

Литвиненко В. М.

кандидат технічних наук, доцент

Херсонський державний аграрно-економічний університет

м. Херсон, Україна

Бабушкіна Р. О.

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Херсонський державний аграрно-економічний університет

м. Херсон, Україна

ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КРЕМНІЄВИХ ДІОДІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАЦІЙ ГЕТЕРУВАННЯ ТА МЕТОДІВ ЗАПОБІГАННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВИХ ЕФЕКТІВ

У статті розглянуто дослідження, яке присвячене аналізу причин деградації зворотних характеристик кремнієвих діодів у технологічних процесах їх виготовлення та розробці технологічних методів, у тому числі і методів гетерування, направлених на підвищення виходу придатних приладів. З метою виявлення причин деградації зворотних характеристик діодів, проаналізовані технологічні маршрути виготовлення кремнієвих діодів Шотткі, варикапів та імпульсних діодів. Освітлені результати аналізу причин погіршення електричних параметрів діодів в процесі їх виготовлення. Розглянуті фізичні явища на поверхні напівпровідника та їх вплив на зворотні струми діодів. Приведені експериментальні результати використання методів гетерування в технології кремнієвих діодів. Встановлена природа можливих механізмів деградації зворотних характеристик діодних структур в залежності від виду структурних дефектів і небажаних домішок в їх активних областях. Особливу увагу в роботі приділено оптимізації технології виготовлення структур кремнієвих діодів, направленої на покращення їх електричних параметрів та підвищення виходу придатних приладів.

Вступ

Основним, базовим матеріалом електроніки є кремній. З використанням кремнієвих підкладок виготовляється близько 95% усіх напівпровідникових приладів. У реальних кристалах

є елементарні дефекти, що впливають на їх властивості. Структурні дефекти, особливо декоровані домішками, негативно впливають на електричні параметри напівпровідникових приладів і інтегральних схем і їх надійність.

Сучасні напівпровідникові прилади і інтегральні мікросхеми є надзвичайно складними пристроями, окремі компоненти яких мають розміри не більше за долю мікрметра. Виготовлення таких пристроїв здійснюється на монокристалічних напівпровідникових пластинах.

Найважливіші властивості напівпровідникових матеріалів і структур на їх основі визначаються наявністю домішок і структурної недосконалості в кристалах. Причому небажані домішки і дефекти можуть з'являтися не лише на стадії отримання матеріалів, але і в технологічних процесах виготовлення напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем на їх основі.

Вплив дефектів і домішок, в першу чергу, позначається на зворотній гілці ВАХ діода, тому що зворотні струми відносно малі. Рівень зворотних струмів кремнієвих діодів визначається багатьма чинниками, а саме: досконалістю епітаксialної структури, технологічними режимами формування $p-n$ переходу, електричними характеристиками захисних покриттів, матеріалом і режимами отримання омичних контактів, станом поверхні $p-n$ переходу.

У сучасній технології виробництва напівпровідникових приладів для усунення структурних дефектів з активних областей приладів застосовують ефективні методи гетерування. Гетерування – процес витягування домішок з різних частин монокристала в області їх стоку. Такими областями можуть служити, приміром, ділянки скупчення дефектів, введені в кристал спеціальними способами.

Багато методів гетерування дефектів і домішок, приведені в літературі, не узгоджуються з технологічними маршрутами виготовлення напівпровідникових приладів, що утрудняє їх застосування. Інші, пропоновані методи гетерування, не дають високу результативність при їх використанні для усунення структурних дефектів з активних областей приладів. У зв'язку з цим з'явилася необхідність розробки ефективних і технологічних методів гетерування структурних дефектів і небажаних домішок в кремнії.

Поверхневі ефекти також істотно позначаються на деградації зворотних характеристик діодів. До теперішнього часу розроблено ряд методів для запобігання впливу поверхневих ефектів на зворотні струми кремнієвих діодів, проте завдання розробки таких методів набагато складніше і вимагає обліку як технологічних, так і конструктивних особливостей кожного конкретного типу діодів.

В результаті проведених досліджень, проаналізовані явища впливу структурних дефектів і домішок на зворотні характеристики кремнієвих діодів, розроблені методи зниження щільності структурних дефектів в активних областях діодів із застосуванням гетерування та методи запобігання впливу поверхневих ефектів на зворотні струми діодів.

1. Використання методів гетерування структурних дефектів і домішок в технології діодів Шотткі

1.1. Зниження рівня зворотних струмів структур діода Шотткі за рахунок імплантації іонів аргону в зворотну сторону пластини

Діоди Шотткі (ДШ) широко використовуються в багатьох областях електроніки в якості випрямних діодів малої та середньої потужності та в якості імпульсних діодів. Цілеспрямоване використання ДШ як імпульсного діода пояснюється тим, що ДШ – уніполярні прилади, в яких відсутнє явище інжекції неосновних носіїв заряду. Це дозволяє підвищити швидкодію діодів у порівнянні з імпульсними діодами на основі р-п переходів, у яких швидкодія обмежена явищем «розсмоктування» неосновних носіїв заряду при перемиканні його з прямого у зворотний напрям [1]. Однак слід відмітити, що вартість ДШ залишається порівняно високою, що пов'язано з низьким виходом придатних діодів. Це пояснюється високим рівнем зворотних струмів ДШ і низькими у порівнянні з р-п переходами пробивними напругами. Ці явища пов'язані із суттєвою залежністю зворотних струмів ДШ від якості поверхні діодних структур та впливом на них структурних дефектів та сторонніх домішок [2].

З метою зменшення щільності структурно-домішкових дефектів використовуються різні методи гетерування [3], але як показала практика, багато з існуючих методів гетерування

являються малоефективними при їх використанні для зниження рівня зворотних струмів діодів, а деякі з методів гетерування «не вписуються» в технологічний маршрут виготовлення напівпровідникового приладу. У зв'язку із цим доцільна розробка технологічних прийомів гетерування індивідуально для кожного типу технологічного маршруту виготовлення напівпровідникового приладу з обліком його індивідуальних особливостей. Це дозволяє істотно підвищити ефективність гетерування і, отже, значно збільшити вихід придатних діодів. Тому в цьому є й економічна вигода.

Структури досліджуваного діода Шотткі виготовлялись за ізопланарною технологією [4]. Базовий технологічний маршрут виготовлення діодних структур включав наступні основні технологічні операції: стандартну хімічну обробку; послідовне нанесення шарів нітриду і двооксиду кремнію, товщиною відповідно 0,1 і 0,3 мкм; формування методами фотолітографії меза-структур заввишки 0,5 мкм, використовуючи в якості маски круглі ділянки нітриду кремнію діаметром 50 мкм; окислення меза-структур при температурі 1050°C протягом 2,5 г з наступним чергуванням циклів окислюючого середовища: сухий O_2 (10 хв) – пари води (100 хв) – сухий O_2 (10 хв) і завершальним відпалом в атмосфері аргону протягом 30 хв при температурі окислення; товщина вирощеного захисного шару SiO_2 (рис. 1); видалення плівки нітриду кремнію з контактних майданчиків проводять триманням структур в киплячій ортофосфорній кислоті (час травлення 30 хвилин), заздалегідь витримавши структури в травнику $HF + H_2O = 1 : 20$ протягом 20с (на випадок наявності тонкої плівки SiO_2 на поверхні нітриду); осадження методом вакуумного термічного випаровування шару молібдена (Mo) товщиною 0,3 мкм і формування методами фотолітографії випрямляючого контакту діаметром 60 мкм; шліфівка пластини з боку підкладки до товщини 180...200мкм; формування омічного контакту зі зворотної сторони пластини послідовним нанесенням шарів титану (Ti), нікелю (Ni) (методом вакуумного термічного випаровування) і золота (Au) (методом гальванічного осадження).

У результаті було отримано структуру діода Шотткі, що наведена на рис. 1.

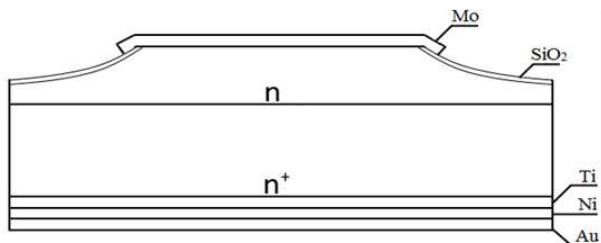


Рис. 1. Структура діода Шотткі, що виготовлена за базовою технологією

Проведені дослідження відбракованих непридатних по зворотному діодних структур показали наявність в їх активних областях окислювальних дефектів упаковки (ОДУ) щільністю 10^4 - 10^5 см⁻². Виявлення структурних дефектів проводилось за допомогою селективного травлення структур в реактиві Сіртла на протязі від 10 до 180 с.

Встановлення виду структурних дефектів і оцінка їх щільності проводились за допомогою металографічного мікроскопу МЕТАМ-1. Щільність дефектів визначалась за формулою:

$$N = n / S ,$$

де N – щільність дефектів;

n – середнє арифметичне кількості дефектів на п'яти ділянках;

S – площа поля зору в окулярі мікроскопа.

Мікрофотографія поверхні однієї із досліджувальних діодних структур після селективного травлення в реактиві Сіртла на протязі 30 с приведена на рис. 2.



Рис. 2. Поверхня діодної структури з виявленими ОДУ

Для запобігання утворення ОДУ необхідно було вибрати ефективний метод гетерування, який би органічно вписався в технологічний маршрут виготовлення діода. Так як ОДУ утворюються, починаючи з першої високотемпературної операції – термічного окислення, то очевидно, що необхідно використовувати гетерування уже з самого початку технологічного маршруту виготовлення діода. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним для подавлення ОДУ являється метод створення гетеруючої області на зворотній стороні пластини за допомогою імплантації іонів аргону в зворотний бік пластини з послідуєчим відпадом пластин в суміші азоту і кисню перед осадженням шарів нітриду кремнію [5].

Область гетера на зворотному боці пластини була сформована за допомогою імплантації іонів аргону в зворотну сторону пластини з енергією 100 кеВ, дозою $5 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ на установці «Везувій-5» і послідуєчий відпал пластин в суміші азоту (130 л/г) і кисню (6 л/г) при температурі $T=1100^\circ\text{C}$ на протязі 3г.

Для випробування запропонованого способу виготовлення діода Шоттки були сформовані експериментальні партії, кожна з яких ділилася на дві частини: одна частина партії була виготовлена відомим способом, інша – запропонованим способом. Ефективність використання запропонованого способу оцінювалася по відсотку виходу придатних діодних структур при їх розбраковці по зворотному струму ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 1 \text{ мкА}$ при зворотній напрузі 15 В. Залежність виходу придатних діодних структур по зворотному струму від способу їх виготовлення приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив гетерування на зворотні струми діодів

Спосіб виготовлення діода Шоттки	Номер експериментальної партії	Вихід придатних діодних структур по зворотному струму, %
Запропонований спосіб виготовлення	1	97
	2	98
	3	97
Відомий спосіб виготовлення	1*	89
	2*	90
	3*	89

Як видно використання запропонованого способу виготовлення діода Шотткі дозволяє підвищити вихід придатних структур по зворотному струму на 8 %. При цьому діодні структури, виготовлені запропонованим способом, мали рівень зворотних струмів в 3 – 10 разів нижчий у порівнянні із структурами, виготовленими відомим способом.

Ефективність розробленої технології полягає в тому, що у процесі високотемпературного відпалу на зворотній стороні пластини формується гетеруючий шар, який поглинає в собі небажані домішки металів та зародки структурних дефектів, які утворились в кремнії при вирощуванні злитків та в процесі епітаксії. В процесах осадження плівок нітриду та двоокису кремнію сформований на зворотній стороні пластини гетер продовжує очистку об'єму пластин від домішок металів та зародків окислювальних дефектів упакування. Це в великій мірі запобігає утворенню ОДУ при проведенні високотемпературних термічних операцій – термічного окислення та загонки бору. Також у процесі проведення високотемпературних процесів ліквідуються раніше утворені дефекти за рахунок дії сформованого на зворотній стороні пластини гетеруючого шару.

