вид-во ПП Вишемирський В.С., 2017.-156с. Монографія. ISBN 978-617-7273-51-5.
16. Литвиненко В.Н. Улучшение обратных характеристик кремниевых диодов при использовании пленок халькогенидных стекол / В.Н. Литвиненко, Н.И. Довгошей, М.М. Дизенгоф, Н.Я. Золотун// Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания. – Вып. 2(134), 1989. - С. 68-70.