1.2. Розробка методу гетерування на основі сильнолегованих бором областей охоронного кільця в технології діодів Шотткі

Технологія виготовлення діода Шотткі з охоронним кільцем [6] дає можливість суттєво поліпшити захист переходу метал – напівпровідник від можливого поверхневого пробою. Однак, незважаючи на використання сучасних технологій і високоякісних матеріалів для обробки структур діода, не вдається істотно підвищити їхній вихід. Причиною цього є неконтрольовані домішки, що попадають на структури діода Шотткі в процесах високотемпературних обробок [3].

Згідно базової технології виготовлення діода область охоронного кільця формується проведенням дифузії бору в дві стадії: загонка бору і розгонка бору для отримання необхідної глибини залягання p^+ - n переходу області охоронного кільця. Розгонка бору проводиться в окислювальному середовищі, тому в процесі проведення цієї операції є велика вірогідність утворення в кремнії ОДУ [7]. Крім того проведення розгонки бору в окислювальному середовищі призводить до значного погіршення якості раніше сформованого захисного шару двоокису кремнію

(тобто до збільшення позитивного заряду в ньому). Наслідком цього є значне зниження рівня пробивної напруги $p^+ - n$ переходу області охоронного кільця і збільшення рівня зворотних струмів діодних структур з бар'єром Шотткі.

Для з'ясування причини погіршення зворотних характеристик діодів після розгонки бору були проведені металографічні дослідження. З цією метою після проведення процесу розгонки бору і видалення оксиду з робочих вікон в розчині плавикової кислоти, пластини були піддані селективному травленню в реактиві Сіртла впродовж 12-15 сек. При використанні металографічного мікроскопа МИМ- 7 в активних областях діодних структур були виявлені ОДУ. Щільність дефектів складала $10^3 \dots 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Багато з існуючих способів гетерування структурних дефектів і домішок в кремнії часто не вписуються в той або інший технологічний маршрут виготовлення напівпровідникового приладу і тому є для нього неефективними. У зв'язку з цим доцільна розробка технологічних прийомів гетерування індивідуальна для кожного типу технологічного маршруту виготовлення напівпровідникового приладу з урахуванням його індивідуальних особливостей [3]. Це дозволяє істотно підвищити ефективність гетерування і, значно збільшити вихід придатних діодів. Спираючись на результати аналізу базової технології виготовлення діода, необхідно було розробити ефективний метод гетерування домішок і структурних дефектів в активних областях діодів. У зв'язку з цим, було проведено коригування базової технології виготовлення діода Шотткі з охоронним кільцем.

Відомо [6], що пробивна напруга області охоронного кільця діода Шотткі визначається або товщиною епітаксійної плівки, або кривизною периферійних ділянок охоронного кільця. У значно меншому ступені величина пробивної напруги охоронного кільця (у ідеальному випадку без урахування дефектів) залежить від рівня його легування бором. З іншого боку, відомо [3], що області леговані бором можуть проявляти гетеруючі властивості. При цьому, чим вище рівень легування охоронних областей бором, тим краще їх гетеруючі властивості з точки зору захоплення і утримання швидкодіфундуючих домішок. В процесі загонки бору його поверхнева концентрація в легованому шарі дорівнює граничній розчинності бору в кремнії при температурі загонки і в приповерхневому шарі легованої області має місце механічна

напруга стискування. У таких шарах окислювальні дефекти упакування не утворюються, навіть якщо поверхня кремнію при цьому окислюється. У об'ємі кремнію на глибині близько мікрона починається область кремнію (у тому числі і легована бором), що знаходиться в стані механічного розтягування. У цій області є усі умови для утворення і зростання окислювальних дефектів упакування. Проте, в процесі загонки, приповерхневий механічно стислий шар p^+ – кремнію блокує відведення вакансій з об'єму кремнію і запобігає зростанню ОДУ в об'ємі легованої бором охоронної області. Якщо, згідно із стандартним технологічним процесом, видалити боросилікатне скло і виконати розгонку бору в окислювальному середовищі, то через 5-10 хвилин після початку процесу розгонки практично усі міжвузольні атоми бору перейдуть у вузли кристалічної решітки кремнію, усі атоми бору стануть електрично активними і приповерхневий механічно стислий шар кремнію зникне. В результаті уся охоронна область (по глибині) знаходитиметься в стані механічного розтягування. Після цього починають зароджуватися і рости ОДУ. Якщо ОДУ, що утворився, має розміри, сумірні з глибиною залягання p^+ - п переходу області охоронного кільця, то це призводить до збільшуватися рівня його зворотних струмів і зниженню пробивної напруги.

На основі викладених уявлень про фізичні процеси дефектоутворення в технології досліджуваної серії діодів Шоттки, було запропоновано [8] вести розгонку бору так, щоб поверхнева концентрація бору увесь час була близька до граничної розчинності бору в кремнії. Для цього найзручніше вести процес розгонки без попереднього видалення боросилікатного скла в середовищі аргону. В цьому випадку, в процесі розгонки, бор поступово випаровуватиметься з боросилікатного скла, що знижує вірогідність утворення важкорозчинних з'єднань бору з кремнієм. При правильно вибраних режимах, до кінця процесу розгонки, поверхнева концентрація бору має бути тільки на 20-25% нижче граничної розчинності. Механічно стислий приповерхневий шар, при цьому, зникне, але окислювальні дефекти упакування не встигнуть вирости до небезпечних розмірів. Іншою важливою особливістю запропонованої технології виготовлення діода Шоттки з охоронним кільцем являється те, що процес загонки бору можна виконувати з газової фази або з двостороннього джерела бору. В цьому випадку

сильнолегований бором шар утворюватиметься і із зворотного боку підкладки. При цьому різко зростає загальна ефективність гетерування швидкодифундуючих домішок з усього об'єму епітаксильної плівки і підкладки. Область охоронного кільця, незважаючи на підвищення гетеруючої здатності за рахунок надмірного легування бором, має нікчемно малий об'єм в порівнянні з тим об'ємом кремнію, що доводиться на один кристал. Тому області охоронного кільця швидко насичуються швидкодифундуючими домішками і надалі не очищають об'єм кремнію від небажаних домішок. Швидкодифундуючі домішки, які залишилися в об'ємі, осідають під бар'єром Шотткі, що призводить до збільшення зворотного струму діодів. Об'єм p^+ – гетерошару із зворотного боку підкладки в сотні разів перевищує об'єм охоронної області і забезпечує очищення об'єму кремнію від швидкодифундуючих домішок. Гетерошар із зворотного боку підкладки, виконавши свою місію, видається при шліфовці. Розроблена технологія виготовлення діода Шотткі має на увазі проведення розгонки бору без попереднього видалення боросилікатного скла шляхом відпалу пластин в середовищі аргону при температурі від 1000 до 1070°C впродовж 30-70 хв, а подальше видалення боросилікатного скла проводиться в дві стадії: 1) обробка пластин в р-травнику (складається з 15 мл плавикової, 10 мл азотної кислот, 300 мл води); 2) витримка пластин в концентрованій HNO_3 в діапазоні температур 95-115°C впродовж 5-10 хв і наступна обробка пластин в р-травнику.

Проведення процесу розгонки бору без попереднього видалення боросилікатного скла (тобто за наявності на поверхні пластин шару боросилікатного скла) в інертному середовищі практично виключає утворення окислювальних дефектів упакування в кремнії. В процесі розгонки бору, що проводиться в інертному середовищі, здійснюється ефективне гетерування шаром боросилікатного скла структурних дефектів, що раніше утворилися, і домішок, що забруднюють поверхню пластин. При цьому істотно покращуються електричні характеристики захисного шару двоокису кремнію і, як наслідок, покращуються зворотні характеристики $p^+ - n$ переходів областей охоронного кільця і структур діодів Шотткі.

В таблиці 2 приведені результати контролю партій діодів Шотткі виготовлених за базовою та запропонованою технологіями.

Таблиця 2

Результати контролю параметрів структур діода Шотткі

Метод виготовлення діода Шотткі з охоронним кільцем	Номер технологічної партії	Середній рівень напруги пробую р ⁺ - п переходів областей охоронного кільця в технологічній партії ($U_{проб}$), В	Вихід придатних діодних структур, %
Разроблена технологія	1	55	89
	2	53	86
	3	53	88
	4	54	90
	5	52	87
Базова технологія	6	48	83
	7	49	85
	8	45	79
	9	46	82
	10	47	82

Порівнюючи отримані результати, можна зробити висновок про істотне поліпшення зворотних характеристик структур діода Шотткі, виготовлених з використанням гетерування, в порівнянні із структурами діодів, виготовлених за базовою технологією. Застосування розробленої технології дає можливість підвищити рівень пробивної напруги р⁺- п переходів областей охоронного кільця в середньому на 6,4 В і збільшити вихід придатних діодних структур на 5,8%. За розробленою технологією були виготовлені експериментальні партії діода Шотткі і отриманий розподіл по рівнях зворотних струмів діодів (рис. 3). Критерій придатності по зворотному струму складає: $I_{зв} \leq 1 \text{ мА}$ при зворотній напрузі 40В.

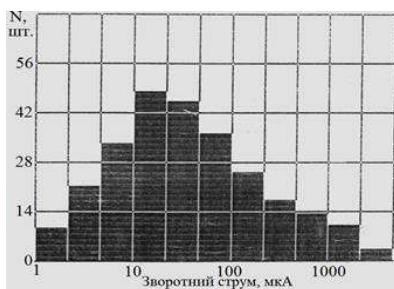


Рис. 3. Гістограма розподілу по рівнях зворотних струмів ДШ, виготовлених відповідно до розробленої технології ($U_{зв} = 40\text{В}$)

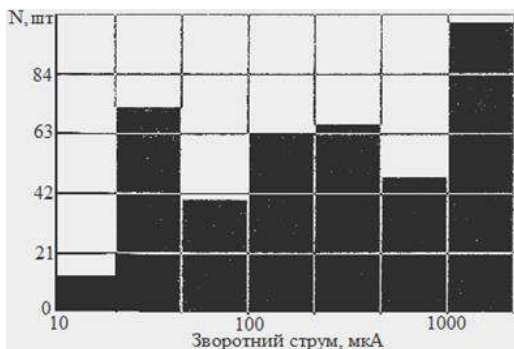


Рис. 4. Гістограма розподілу величини зворотного струму ДШ, виготовлених за базовою технологією, при зворотній напрузі 40В

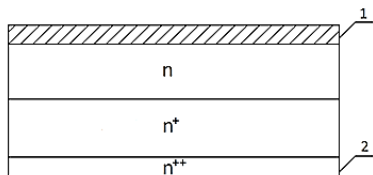
Порівнюючи отриману гістограму (рис. 3) з гістограмою для діодів Шотткі, виготовлених за базовою технологією (рис. 4), можна зробити наступні висновки. Тільки близько 5% випробовуваних діодів мають рівні зворотних струмів, що не задовольняють критерію придатності. Основна маса діодів (біля 2/3 загальної кількості діодів) мають порівняно невисокі рівні зворотних струмів : від 1 до 100мкА. Граничні рівні зворотних струмів (від 100 до 1000 мкА) мають тільки трохи більше 1/5 частини від загальної кількості діодів. Таким чином, розподіл по зворотному струму діодів, виготовлених за запропонованою технологією, значно краще (зменшився середній рівень зворотних струмів діодів), ніж розподіл діодів, виготовлених за базовою технологією, що визначило значне підвищення виходу придатних діодів при використанні розробленої технології.

1.3. Розробка методу гетерування за допомогою іонного легування зворотної сторони пластин фосфором в технології діодів Шотткі з охоронним кільцем

Застосування розробленої технологія виготовлення діодів Шотткі з охоронним кільцем, розглянутої в § 1.2, дає можливість істотно підвищити вихід придатних діодних структур. Проте вона має і істотні недоліки. Гетерування шаром боросилікатного скла структурних дефектів і небажаних домішок в процесі розгонки бору проводиться в середині технологічного маршруту виготовлення діода, а точніше в процесі проведення останньої

високотемпературної технологічної операції. Упродовж технологічного маршруту виготовлення приладу до розгонки бору проводилися такі високотемпературні технологічні операції як термічне окислення пластин і загонка бору. В процесі проведення кожної з цих технологічних операцій можуть утворюватися зародки структурних дефектів і самі дефекти, які призводять до збільшення рівня зворотних струмів діодів і істотного зниження виходу придатних приладів. Тому, очевидно, необхідно додатково проводити операції гетерування на більш ранніх стадіях виготовлення приладу.

Були випробувані різні методи гетерування структурних дефектів, а також були проведені роботи по вибору етапу технологічного маршруту виготовлення діодів Шотткі з охоронним кільцем, на якому слід було проводити процес гетерування. В результаті проведених експериментальних робіт, був вибраний оптимальний варіант гетерування. Розроблена технологія виготовлення діодів Шотткі з охоронним кільцем полягала в наступному [9]. Кремнієві структури n- типу провідності з епітаксійним шаром, легованим фосфором, завтовшки 5,5 мкм і питомим опором 1,1 Ом·см, сформованих на підкладці, легованій сурмою, яка має товщину 350 мкм і питомий опір 0,01 Ом·см, після стандартної хімічної обробки окислюють при температурі 1050°C з наступним чергуванням циклу : відпал в середовищі аргону (15 хвилин) – окислення в парах води (100 хвилин) – відпал в середовищі аргону (30 хвилин). Товщина вирощеного захисного шару двоокису кремнію 1 (рис. 5) складала 0,7 мкм. Далі на зворотному боці пластини проводять формування області гетера наступним чином. На робочу сторону пластин наносять фоторезист ФП383, видалають плівку двоокису кремнію на зворотному боці пластини за допомогою травлення в плавиковій кислоті, проводять формування області гетера 2 методом іонного легування зворотної сторони пластин фосфором при дозі $7 \cdot 10^{14} - 10^{16} \text{см}^{-2}$ і енергії іонів 100 кеВ. При цьому плівка фоторезисту захищає робочу сторону пластин від забруднення іонами фосфору і інших домішок.



**Рис. 5. Кремнієва структура після формування області гетера:
1 – плівка двоокису кремнія; 2 – область гетера**

Після цього на робочій стороні пластин проводять I фотолітографію – відкривають вікна в шарі двооксиду кремнію під охоронне кільце. Далі після хімічної обробки пластин з метою формування p^+ - n переходу області охоронного кільця проводять першу стадію дифузії бору методом відкритої труби з джерела домішки B_2O_3 при температурі $1050^\circ C$ протягом 30 хвилин в суміші аргону (100 л/г) і сухого кисню (4 л/г) та другу стадію дифузії бору при тій же температурі в середовищі аргону (125 л/г) на протязі 65 хвилин.

Після завершення формування p^+ - n переходу області охоронного кільця проводять видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти і II фотолітографію для розкриття вікон під контакт Шотткі. Після хімічної обробки на робочу сторону пластин методом вакуумного термічного випару послідовно осаджують шари молібдену 3 завтовшки 0,08 мкм і нікелю 4 завтовшки 0,12 мкм і проводять за допомогою III фотолітографії формування випрямляючих контактів. Шліфують пластину з боку підкладки (зворотна сторона пластини), зменшивши її товщину до 180-200 мкм, і формують на ній омичний контакт послідовним нанесенням шарів титану 5 завтовшки 0,015 мкм, нікелю 4 завтовшки 0,035 мкм методом вакуумного термічного випару і золота 6 завтовшки 1,5 мкм методом гальванічного осадження, при цьому золото одночасно осідає на обидві сторони пластини.

У результаті виконання всіх цих операцій було отримано структуру діода Шотткі, що наведена на рис. 6.

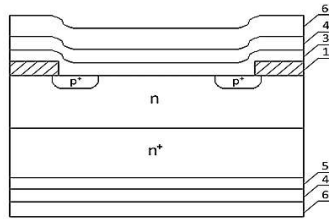


Рис. 6. Структура діода Шотткі з охоронним кільцем, що виготовлена за базовою технологією: 1 – плівка двоокису кремнію; 3 – шар молибдену; 4 – шар нікелю; 5 – шар титану; 6 – шар золота

Для випробування запропонованого способу виготовлення структур з бар'єром Шотткі були сформовані експериментальні партії, кожна з яких ділилася навпіл: одна частина партії була виготовлена відомим способом, інша – запропонованим способом.

Ефективність використання розробленого способу оцінювалася по відсотку виходу придатних діодних структур при їх контролі по зворотному струму ($I_{зв}$). Критерій придатності $I_{зв} \leq 1$ мА при зворотній напрузі 40 В. Порівняльні характеристики запропонованого і відомого способів виготовлення діодних структур приведені в таблиці 3. Отримані результати показали (таблиця 3), що використання запропонованого способу виготовлення діодів Шотткі з охоронним кільцем дозволяє підвищити вихід придатних діодних структур по зворотному струму приблизно на 10 %. При цьому діодні структури, виготовлені запропонованим способом, мали рівень зворотних струмів в 3 – 9 разів нижчий в порівнянні з діодними структурами, виготовленими за базовою технологією.

Ефективність застосування розробленої технології полягає в наступному. Після проведення хімічної обробки початкових кремнієвих пластин і термічного окислення на зворотному боці пластин додатково створюється високолегований фосфором геттерируючий шар проведенням іонної імплантації фосфору. В процесі подальших високотемпературних операцій (першої і другої стадій дифузії бору) відбувається ефективне гетерування домішок металів сформованим на зворотному боці пластин гетеруючим шаром, пригнічуються зародки дефектів упакування, які утворилися в процесах епітаксії і термічного окислення, що великою мірою запобігає утворенню ОДУ в кремнії.

Таблиця 3

Вплив гетерування на зворотні струми діодів

Технологія виготовлення структур діода Шотткі	Номер експериментальної партії	Вихід придатних діодних структур по зворотному струму, %
Розроблена технологія виготовлення	1	97
	2	95
	3	96
Базова технологія виготовлення	1*	85
	2*	87
	3*	85

Дія створеного на зворотному боці пластини гетеруючого шару полягає в тому, що міжвузольні атоми кремнію, які є складовими окислювальних дефектів упакування, що утворились в процесі термічного окислення кремнію, дифундують до утвореної області гетера і захоплюються нею. У результаті цього окислювальні дефекти упакування зменшуються в розмірах, або повністю зникають.

2. Використання методів гетерування структурних дефектів і домішок в технології кремнієвих варикапів

2.1. Покращання параметрів кремнієвого варикапа зі зворотним градієнтом концентрації фосфору в базі за рахунок використання лазерного гетерування

Варикапи широко використовуються в радіоелектроніці в якості змінної ємності, величина якої керується напругою [10]. Основними параметрами варикапа являються його добротність, номінальна ємність, зворотний струм і коефіцієнт перекриття по ємності, який визначає частотний діапазон використання варикапа. Проблемою технології виготовлення варикапів зі зворотним градієнтом концентрації домішки у базі являється значний розкид значень ємності варикапних структур по площі пластини і високі рівні їх зворотних струмів. Проведені дослідження непридатних по зворотному струму структур варикапів показали наявність в їх активних областях високої щільності ОДУ. Після проведення кожної високотемпературної операції на структурах виконувалися металографічні дослідження їх кристалічної структури. Виявлення структурних

дефектів в структурах варикапів проводилося за допомогою їх травлення в реактиві Сіртла на протязі 10...180 с. Встановлення виду структурних дефектів і оцінка їх щільності проводилася за допомогою металографічного мікроскопа МЕТАМ-1. Вже після термічного окислення кремнію в структурах варикапів були виявлені ОДУ щільністю до $10^2...10^3\text{см}^{-2}$. Після останньої високотемпературної операції – загонки бору щільність структурних дефектів зростає до $10^5...10^6\text{см}^{-2}$.

Мікрофотографія поверхні однієї з досліджуваних структур після селективного травлення в реактиві Сіртла впродовж 20 с приведена на рис. 7.

Наявність ОДУ в кремнії викликає в процесі дифузії бору з одного боку нерівномірність глибини залягання р – n переходу по площі пластини, що ще більше збільшує розкид значень ємності варикапних структур по площі пластини, і призводить до збільшення рівня зворотних струмів варикапів з іншого боку. З метою підвищення виходу придатних варикапних структур шляхом зменшення розкиду значень ємності варикапних структур по площі пластини і зменшення рівня їх зворотних струмів були випробувані різні методи гетерування структурних дефектів.



Рис. 7. Поверхня варикапної структури з виявленими ОДУ

Також були проведені роботи по вибору етапу технологічного маршруту виготовлення варикапу, на якому слід було проводити процес гетерування. В результаті проведених експериментальних робіт, був вибраний оптимальний варіант гетерування. Розроблена технологія виготовлення варикапу із зворотним градієнтом концентрації домішки у базі полягала в наступному [11]. На робочу сторону кремнієвої епітаксійної структури n-, легованої фосфором товщиною 8 мкм і питомим опором 20 Ом·см, сформованою на легованій сурмою підкладці n+, яка має товщину 350 мкм і питомий опір 0,01 Ом·см, після стандартної хімічної

обробки наносять плівку фоторезисту ФП383 1 (рис. 8) і проводять формування області гетера 2 на зворотному боці пластин. Плівка фоторезиста захищає робочу сторону пластини від забруднення домішками в процесі формування області гетера на зворотному боці пластини.

Область гетера була сформована за допомогою обробки зворотної сторони пластин лазером при щільності випромінювання 12 Дж/см^2 з подальшим відпалом пластин при температурі 1050°C в середовищі аргону (140 л/ч) і кисню (10 л/ч) упродовж 40 хв. Для обробки кремнієвих пластин використовувався Nd – лазер типу ЛТН- 102 [12]. Довжина хвилі лазерного випромінювання складала $\lambda=1,06 \text{ мкм}$, швидкість сканування лазерного променя по поверхні неробочої сторони пластин – $0,5 \text{ м/с}$.

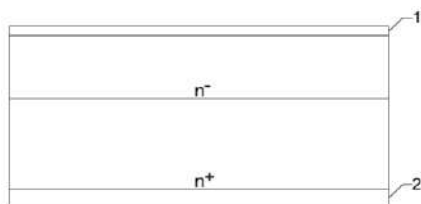


Рис. 8. Кремнієва епітаксіальна структура після формування області гетера 2 на зворотній стороні пластини

Обробка лазером проводилася в режимі теплового потоку при безперервному лазерному випромінюванні, що забезпечувало плавлення кремнію, виключивши його випар. Проведена лазерна обробка призводить до виникнення напруги розтягування в кремнієвій пластині [13]. Подальша термообробка при температурі 1050°C в середовищі аргону і кисню призводить до рекристалізації поверхні зворотної сторони пластини з утворенням сітки дислокацій в області дії лазерного випромінювання. Области порушень кристалічної структури на неробочій стороні пластини є стоком для точкових дефектів-вакансій і атомів швидкодифундуючих домішок металів. Ці дефекти, що мають коефіцієнти дифузії на декілька порядків вищі від коефіцієнтів дифузії легуючих домішок, таких як бор, фосфор або сурма, при термообробці мігрують по об'єму напівпровідникової пластини і, потрапляючи в шар з порушеною кристалічною структурою, осідають на структурних дефектах.

Після формування області гетера і високотемпературного відпалу пластин було проведено видалення захисної плівки фоторезисту, попередньо нанесену на робочу сторону пластин, в сірчано – перекисному розчині.

Для виготовлення варикапних структур проводились наступні основні технологічні операції. Стандартна хімічна обробка пластин і їх окислення при температурі 1323К в парах води впродовж 100 хв і послідовний відпал пластин в середовищі аргону впродовж 30 хв при температурі окислення. Товщина вирощеного шару двоокису кремнію 3 складала приблизно 0,7 мкм. Після цього проводять II фотолітографію для розкриття в оксидній плівці вікон діаметром 1040 мкм, іонне легування фосфором при дозі легування 35 мкКл/см² і прискорюючій напрузі 50 кВ, термообробку пластин при температурі 723К впродовж 50 хв в атмосфері: сухий кисень (20 хв) і аргон (30 хв). Далі після хімічного очищення пластин проводять розгонку фосфору при температурі 1373К впродовж 55 хвилин (10 хв в сухому кисні і 45 хв в аргоні) з утворенням на поверхні кремнієвих пластин плівки фосфоросилікатного скла 4. Проводять II фотолітографію для розкриття вікон в плівці фосфоросилікатного скла і двоокису кремнію діаметром 1050 мкм, хімічне очищення пластин, загонку бору при T=1343К впродовж 30 хвилин в атмосфері аргону і кисню, III фотолітографію для розкриття вікон в плівці боросилікатного скла 5 діаметром 1010 мкм, осадження плівки алюмінію 6 у вакуумі (товщина плівки алюмінію близько 1 мкм); IV фотолітографію по плівці алюмінію з діаметром вікна 1030 мкм і відпал кремнієвих пластин для отримання омичного контакту кремнію з алюмінієм. Шліфують пластини з боку підкладки (зворотний бік пластини), зменшивши її товщину до 175...190 мкм, і формують на ній омичний контакт послідовним нанесенням шарів титану 7, завтовшки 0,015 мкм і нікелю 8 завтовшки 0,035 мкм методом вакуумного термічного випару і золота 9 завтовшки 1,5 мкм методом гальванічного осадження.

У результаті проведених технологічних операцій одержують структуру варикапа, приведену на рис. 9.

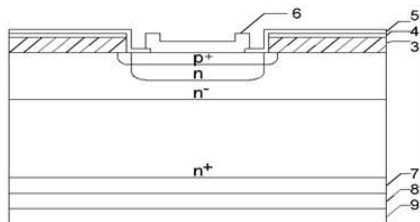


Рис. 9. Структура варикапа зі зворотним градієнтом концентрації домішки в базі: 3 – плівка двоокису кремнію; 4 – плівка фосфоросилікатного скла; 5 – плівка боросилікатного скла; 6 – плівка алюмінію (омічний контакт); 7 – шар титану; 8 – шар нікелю; 9 – шар золота

Ефективність застосування розробленої технології полягає в наступному. Перед проведенням термічного окислення на зворотному боці пластин додатково створюють гетеруючий шар способом обробки зворотної сторони пластини лазером.

В процесі наступних високотемпературних операцій (термічне окислення, розгонка фосфору, дифузія бору) відбувається ефективне гетерування домішок металів утвореним гетеруючим шаром, пригнічуються зародки дефектів упакування, які утворилися при вирощуванні зливків і в процесі епітаксії, що великою мірою запобігає що в великій мірі запобігає утворенню нових та ліквідації раніше утворених ОДУ в кремнії. Ефективне гетерування гетеруючим шаром домішок металів і структурних дефектів забезпечує значне зменшення розкиду значень ємності варикапних структур по площі пластини і зменшення рівня їх зворотних струмів. Для випробування розробленої технології виготовлення структур варикапа із зворотним градієнтом концентрації домішки у базі були виготовлені експериментальні партії, кожна з яких ділилася на дві частини: одна частина партії була виготовлена за базовою технологією, друга – за розробленою технологією. Ефективність використання запропонованої технології оцінювалася: 1) по відсотку виходу придатних варикапних структур на контролі зворотного струму ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 0,2$ мкА при зворотній напрузі 16 В. 2) по відсотку виходу придатних структур варикапів на контролі величини номінальної ємності (критерій придатності: номінальна ємність варикапної структури при зворотній напрузі 1 В повинна знаходитися в межах 510...608 пФ). Очевидно, що відсоток виходу

придатних структур обернено пропорційний до розкиду значень номінальної ємності структур по площі пластини.

У таблиці 4 приведені порівняльні результати контролю по рівню зворотного струму варикапів, виготовлених за базовою (партії №1, 2) і розробленою (партії №3, 4) технологіями. Видно, що використання розробленої технології виготовлення варикапів дозволяє підвищити вихід придатних структур по зворотному струму в середньому на 7,5%. При цьому структури варикапів, виготовлені із застосуванням розробленої технології, мали рівень зворотних струмів в 2...5 разу нижче в порівнянні зі структурами, виготовленими за базовою технологією.

Таблиця 4

**Порівняльні характеристики базової
і розробленої технологій**

Технологія виготовлення варикапних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних варикапів по зворотному струму, %
Без використання гетерування	1	91
	2	89
З використанням лазерного гетерування	3	97
	4	98

У таблиці 5 приведені порівняльні результати контролю за значенням номінальної ємності варикапів, виготовлених за базовою (партії № 5, 6) і розробленою (партії № 7, 8) технологіями. Видно, що використання запропонованої технології виготовлення варикапів дає можливість підвищити вихід придатних структур в середньому на 7,3%, що побічно підтверджує зменшення розкиду значень номінальної ємності структур варикапів по площі пластини.

Металографічні дослідження, виконані перед формуванням омичного контакту на робочій стороні пластин, на структурах, виготовлених за розробленою технологією, показали відсутність ОДУ.

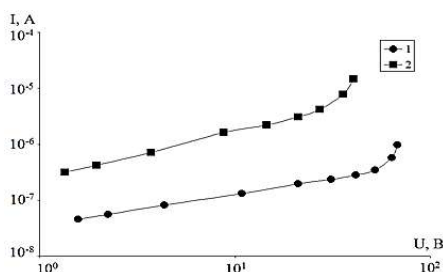
Таблиця 5

**Залежність виходу придатних структур варикапів
по значенням їх номінальної ємності
від технології їх виготовлення**

Технологія виготовлення варикапних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних варикапів по значенням номінальної ємності, %
Без використання гетерування	5	42,1
	6	43,8
З використанням лазерного гетерування	7	48,5
	8	51,9

На рис. 10 приведені зворотні гілки вольт-амперної характеристики (ВАХ) варикапів, виготовлених за базовою технологією, а також при використанні лазерного гетерування. Видно, що застосування гетерування дає можливість істотно знизити рівень зворотних струмів діодів.

Вплив створеного за допомогою лазера гетеруючого шару на параметри варикапної структури можна пояснити таким чином. В процесі проведення подальших після створення гетера високотемпературних операцій (термічне окислення, розгонка фосфору, дифузія бору) відбувається ефективно гетерування домішок металів створеним на зворотному боці пластин шаром гетера, усуваються зародки структурних дефектів, які утворилися при вирощуванні зливків і в процесі епітаксії, що великою мірою запобігає утворенню нових і ліквідації дефектів, що уже утворились.



**Рис. 10. Вольт-амперні характеристики структур варикапів:
1 – виготовленої з використанням лазерного гетерування;
2 – базова технологія**

При цьому міжвузольні атоми кремнію, які утворюють ОДУ, дифундують до створеної області гетера і захоплюються нею. В результаті цього ОДУ, що раніше утворилися, зменшуються в розмірах або повністю зникають. Ефективне гетерування домішок металів і структурних дефектів забезпечує значне зменшення розкиду значень номінальної ємності варикапних структур по площі пластини (за рахунок більш рівномірної дифузії фосфору по площі пластини в процесі формування зворотного градієнта концентрації домішки у базі структури варикапу і більш рівного фронту дифузії бору при створенні р-п переходу), а також значне зменшення рівня зворотних струмів варикапів, підвищення якого було пов'язане з впливом дефектів.

2.2. Проблеми формування нікелевого омичного контакту у виробництві варикапів

Для з'ясування причин аномально високих рівнів зворотних струмів у виробництві варикапів з нікелевим омичним контактом були запуснені експериментальні партії. Як вихідний матеріал використали кремнієві епітаксійні структури товщиною 11 мкм і питомим опором 1,7 Ом·см. Структури варикапів виготовляли за планарно – епітаксальною технологією [14]. Омичні контакти на варикапних структурах отримували шляхом хімічного осадження нікелю з подальшою термообробкою в інертному середовищі в діапазоні температур 400...700°C.

З метою виявлення причини різкого збільшення рівня зворотних струмів діодних структур після відпалу нікелевої плівки були проведені металографічні дослідження. Для цього після проведення розгонки бору і видалення оксиду в розчині плавикової кислоти пластини були піддані селективному травленню в реактиві Сіртла впродовж 15 с. Після такої обробки проводилося дослідження дефектів структури за допомогою металографічного мікроскопа. В активних областях діодних структур були виявлені ОДУ, щільність яких була в межах $10^4...10^5$ см⁻².

Для запобігання впливу процесу формування нікелевого омичного контакту на зворотні характеристики варикапів були випробувані різні методи гетерування дефектів та домішок. Найбільш ефективним виявився метод, який полягав в наступному: перед хімічним осадженням нікелю проводили додаткову дифузю бору в робочу сторону пластин при $T=1050^\circ\text{C}$ впродовж 30 хв [15].

Зворотні гілки ВАХ варикапних структур, виготовлених на частинах однієї пластини представлені на рис. 11. Видно, що після термообробки зворотна гілка ВАХ варикапної структури, виготовленої з використанням додаткової дифузії бору, практично не змінилася, а у структури, виготовленої за стандартною технологією, сталося різке "пом'якшення" ВАХ.

Механізм впливу ОДУ на зворотні струми досліджуваних варикапних структур можна пояснити таким чином. Недекоровані атомами домішок ОДУ не спричиняють істотного впливу на зворотні струми діодних структур, внаслідок їх слабкої електричної активності (криві 1 на рис.10, а і рис. 11, б). Відомо [16], що потік атомів домішки від поверхні в глиб твердого тіла пропорційний її коефіцієнту дифузії і величині граничної розчинності, принаймні, біля поверхні твердого тіла.

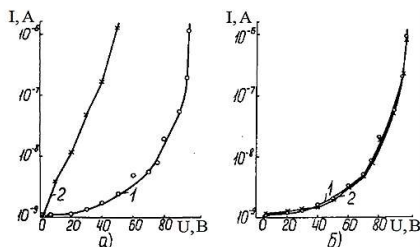


Рис. 11. Зворотні гілки ВАХ варикапних структур після хімічного осадження нікелю (1) і подальшої термообробки (2): а – виготовлених без використання гетерування (стандартна технологія); б – використання гетерування за допомогою дифузійного легування бором

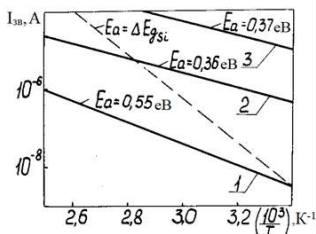


Рис. 12. Температурні залежності зворотного струму варикапної структури при різних тривалостях термообробки ($T=400^{\circ}\text{C}$) – t, с: 1– 0; 2 – 150; 3 – 360

Внаслідок високої концентрації ОДУ в кремнії, обидва ці параметри зростають, що призводить до збільшення дифузійного потоку атомів домішки (в даному випадку атомів нікелю) в глиб зразка – до області p^+ - n переходу. При цьому атоми нікелю осідають на ОДУ, різко збільшуючи їх електричну активність, що доводить дослідження температурної залежності зворотного струму варикапних структур (рис. 12).

Як впливає з рис. 12, температурна залежність зворотного струму варикапної структури до проведення термообробки характеризується енергією активації рівній 0,55 еВ. Така величина енергії активації відповідає процесу генерації носіїв струму в області просторового заряду p^+ - n переходу через центри, пов'язані з дефектами дислокаційного типу. Зниження енергії активації носіїв струму до 0,36-0,37 еВ після термообробки варикапної структури (рис. 12) відповідає спільному впливу структурних дефектів і нікелю, що проникає в область об'ємного заряду p^+ - n переходу і декорує ОДУ [16]. Дослідження енергетичного спектру носіїв заряду методом DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) підтвердило присутність в варикапних структурах, які пройшли термообробку, глибоких центрів, що відповідають атомам нікелю.

Вплив нікелю на зворотний струм p^+ - n переходу пов'язаний з утворенням ним в забороненій зоні кремнію двох акцепторних рівнів, які викликають додаткову генерацію носіїв струму в області просторового заряду p^+ - n переходу [16]. З цим пов'язане різке збільшення після термообробки рівня зворотних струмів варикапної структури, виготовленої без використання гетерування (рис. 11, а, крива 2).

З метою коректного обґрунтування механізму впливу гетерування за допомогою проведення додаткової дифузії бору на зворотні струми варикапних структур, останні виготовлялися на половинках пластин. Причому на одній з половинок кожної пластини проводилася додаткова дифузія бору. Потім обидві половинки пластини піддавалися селективному травленню. На рис. 13 наведено мікрофотографії поверхні досліджуваних структур після травлення. Видно, що на варикапній структурі, виготовленій з використанням гетерування, щільність ОДУ істотно нижча. Отриманий результат можна пояснити наступним чином. В процесі проведення додаткової дифузії бору в приповерхневій області варикапних структур формується

сильнолегований бором r^+ – гетеруючий шар. При цьому міжвузольні атоми кремнію, що складають ОДУ, дифундують до створеної області гетера і захоплюються нею. В результаті цього раніше утворені ОДУ зменшуються в розмірах або повністю зникають (рис. 13, б). Крім того високолегований r^{+} шар може поглинати в процесі термообробки надлишкові атоми нікелю з області r^+ – n переходу. Це дозволяє запобігти зміні зворотної гілки ВАХ варикапних структур, що спостерігається після термообробки (рис. 11, б, крива 2).

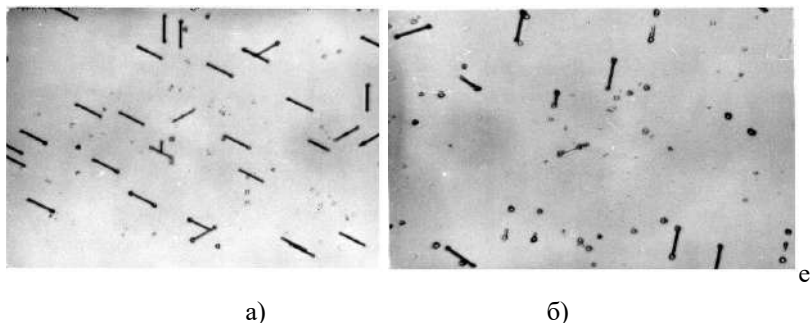


Рис. 13. Мікрофотографії поверхні структур варикапів після селективного травлення: а – структура варикапа, виготовленого за стандартною технологією; б – структура варикапа, виготовленого з використанням додаткової дифузії бору при $T = 1025^{\circ}\text{C}$

Таким чином, різке підвищення рівня зворотних струмів варикапних структур в процесі їх термообробки пов'язано зі збільшенням концентрації атомів нікелю в області r^+ – n переходу за рахунок збільшення їх дифузійного потоку від поверхні в глиб зразка, обумовленого ОДУ. Відсутність зміни зворотної гілки ВАХ після термообробки варикапних структур, виготовлених з використанням додаткової дифузії бору, пояснюється гетеруванням високолегованим r^+ – шаром ОДУ в процесі дифузії, а також поглинанням ним надлишкових атомів нікелю з області r^+ – n переходу, в процесі термообробки.

2.3. Проблеми формування алюмінієвого омічного контакту у виробництві варикапів

В якості матеріалів для одержання омичних контактів до варикапних структур, зазвичай, використовуються нікель або алюміній. Алюміній має високу електропровідність, дешевий і пластичний (тобто добре переносить термоциклування). Цей метал легко напилюється, добре піддається травленню і забезпечує високу роздільну здатність при фотолітографії. Крім того, алюміній придатний для використання в радіаційно-стійких приладах. Але, як показала практика, при використанні омичного контакту на основі алюмінію може мати місце деградація зворотної гілки вольт-амперної характеристики варикапу. Встановлено [17; 18], що причиною частих відмов напівпровідникових приладів з алюмінієвою металізацією є прокол р-п переходів алюмінієм при термообробці після осадження плівки алюмінію. Селективне видалення плівки алюмінію з поверхні підкладки в області контактного вікна після термообробки при 470°C протягом 30 хв. виявляє катастрофічне погіршення морфологічної досконалості міжфазної межі контакту у вигляді глибоких порожнин в кремнії.

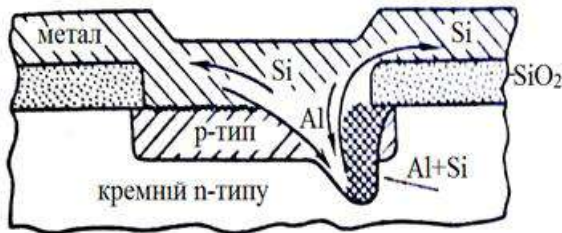


Рис. 14. Схема розчинення кремнію алюмінієвою плівкою: неоднорідне розчинення кремнію плівкою алюмінію, утворення пустот в кремнії, заповнення алюмінієм пустот, в результаті чого відбувається прокол р-п переходу [18]

Автори роботи [18] стверджують, що виникнення проколів р-п переходів пов'язано із зазначеними вакансійними порожнечами, що утворюються як результат неоднорідного розчинення кремнію в алюмінії (рис.14). Ці порожнечі заповнюються алюмінієм з розчиненим у ньому кремнієм і можуть призвести до короткого замикання р-п переходів.

Глибина проникнення вістря алюмінію вглиб кремнію, що оцінюється за глибиною пустот в локальних місцях області контакту, практично не змінюється в діапазоні 300-500°C і становить 40-90 нм [17]. У діапазоні температур 500-577°C відбувається різке зростання глибини проникнення до 1,25-1,45 мкм.

В роботі [17] зроблено припущення, що неоднорідне розчинення кремнію і заповнення пустот, що утворюються, алюмінієм, а також відзначене різке зростання глибини проникнення алюмінію вглиб кремнію в діапазоні температур 500-577°C викликані появою рідкої фази, яка «проплавляє» кремній, хоча температура термообробки нижча ніж, температура плавлення евтектики. Автори роботи [17] пропонують для запобігання в процесі термообробки активної взаємодії алюмінію з кремнієм проводити швидкий термічний відпал півки алюмінію після її осадження на поверхню варикапної структури, при якому температура виявляється досить високою, щоб утворилася рідка фаза, але тривалість – мала, щоб відбулося інтенсивне розчинення кремнію в алюмінії, і виникли проплавлення. Використання методу швидкого термічного відпалу, як вказують самі автори [17], не гарантує запобігання явищу проникнення алюмінію в область р-п переходу діода, так як на наступних операціях технологічного процесу, вже не пов'язаних з формуванням металізації, необхідно проводити довготривалі відпали, в результаті яких також ймовірно виникнення проплавлення. Як приклад можна привести операцію складання кристалів в корпуси, яка зазвичай відбувається при температурі $\geq 510^\circ\text{C}$.

Інший шлях вирішення проблеми взаємодії між алюмінієм і кремнієм, розглянутий в роботах [17; 18], полягає в додатковому легуванні півки алюмінію кремнієм до концентрацій в межах існування області твердого розчину. Цей спосіб дозволяє трохи знизити активність взаємодії між алюмінієм і кремнієм, проте не усуває саму взаємодію. Як результат, підвищення температури на наступних стадіях процесу може спричинити нерівноважний масоперенос і збільшити глибину проникнення алюмінію в кремній. Крім того, цей спосіб не може забезпечити рівновагу з локальними особливостями кристала, наприклад – дефектами і, таким чином, не може усунути міграцію алюмінію вздовж них.

Відповідно до сказаного вище, причина неоднорідного розчинення кремнію в алюмінії остаточно не встановлена.

Запропоновані способи запобігання глибокому проникненню алюмінію в кремній під час відпалу металізації алюмінію [17; 18] не є оптимальними для вирішення цієї проблеми.

У зв'язку з цим, необхідно було: 1) з'ясувати додаткові причини локального проникнення алюмінію в кремній в процесі формування алюмінієвого омичного контакту на варикапних структурах і, як наслідок, 2) розробити ефективний технологічний метод, направлений на запобігання негативного впливу процесу формування омичного контакту на основі алюмінію на зворотну гілку ВАХ варикапів.

Структури досліджуваних варикапів виготовлялися за стандартною планарно-епітаксialною технологією [14]. Для проведення епітаксialного процесу використовувались кремнієві підкладки, леговані стибієм, з потовим опором 0,01 Ом·см, орієнтовані по площині (111). Для нарощування епітаксialних шарів на підготовлених підкладках використовувався хлоридний метод епітаксії. Температура епітаксialного процесу склала 1150°C. Отримані епітаксialні структури мали питомий опір 1,3 Ом·см і товщину 7 мкм. Далі варикапні структури були проведені за стандартним технологічним маршрутом [14]. Формування омичного контакту на структурах варикапів з їх робочої сторони проводилось наступним чином: осадження плівки алюмінію (Al) в вакуумі, проведення фотолітографії по шару алюмінію і відпал контакту в інертному середовищі при $T=560^{\circ}\text{C}$ на протязі 14 хвилин.

У результаті виконання перерахованих операцій одержуємо структуру варикапа, приведено на рис. 15.

Для з'ясування причин деградації зворотних характеристик варикапів в процесі термообробки варикапних структур, зі сформованою за допомогою фотолітографії плівкою алюмінію, були проведені металографічні дослідження варикапних структур, відбракованих на контролі рівня їх зворотних струмів.

Для виявлення структурних дефектів використовувався реактив Сіртла, тривалість селективного травлення складала від 10 с до 20 хв. Встановлення виду структурних дефектів і оцінка їх щільності проводилися за допомогою металографічного мікроскопа «Метам-1».

На вихідних епітаксialних структурах ще до проведення першої високотемпературної операції – термічного окислення – були виявлені епітаксialні дефекти упакування (рис. 16), щільність яких

склала 10^4 - 10^5 см⁻² (час селективного травлення структур в реактиві Сіртла склав 1,5 хв) та дислокації (рис. 17), які мали щільність 10^3 - 10^4 см⁻² (час травлення в реактиві Сіртла склав 2 хв).

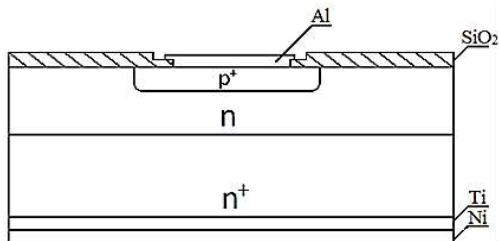


Рис. 15. Структура варикапа



Рис. 16. Поверхня кремнієвої епітаксильної структури з виявленими епітаксильними дефектами упаковки



Рис. 17. Поверхня кремнієвої епітаксильної структури з виявленими дислокаціями

Після термічного окислення і видалення шару SiO₂ в епітаксильних структурах були виявлені окислювальні дефекти

упакування щільністю до 10^5 см⁻², при цьому час травлення структур в реактиві Сіртла склав 20с (рис. 18).



Рис. 18. Мікрофотографія поверхні епітаксильної структури після термічного окислення і проведення селективного травлення

Можна зробити припущення, що виявлені структурні дефекти викликають підвищення граничної розчинності алюмінію при температурі відпалу плівки алюмінію, який проводиться після її осадження на поверхню варикапних структур і наступного проведення фотолітографії, та збільшення коефіцієнта дифузії алюмінію в кремнії вздовж дефектів. Ці два ефекти обумовлюють локальне проникнення алюмінію в область р-п переходу варикапу при відпалі плівки алюмінію під час формування контактів, що може бути причиною деградації зворотних характеристик. Підтвердженням цьому є результати дослідження процесів утворення і направленої міграції розплавлених зон типу метал-напівпровідник в монокристалічному кремнії в присутності поля градієнта щільності дислокацій [19]. В результаті досліджень встановлено, що виникнення розплавлених зон в обсязі матриці при відпалі пов'язано з процесами утворення сплавів домішок металеві плівки (тобто алюмінію) з монокристалом на границі розділу метал-напівпровідник. Як стверджують автори роботи [19], переміщення домішки в об'ємі напівпровідника здійснювалося у вигляді розплавлених включень за рахунок різниці хімічних потенціалів атомів на "тильній" і "лобовій" границях включення.

Для запобігання утворенню структурних дефектів необхідно було вибрати ефективний метод гетерування. Оскільки структурні дефекти утворюються, починаючи з процесу епітаксії,

очевидно, що область гетера необхідно створювати в підкладках, на які будуть осаджуватись епітаксialьні шари. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню структурних дефектів в епітаксialьних шарах є створення гетеруючої області на зворотному боці підкладок за допомогою імплантації в неї іонів фосфору [20]. Область гетера була сформована на зворотному боці підкладки імплантацією іонів фосфору з енергією 100 кеВ, дозою $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на установці «Везувій-5». Далі на робочу сторону підкладок при $T=1150^\circ\text{C}$ осаджували епітаксialьний шар хлоридним методом на установці УНЭС-2П-КА. Виготовлення епітаксialьних структур було проведено по технологічному маршруту, наведеному вище.

Для дослідження ефективності розробленої технології були сформовані дві експериментальні партії варикапних структур, які були поділені на дві рівні частини. Одна частина структур в кожній партії була виготовлена за базовою технологією, інша – з використанням гетерування. Ефективність використання розробленої технології оцінювалася по виходу придатних варикапних структур на контролі зворотного струму $I_{зв}$, за результатами металографічних досліджень і за рівнем зворотного струму.

Критерій придатності: $I_{зв} \leq 0,5 \text{ мкА}$ при зворотній напрузі 30 В. В таблиці 6 приведені порівняльні результати контролю по рівню зворотного струму діодів, виготовлених за базовою і розробленою технологіями. Видно, що застосування гетерування дає можливість в середньому на 10,7% підвищити вихід придатних варикапів. При цьому варикапні структури, виготовлені з використанням гетерування, мали рівні зворотних струмів в 4-5 разів менше у порівнянні з виготовленими за базовою технологією.

Таблиця 6

**Порівняльні характеристики базової
і розробленої технологій**

Технологія виготовлення варикапних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних варикапних структур на контролі рівня їх зворотних струмів, %
Виготовлених за базовою технологією	1	83,9
Виготовлених з використанням гетерування	2	94,6

Проведені після розгонки бору металографічні дослідження на структурах варикапів, виготовлених із застосуванням гетерування, показали відсутність в них структурних дефектів, що впливають на взаємну дифузію алюмінію та кремнію (рис. 19).

На рис. 20 приведені зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених за базовою технологією та за технологією з використанням гетерування.



Рис. 19. Поверхня варикапної структури, виготовленої з використанням гетерування, після розгонки бору

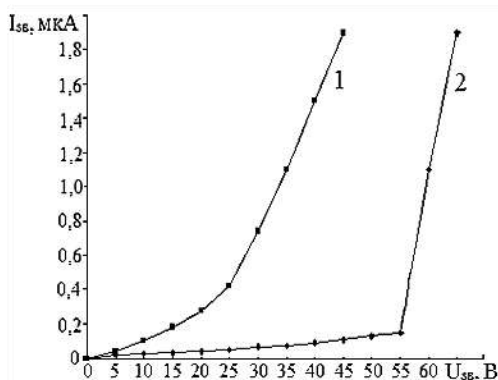


Рис. 20. Зворотні ВАХ варикапних структур: 1 – варикапна структура, виготовлена за базовою технологією; 2 – варикапна структура, виготовлена з використанням гетерування

Видно, що варикапна структура, виготовлена з використанням гетерування, має ВАХ (крива 2) типову для кремнієвого діода при відсутності в його активних областях структурних дефектів та небажаних домішок. І навпаки варикапна структура, виготовлена за базовою технологією, має так звану «м'яку» ВАХ (крива 1), вигляд якої вказує на наявність в активних областях варикапу структурних дефектів (дефектів упакування, дислокацій) та домішок металів або при наявності глибоко проникаючого в область об'ємного заряду р⁺-n переходу вістря алюмінію.

З порівняння кривих 1 і 2 видно, що варикапна структура, виготовлена за базовою технологією (крива 1), має набагато більший рівень зворотних струмів у порівнянні з варикапною структурою, виготовленою з використанням гетерування (крива 2).

Вплив створеної на зворотному боці підкладки області гетера перед осадженням на її робочу сторону епітаксialьного шару на параметри діода можна пояснити наступним чином. У процесі епітаксії, яка проводиться при температурі 1150°C, на зворотному боці підкладки формується висока щільність дислокацій. Ці порушення призводять до дифузії домішок впровадження, міжвузольних атомів, вакансій, які являються зародками дефектів, в полі пружних напружень із об'єму підкладки і епітаксialьного шару, що нарощується, до порушеного шару і поглинаються ним. Ліквідація зародків дефектів значно зменшує вірогідність утворення дефектів упакування і дислокацій в епітаксialьному шарі в процесі його нарощування. Також, створена на зворотному боці пластини область гетера, в процесах проведення наступних високотемпературних операцій (термічного окислення, загонки і розгонки бору) поглинає неконтрольовані домішки, зародки дефектів упакування з об'ємної і приповерхневих областей пластини, запобігаючи утворенню окислювальних дефектів упакування при проведенні цих технологічних операцій. Ліквідація структурних дефектів в активних областях варикапу виключає локальне проникнення алюмінію в область р-n переходу варикапу за рахунок підвищення граничної розчинності алюмінію в кремнії при температурі відпалу півки алюмінію та прискореної дифузії алюмінію в кремній вздовж структурних дефектів.

Таким чином, низький вихід придатних варикапних структур, що асоціюється з локальним проникненням алюмінію в область

p-n переходу варикапу, пов'язаний зі структурними дефектами (епітаксіальними і окислювальними дефектами упакування та дислокаціями), які утворюються в активних областях варикапів в процесах проведення високотемпературних технологічних операцій. Застосування розробленої технології виготовлення структур варикапів з використанням гетерування за допомогою області гетера, створеної на зворотній стороні пластини перед осадженням на її робочу сторону епітаксіального шару, дозволяє очистити активні області варикапів від зародків дефектів та небажаних домішок і запобігти утворенню в них структурних дефектів, що робить неможливим явище локального проникнення алюмінію в область p-n переходу та забезпечує суттєве зниження рівня зворотних струмів варикапів і підвищення виходу придатних приладів.

3. Покращання параметрів імпульсного діода при використанні гетерування

У схемах перемикання імпульсні діоди працюють у режимі насичення, для якого дуже важливо мати мінімальний час перерозподілу накопиченого заряду, що пов'язано з часом життя носіїв заряду [21]. Традиційним методом зменшення часу життя носіїв струму є введення в об'єм кристала діодної структури домішок, які мають великий переріз захоплення носіїв заряду. Найбільш часто в якості такої домішки використовується золото [22].

Відомо [23], що атоми золота, які знаходяться в міжвузлях кристалічної ґратки Si мають донорні властивості і, віддавши електрони в зону провідності, заряджаються позитивно. Атоми золота, які знаходяться в вузлах кристалічної ґратки Si, мають акцепторні властивості, тобто створюють у забороненій зоні Si акцепторні рівні, на які з валентної зони переходять електрони і заряджають їх негативно. Очевидно, що якщо акцепторні рівні створені в n-базі діода, то вони будуть ефективно захоплювати неосновні носії заряду – дірки, які інжектуються з p-області діода за час його прямого включення. Це дозволяє значно підвищити швидкодію діода.

Бар'єрна ємність діода розраховується за формулою [24]:

$$C_{ном} = S_{p-n} \sqrt{\frac{e\epsilon\epsilon_0 N_b}{2(\phi_k + U_{зв})}}, \quad (1)$$

де ϕ_k – контактна різниця потенціалів між p- і n- областями; e – заряд електрона; $U_{зв}$ – напруга зворотного зміщення;

N_b – концентрація легуючої домішки в базі, у даному випадку – фосфору; ϵ_0 , ϵ – діелектрична проникливість, вакууму і кремнію відповідно; S_{p-n} – площа р-п переходу.

Відповідно до формули (1) ємність діода визначається кількістю атомів фосфору, що заміщують атоми силіцію в вузлах кристалічної ґратки. При легуванні діодних структур золотом частина атомів фосфору заміщається атомами золота, що призводить до зменшення ємності діода і до збільшення його швидкодії.

Відомо [23; 25], що величина струму витоку, який протікає через зворотно зміщений р-п перехід діода, залежить від числа генераційно-рекомбінаційних центрів, що знаходяться в області його просторового заряду. Атоми золота служать досить ефективними центрами рекомбінації і, отже, процес дифузії золота, що застосовується для зменшення часу життя неосновних носіїв заряду, має істотний вплив на струм витоку діодів. Цей вплив значно підсилюється при наявності високої щільності структурних дефектів у активних областях діодних структур.

Струм витоку р-п переходу, що обумовлений виникненням носіїв заряду в центрах рекомбінації області просторового заряду р-п переходу, визначається за формулою [25]:

$$I_g = egWA, \quad (2)$$

де g – швидкість генерації носіїв заряду; W – товщина області просторового заряду р-п переходу при даній зворотній напрузі; A – стала, що залежить від властивостей кристалу напівпровідника.

Очевидно, що величина g залежить від концентрації структурних дефектів у кремнії. Збільшення концентрації структурних дефектів у активних областях діодних структур призводить до збільшення g і, як впливає з формули (2), до збільшення зворотного струму діодів.

У кремнії відбувається акумуляція атомів золота на структурних дефектах [2], що, за наявності високої концентрації останніх, призводить до нерівномірного легування пластин золотом, так як структурні дефекти зазвичай розподілені по площині пластини нерівномірно. Наслідком цього є, по-перше, збільшення зворотних струмів діодів і, по-друге, збільшення варіювання значень їх номінальної ємності по площині пластини. Обидва ці фактори призводять до зниження виходу придатних приладів.

Проведені дослідження були направлені на визначення механізму впливу структурних дефектів на параметри

імпульсного діода і можливості застосування гетерування для поліпшення його характеристик та підвищення виходу придатних приладів [26].

Досліджувані діодні структури виготовлялися за стандартною планарно-епітаксіальною технологією [14] на легованих фосфором кремнієвих епітаксійних структурах n-типу провідності з питомим опором 1 Ом·см і товщиною 15 мкм, вирощених на кремнієвій підкладці, орієнтованій за площиною (111). Для виготовлення діодних структур проводилися наступні основні технологічні операції: термічне окислення пластин при $T = 1150^{\circ}\text{C}$ з наступним чергуванням циклів: окислення в сухому кисні (15 хв) – окислення у вологому кисні (140 хв) – окислення в сухому кисні (55 хв); Товщина одержаної плівки SiO_2 (рис. 21) склала приблизно 0,65 мкм; (I) фотолітографія для розкриття вікон у шарі двоокису кремнію під дифузію бору; (I) загонка бору методом відкритої труби з джерела домішки B_2O_3 при $T = 1100^{\circ}\text{C}$ протягом 30 хвилин в суміші аргону (60 л/год) і сухого кисню (2 л/год); видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти; розгонка бору при $T = 1150^{\circ}\text{C}$ в середовищі сухого кисню (50 л / год) протягом 5г; видалення плівки двоокису кремнію на зворотному боці пластин травленням у плавиковій кислоті; осадження шару золота на зворотну сторону пластин за допомогою їх витримки в розчині на основі золото-хлористоводневої кислоти; дифузія золота при $T = 1100^{\circ}\text{C}$ в суміші азоту (130 л/год) і кисню (8 л/год) протягом 60 хв; (II) фотолітографія для розкриття вікон в шарі діоксиду кремнію для проведення загонки бору; (II) загонка бору при $T = 1050^{\circ}\text{C}$ протягом 25 хв у суміші аргону (100 л/год) і кисню (5 л/год); видалення шару боросилікатного скла з використанням розчину плавикової кислоти; шліфування тильної сторони пластин для зменшення її товщини до 190 ... 200 мкм; формування омічних контактів: хімічне осадження нікелю (Ni) з двох сторін пластини з подальшим відпалом плівки нікелю при $T = 740^{\circ}\text{C}$ у середовищі аргону (150 л/год) протягом 30 хв, проведення другої стадії хімічного осадження нікелю, нанесення шару золота (Au) на обидві сторони пластини методом гальванічного осадження.

У результаті виконання перерахованих операцій була отримана структура імпульсного діода, що наведена на рис. 21.

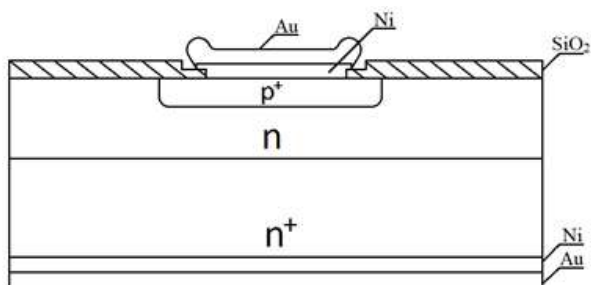


Рис. 21. Структура імпульсного діода, що виготовлена за базовою технологією

Для з'ясування причин низького відсотка виходу придатних діодів були проведені металографічні дослідження. Для виявлення структурних дефектів використовувався травник Сіртла. Вид структурних дефектів і їх щільність оцінювалися за допомогою металографічного мікроскопа МЕТАМ-1. На пластинках ще до проведення першої високотемпературної операції (термічне окислення) були виявлені епітаксialні дефекти пакування, щільністю 10^4 - 10^6 см⁻². На рис. 22 наведена мікрофотографія поверхні епітаксialної плівки перед операцією термічного окислення після селективного травлення в травнику Сіртла протягом 15 хв.



Рис. 22. Мікрофотографія поверхні епітаксialної плівки перед операцією термічного окислення після селективного травлення

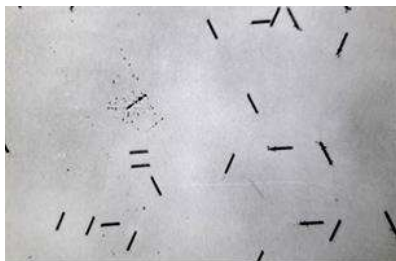


Рис. 23. Мікрофотографія поверхні епітаксiальної структури після термічного окислення і проведення селективного травлення

Після термічного окислення і видалення шару SiO_2 в епітаксiальних структурах були виявлені окислювальні дефекти пакування щільністю до 10^5 см^{-2} , при цьому час травлення структур у травнику Сіртла склав 20 с (рис. 23).

Для запобігання утворення структурних дефектів необхідно було обрати ефективний метод гетерування [3; 11]. Труднощі вибору полягали в тому, що для імпульсного діода, який виготовляється із застосуванням легування його структури золотом, не можна було використовувати гетер, що функціонує протягом усього маршруту виготовлення діодних структур через поглинання областю гетера атомів золота (наприклад, гетер, що створений на зворотному боці пластини за допомогою її шліфування, обробка зворотного боку пластини лазером, створення гетера на зворотному боці пластини за допомогою дифузії або іонного легування фосфором).

Були випробувані кілька методів гетерування дефектів, що пов'язані з передокислювальним і післяокислювальним відпалом в інертному середовищі [3]. Найефективнішим виявився передокислювальний відпал пластин в атмосфері аргону (120 л/год) при температурі $1170^\circ\text{C} \dots 1180^\circ\text{C}$ протягом 4 год.

Для випробування запропонованої технології виготовлення структур імпульсного діода були сформовані дослідні партії, кожна з яких ділилася на дві частини: одна частина партії була виготовлена за базовою технологією, друга частина – за розробленою технологією з гетеруванням. Передокислювальний відпал пластин проводився при температурі 1175°C протягом 4 год у атмосфері аргону.

Ефективність використання передокислювального відпалу оцінювалася за вольт-фарадними та вольт-амперними характеристиками зразків:

1) за відсотком виходу придатних діодних структур при їх розбракуванні за значенням номінальної ємності (критерій придатності: номінальна ємність діодних структур при нульовому зміщені $U_{зм} = 0$ повинна бути $C_0 \leq 2$ пФ). Очевидно, що відсоток виходу придатних діодних структур обернено пропорційний розкиду значень номінальної ємності діодних структур по площині пластини. У табл. 7 наведені порівняльні результати контролю за значенням номінальної ємності діодних структур, що виготовлені за базовою (партія №1) і розробленою (партія № 2) технологіями. Як видно з табл. 7, використання запропонованої технології дає можливість підвищити вихід придатних діодних структур на 8,9%, що непрямо підтверджує зменшення розкиду значень номінальної ємності цих структур по площині пластини.

2) за відсотком виходу придатних діодних структур за контролем зворотного струму ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 0,2$ мкА при зворотній напрузі 45 В.

Таблиця 7

**Залежність виходу придатних діодних структур
за значеннями їх номінальної ємності
від технології виготовлення**

Технологія виготовлення діодних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних діодних структур за значенням номінальної ємності, %
Без використання гетерування	1	77,9
З використанням передокислювального відпалу в атмосфері аргону при $T = 1175^{\circ}\text{C}$ протягом 4 год.	2	86,8

У таблиці 8 наведені порівняльні результати розбраковки за зворотним струмом діодних структур, що виготовлені за базовою (партії № 3-5) і розробленою (партії № 6-8) технологіям.

**Порівняльні характеристики
базової і розробленої технологій**

Технологія виготовлення діодних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних діодних структур за значенням зворотного струму, %
Без використання гетерування	3	86,7
	4	85,3
	5	84,6
З використанням передокислювального відпалу в атмосфері аргону при $T = 1175^{\circ}\text{C}$ протягом 4 год.	6	94,1
	7	95,2
	8	95,5



Рис. 24. Поверхня діодної структури, що виготовлена із застосуванням гетерування за допомогою проведення передокислювального високотемпературного відпалу, після селективного травлення

На рис. 25 і рис. 26 наведені вольт-фарадні характеристики діодних структур, що виготовлені за базовою технологією (рис. 24), а також при використанні передокислювального відпалу (рис. 25). Видно, що застосування гетерування за допомогою проведення передокислювального відпалу дає можливість істотно знизити розкид значень номінальної ємності діодних структур по площині пластини та зменшити середнє значення номінальної ємності (C_0) і, як наслідок збільшити відсоток виходу придатних приладів (див. табл. 7).

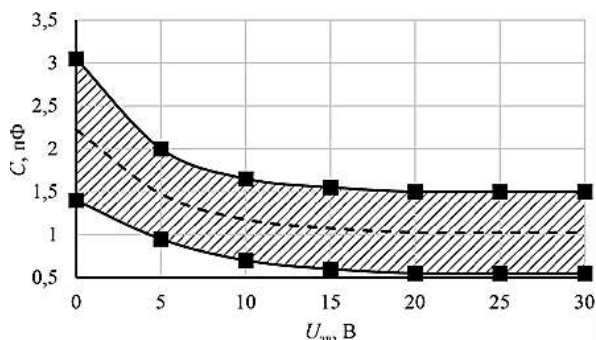


Рис. 25. Вольт-фарадні характеристики діодних структур, що виготовлені за базовою технологією

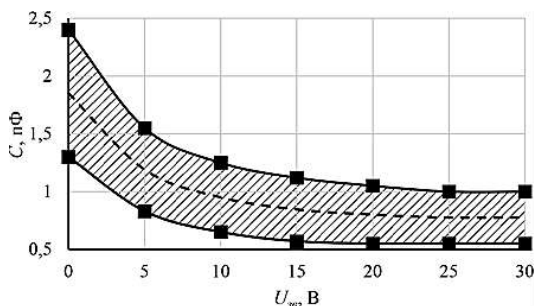


Рис. 26. Вольт-фарадні характеристики діодних структур, що виготовлені з використанням гетерування

На рис. 27 наведені зворотні гілки ВАХ діодних структур, що виготовлені за базовою технологією, а також при використанні передокислювального відпалу. Видно, що застосування гетерування за допомогою проведення передокислювального відпалу дає можливість істотно знизити рівень зворотних струмів діодів і, як наслідок збільшити відсоток виходу придатних приладів (див. табл. 8).

Вплив проведеного перед окисленням відпалу в середовищі аргону на параметри діода можна пояснити наступним чином.

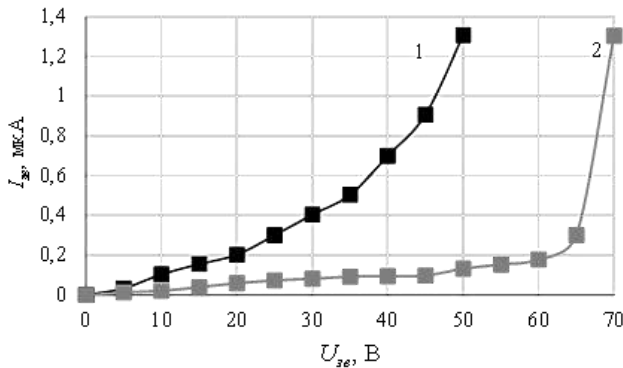


Рис. 27. Зворотні вольт-амперні характеристики діодних структур: **1** – виготовленої за базовою технологією; **2** – виготовленої з використанням передокислювального відпалу

У процесі відпалу відбувається розсмоктування епітаксіальних дефектів пакування, а також пригнічування зародків окислювальних дефектів пакування, які утворилися в кремнії як при вирощуванні зливків, так і в процесі епітаксії. Це у значній мірі запобігає утворенню окислювальних дефектів пакування на наступних високотемпературних операціях (термічне окислення, загонка та розгонка бору), що забезпечує рівномірний розподіл золота в базі діода, і, як наслідок, значне зменшення розкиду значень ємності діодних структур по площині пластини і зниження рівня їх зворотних струмів, високий рівень яких був пов'язаний з впливом дефектів.

Таким чином, причиною низького відсотка виходу структур імпульсного діода на операціях контролю зворотного струму і номінальної ємності діодів є дефекти пакування, що утворюються в активних областях діодів при епітаксії і в процесах проведення високотемпературних технологічних операцій. Розроблена технологія виготовлення структур імпульсного діода із застосуванням гетерування шляхом проведення передокислювального високотемпературного відпалу пластин в атмосфері аргону, дозволяє істотно зменшити щільність дефектів пакування в активних областях діодів, що дає можливість знизити рівень зворотних струмів і зменшити розкид значень номінальної ємності діодів по площині пластини і, як наслідок, підвищити відсоток виходу придатних приладів.

4. Розробка методів запобігання впливу поверхневих ефектів на зворотні характеристики структур кремнієвих діодів

Якість роботи активних напівпровідникових структур, до яких відносяться діоди, транзистори, інтегральні схеми і т. ін., багато в чому залежать від стану їх поверхневого шару в області виходу на поверхню р-п переходу [27]. Такі важливі характеристики діодів і транзисторів як величина зворотного струму і пробивна напруга р-п 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.

Причиною негативних явищ в напівпровідникових кристалах з р-п переходами можуть бути не лише рівні Тамма і Шоклі, які мають місце навіть на атомарно-чистій поверхні напівпровідника. На реальній поверхні напівпровідника осідає багатошарова 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.

Поверхня дуже сильно впливає на експлуатаційні характеристики напівпровідникових приладів: стабільність характеристик і, отже, вихід 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.).

4.1. Дослідження впливу хімічної обробки поверхні кремнієвих епітаксialьних структур на зворотні струми діодів, виготовлених на їх основі

Досліджувані зразки перед окисненням очищалися в наступних компонентах хімічної обробки [28]: 1) (HF:HNO₃ =1: 19) – обробка впродовж 20 с. 2) СМА – сульфамалиновий ангідрид (поверхнево – активна речовина) – обробка впродовж 25 хв. 3) HNO₃ – обробка кип'яченням впродовж 50 хв. 4) ПАР – перекисно-аміачний розчин (H₂O₂:NH₄OH:H₂O=1:1:4) – обробка впродовж 7 хв. 5) СМА+HNO₃ – обробка впродовж 25хв і 50хв відповідно. 6) СМА + (HF:HNO₃=1:19) + HNO₃ – 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°С; 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 =1000мкм для отримання структур метал-оксид-напівпровідник (МОН-структур).

В результаті проведеного експерименту були зняті вольт-фарадні характеристики МОН-структур, оброблених приведеними вище хімічними реагентами.

Таблиця 9

Вплив різних методів хімічної обробки на зворотні струми діодних структур

Метод хімічної обробки	Вихід придатних діодних структур, %
Обробка в СМА+ (HF:HNO ₃ =1:19) + HNO ₃	63
Обробка в HNO ₃	69
Обробка в HNO ₃ + СМА	65
Обробка в СМА	70
Обробка в (HF:HNO ₃ =1:19)	73
Обробка в ПАР	76

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 [28]. Найменше значення сумарного поверхневого

заряду і щільності поверхневих станів (відповідно $Q_{SS} = 2,8 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ і $N_{SS} = 1,4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) отримане при використанні обробки в ПАР.

Також якість досліджуваних хімічних обробок оцінювали по виходу придатних діодних структур, виготовлених за стандартною планарно – епітаксіальною технологією [14] на кремнієвих епітаксіальних структурах n- типу провідності з питомим опором $2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ і завтовшки 10 мкм , очищення яких перед першим термічним окисленням проводилося з використанням цих хімічних компонентів (табл. 9).

Таким чином, оптимальною з точки зору забезпечення мінімальної величини сумарного заряду на поверхні діодних структур і найбільшого виходу придатних діодів (табл. 9) 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.

4.2. Дослідження впливу різних методів термічного окислення на зворотні характеристики кремнієвих планарних діодів

Були досліджені наступні методи термічного окислення [28]:

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% – ї HCl ($\text{H}_2\text{O} : \text{HCl} = 2 : 1$).

Структури діодів виготовлялися на кремнієвих епітаксійних плівках за стандартною планарно-епітаксіальною технологією [14].

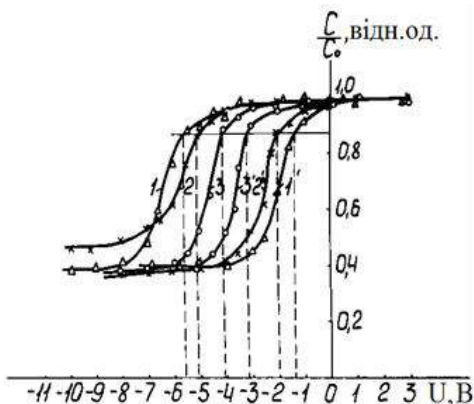


Рис. 28. Експериментальні С–U – характеристики МОН-структур: 1 – гідротермальне окислення; 2 – окислення з використанням в якості джерела пари водного розчину НСІ; 3 – окислення по циклу С – В – С кисень; 1, 2 і 3 – без відпалу; 1', 2' і 3' – після відпалу в середовищі аргону

Температура процесу окислення 1050°С. Після проведення окислення пластини відпалювали в атмосфері аргону при температурі процесу окислення.

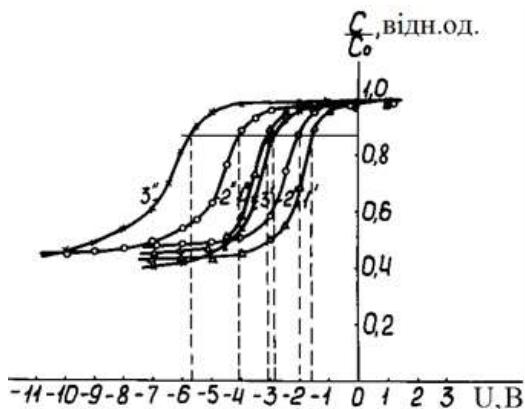


Рис. 29. С-U – характеристики МОН-структур: 1', 2', 3' – після відпалу в середовищі аргону; 1'', 2'', 3'' – після термопольової обробки

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: $I_{зв} < 0,3\text{мкА}$ 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 А1-SiO₂-Si (рис. 28).

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. 29). Порівняльні параметри кожного з досліджуваних методів окислення, одержані після проведення експериментальних партій, наведені в таблицях 10 і 11.

Відпал кремнієвих структур в середовищі аргону, який проводиться після завершення процесу окислення, призводить до зрушення вольт-фарадних характеристик МОН-структур управо (рис. 28). Це свідчить про зменшення сумарного позитивного заряду на межі розділу Si – SiO₂.

Таблиця 10

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 HCl	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 А1-SiO₂-Si.

Причому найбільше зрушення ВФХ спостерігається для МОН-структур, виготовлених з використанням гідротермального

окислення, що можна пояснити за допомогою моделі аутодифузії натрію і інших швидкодифундуючих домішок з оксиду при високотемпературних термообробках.

Згідно цієї моделі ефективність видалення швидкодифундуючих домішок шляхом дифузії з оксиду в газову фазу в процесі високотемпературних обробок в інертному середовищі залежить від концентрації силанольних ОН-груп, наявних в оксиді.

Таблиця 11

**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 НС1	63

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. 29), що вказує на збільшення сумарного позитивного заряду в окисній плівці. Найменший дрейф заряду в гідротермальному оксиді після термопольової обробки (рис. 29) можна пояснити кращим очищенням оксиду від швидкодифундуючих домішок в процесі високотемпературного відпалу в середовищі аргону.

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. 10, табл. 11).

4.3. Дослідження впливу процесу відпалу в атмосфері аргону структур випрямно-імпульсного діода Шотткі на його зворотні характеристики

Для проведення експерименту були використані структури діода Шотткі, технологією виготовлення якого була ізопланарна технологія [14]. Перед напиленням Мо, що формує бар'єр Шотткі, кремнієві пластини піддавалися відпалу в атмосфері аргону при 750°C впродовж 30 хв [29].

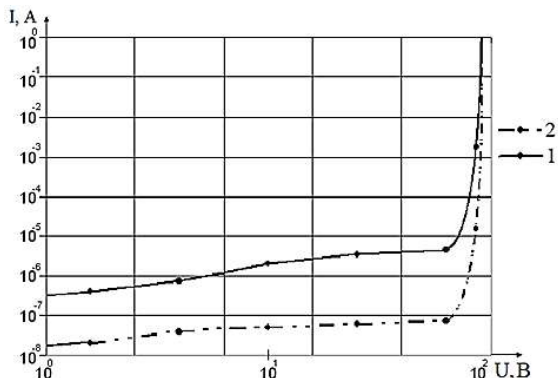


Рис. 30. Зворотні гілки ВАХ діодів: 1 – без відпалу; 2 – після відпалу в середовищі аргону при $T = 750^\circ\text{C}$ впродовж 20 хв

На рис. 30 приведені зворотні гілки ВАХ діодів, виготовлених за базовою технологією, а також діодів, виготовлених при використанні відпалу в середовищі аргону. З рис. 30 видно, що відпал структур діодів дає можливість істотно знизити рівень зворотних струмів діодів. Поліпшення зворотної гілки ВАХ структур діода Шотткі, в результаті їх відпалу в середовищі аргону, можна пояснити збільшенням висоти бар'єру Шотткі 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, очевидно, 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.

Висновки

Проведено оптимізацію технології виготовлення різних видів діодів Шоттки за рахунок використання гетерування. Область гетера формувалась зі зворотної сторони пластин методом іонного легування іонами фосфору або аргону, а також з використання гетеруючого шару боросилікатного скла з робочої сторони пластини. Використання гетерування дало можливість суттєво зменшити рівень зворотних струмів діодів та підвищити їх напругу пробою.

Використання лазерного гетерування в технологічному маршруті виготовлення варикапа зі зворотним градієнтом концентрації домішки в базі дало можливість значно зменшення розкид значень ємності варикапних структур по площі пластини та зменшити рівень їх зворотних струмів, що забезпечило суттєве збільшення виходу придатних приладів.

Експериментально досліджено вплив процесів формування омичних контактів на основі алюмінію і нікелю на електричні параметри варикапів та розроблені методи гетерування, впровадження яких дало можливість запобігти деградації зворотних характеристик варикапів в процесі формування омичних контактів.

Оптимізовано технологію виготовлення структур імпульсного діода. Показано, що проведення перед термічним окисненням високотемпературного відпалу кремнієвих пластин в середовищі аргону, забезпечує істотне підвищення виходу придатних приладів на операціях контролю рівня зворотного струму і значень номінальної ємності діодів.

Проведено дослідження впливу поверхневих ефектів на зворотні характеристики р-п структур. Показано, що застосування розроблених методів покращання стану поверхні структур забезпечує значне підвищення відсотка виходу придатних діодних структур за рахунок зменшення рівня їх зворотних струмів.

Література:

1. Дроздов А. В., Данилов Д.С., Юнусов И.В., Гошин Г.Г. Моделирование диодов с барьером Шоттки для применения в монолитных интегральных схемах СВЧ. Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21. № 1. С. 28–31.

2. Kveder V., Khorosheva M., Seibt M. Interplay of Ni and Au atoms with dislocations and vacancy defects generated by moving dislocations in Si. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 242. P. 147-154.

3. Литвиненко В.Н., Богач Н.В. Дефекты и примеси в кремнии и методы их геттерирования. *Вісник ХНТУ*. 2017. №1(60). С. 32-42.

4. Круглов А.И., Крусъ А.П., Беляев А.А. Оптимизация технологий изготовления диодных структур с целью уменьшения процессов дефектообразования и улучшения параметров приборов с барьером Шоттки. *Электронная техника. Сер. 8. Управление качеством, стандартизация, метрология, испытания*. 1989. Вып. 2(134). С. 70-74.

5. Litvinenko V. N., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Improvement of the reverse characteristics of schottky diodes using gettering. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2019. № 1-2. P. 34-39.

6. Солодуха В.А., Ланин В.Л., Соловьев Я.А. Повышение устойчивости структур диодов Шоттки с охранным кольцом к разрядам статического электричества. *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С: фундаментальные науки*. 2015. № 12. С. 72-81.

7. Khorosheva M. A., Kveder V. V., Seibt M. On the nature of defects produced by motion of dislocations in silicon. *Physica Status Solidi A*. 2015. Vol. 212. iss. 8. P. 1695-1703.

8. Богач М.В., Бежан П.Л., Литвиненко В.М., Самойлов М.О., Шутов С.В. Покращення зворотних характеристик діода Шоттки з охоронним кільцем. *Електроніка та зв'язок*. 2013. № 4. С. 9-13.

9. Спосіб виготовлення діода Шоттки з охоронним кільцем. пат. на корисну модель. 111697 Україна. Литвиненко В.М. № u201603906; заявл. 11.04.2016; опубл. 25.11.2016, Бюл. №22. 5с.

10. Тимошенко С. П., Бойко А. Н., Гаев Д. С., Калмыков Р. М. Интегральный варикап повышенной емкости на основе пористого кремния. *Известия вузов. Электроника*. 2017. Т. 22. № 1. С. 15-19.

11. Vikulin I. M., Litvinenko V. N., Shutov S. V., Maronchuk A. I., Demenskiy A. N., Glukhova V. I. Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2018. No. 2. P. 29-32.

12. Бохан Ю. И., Каменков В. С., Толочко Н. К. Доминирующие факторы лазерного геттерирования кремниевых пластин. *Физика и техника полупроводников*. 2015. Т. 49. Вып. 2. С. 278-282.

13. Харченко В.А. Геттеры в кремнии. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2018. Т. 21. № 1. С. 5-17.

14. Воротынцев В.М., Скупов В.Д. Базовые технологии микро- и нанoeлектроники : учебное пособие. Москва: Проспект, 2017. 519 с.

15. Литвиненко В.М., Волос О.О., Шутов С.В., Самойлов М.О. Оптимізація технології виготовлення варикапів з омичними контактами на основі Ni та Al. *Биомедицинская инженерия и электроника*. 2017. № 5. С. 120-131.

16. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. Москва: Мир, 1984. 472 с.

17. Громов Д. Г. А. И. Мочалов, А.Д. Сулимин, Шевяков В.И. Металлизация ультрабольших интегральных схем: учебное пособие. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 280 с.

18. Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции / Дж. Поут та ін. Москва: Мир, 1982. 576 с.

19. Скворцов А.А., Корячко М.В. Миграция расплавленных включений Al-Si в поле структурной неоднородности кремния. Материалы Международного симпозиума «Физика кристаллов 2013», посвященный 100-летию со дня рождения профессора М. П. Шаскольской. Москва, 2013. С. 207-209.

20. Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I. M., Gorbachev V. E. Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*. 2020. No. 1-2. С. 45-50.

21. Huang Hao, Shen Zheng, Wang Jun, Wang Da-Ming. Review of the Development of Fast Recovery Diode. *Progress in physics*. 2014. Vol. 34. P. 226-234.

22. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. Москва: Радио и связь, 1990. 264 с.

23. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Ленинград, Наука, 1972. 384 с.

24. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.

25. Климанов Е.А. О механизмах геттерирования генерационно-рекомбинационных центров в кремнии при диффузии фосфора и бора. *Успехи прикладной физики*. 2015. Т. 3, № 2. С. 121-124.

26. Литвиненко В.М., Баганов Є.О., Вікулін І.М., Горбачов В.Е. Показання параметрів планарного імпульсного діода при

використанні гетерування. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2021. № 3-4. С. 50-56.

27. Горшков А.П., Тихов С.В. Физика поверхности полупроводников: учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. 101 с.

28. Литвиненко В.М., Вікулін І.М. Вплив властивостей поверхні на зворотні характеристики напівпровідникових приладів. *Вісник ХНТУ*. 2018. № 1(64). С. 46-56.

29. Литвиненко В.Н. Повышение надежности диодов Шоттки. *Вісник ХНТУ*. 2007. № 3 (29). С. 313-315.