

К. т. н. В. М. ЛИТВИНЕНКО<sup>1</sup>, к. т. н. Є. О. БАГАНОВ<sup>2</sup>, д. ф.-м. н. І. М. ВІКУЛІН<sup>3</sup>,  
к. т. н. В. Е. ГОРБАЧОВ<sup>3</sup>

Україна, <sup>1</sup>Херсонський навчально-виховний комплекс №33, <sup>2</sup>Херсонський національний  
технічний університет, <sup>3</sup>Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова

E-mail: hersonlvn@gmail.com

## ПОКРАЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАНАРНОГО ІМПУЛЬСНОГО ДІОДА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГЕТЕРУВАННЯ

*Розглянуто причини та механізми впливу структурних дефектів на параметри імпульсного діода. Наведено експериментальні результати дослідження впливу гетерування, проведеного шляхом передокислювального високотемпературного відпалу пластин в атмосфері аргону, на параметри діодів. Показано, що запропонована технологія виготовлення структур імпульсного діода дозволяє істотно зменшити щільність дефектів пакування в активних областях діодів, у результаті чого знижується рівень зворотних струмів та зменшується розкид значень номінальної ємності діодів по площині пластини і, як наслідок, підвищується відсоток виходу придатних приладів.*

*Ключові слова:* гетерування, зворотний струм, номінальна ємність, діод, структурні дефекти, відпал.

Імпульсні діоди широко використовуються для роботи в високочастотних імпульсних схемах, однак їх вартість залишається порівняно високою через низький вихід придатних приладів на операціях контролю зворотного струму і номінальної ємності. Це багато в чому пов'язано з істотною залежністю їх електричних параметрів від щільності структурних дефектів і сторонніх домішок в активних областях діодів.

У схемах перемикачів імпульсні діоди працюють у режимі насичення, для якого дуже важливо мати мінімальний час перерозподілу накопиченого заряду, що пов'язано з часом життя носіїв заряду [1, 2]. Традиційним методом зменшення останнього є введення в об'єм кристала діодної структури домішок, які мають великий переріз захоплення носіїв заряду. Найчастіше в ролі такої домішки використовується золото [3, 4]. Відомо [5], що атоми золота, які знаходяться в міжвузлях кристалічної ґратки Si, мають донорні властивості — віддавши електрони в зону провідності, вони заряджаються позитивно. Атоми золота, що знаходяться у вузлах кристалічної ґратки Si, мають акцепторні властивості, тобто створюють у забороненій зоні Si акцепторні рівні, на які з валентної зони переходять електрони та заряджають їх негативно. Вочевидь, якщо акцепторні рівні створено в *n*-базі діода, вони будуть ефективно захоплювати неосновні носії заряду — дірки, інжектвані з *p*-області діода за час його прямого включення. Це дозволяє значно підвищити швидкість діода.

Бар'єрна ємність діода розраховується як [6]

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

де  $S_{p-n}$  — площа *p-n*-переходу;

$e$  — заряд електрона;

$\epsilon_0, \epsilon$  — діелектрична проникність вакууму та кремнію відповідно;

$N_b$  — концентрація легуючої домішки в базі;

$\varphi_k$  — контактна різниця потенціалів між *p*- і *n*-областями;

$U_{\text{зв}}$  — напруга зворотного зміщення.

Згідно з формулою (1), ємність діода визначається кількістю атомів фосфору, що заміщують атоми кремнію у вузлах кристалічної ґратки. У процесі легування діодних структур золотом частина атомів фосфору заміщується атомами Au, що призводить до зменшення ємності діода та збільшення його швидкодії.

Відомо [4, 7], що величина струму витоку, який протікає через зворотно зміщений *p-n*-перехід діода, залежить від числа генераційно-рекомбінаційних центрів, які знаходяться в області його просторового заряду. Атоми золота служать досить ефективними центрами рекомбінації, отже, процес дифузії золота, що застосовується для зменшення часу життя неосновних носіїв заряду, має істотний вплив на струм витоку діодів. Цей вплив значно підсилюється за наявності високої щільності структурних дефектів у активних областях діодних структур.

Струм витоку *p-n*-переходу, зумовлений виникненням носіїв заряду в центрах рекомбінації області просторового заряду *p-n*-переходу, визначається як [7]

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

де  $g$  — швидкість генерації носіїв заряду;

$W$  — товщина області просторового заряду *p-n*-переходу при заданій зворотній напрузі;

$A$  — стала, що залежить від властивостей кристалу.

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

У кремнії відбувається акумуляція атомів золота на структурних дефектах [8—12], що за наявності високої концентрації останніх призводить до неоднорідності легування, оскільки структурні дефекти зазвичай розподіляються по площині пластини нерівномірно. Наслідком цього є, по-перше, збільшення зворотних струмів діодів і, по-друге, збільшення коливання значень їх номінальної ємності по площині пластини. Обидва фактори призводять до зниження виходу придатних приладів.

Метою цієї роботи є дослідження впливу структурних дефектів на параметри імпульсного діода та можливості застосування гетерування для поліпшення його характеристик та підвищення виходу придатних приладів.

### Експериментальні зразки

Досліджувані діодні структури виготовлялися за стандартною планарно-епітаксialною технологією [13] на легованих фосфором кремнієвих епітаксialних структурах  $n$ -типу провідності з питомим опором  $1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$  товщиною  $15 \text{ мкм}$ , вирощених на кремнієвій підкладці, орієнтованій за площиною (111). Для виготовлення діодних структур проводилися такі основні технологічні операції:

- термічне окислення пластин за температури  $T = 1150^\circ\text{C}$  з наступним чергуванням циклів окислення у кисні — сухому (15 хв), вологому (140 хв) та знов у сухому (55 хв);
- (I) фотолітографія для розкриття вікон у шарі діоксиду кремнію під дифузію бору;
- (I) загонка бору методом відкритої труби з джерела домішки  $\text{B}_2\text{O}_3$  при  $T = 1100^\circ\text{C}$  протягом 30 хв у суміші аргону (60 л/год) і сухого кисню (2 л/год);
- видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти;
- розгонка бору при  $T = 1150^\circ\text{C}$  у середовищі сухого кисню (50 л/год) протягом 5 год;
- 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 золотохлористоводневої кислоти;
- дифузія золота при  $T = 1100^\circ\text{C}$  у суміші азоту (130 л/год) і кисню (8 л/год) протягом 60 хв;
- (II) фотолітографія для розкриття вікон у 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;

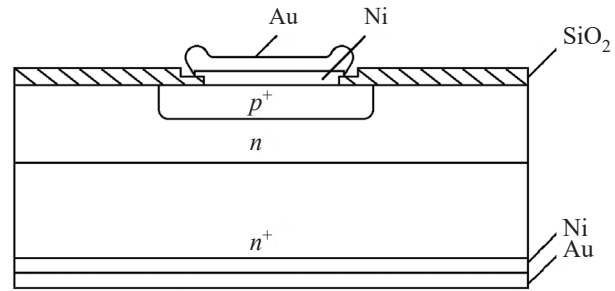


Рис. 1. Структура імпульсного діода, виготовленого за базовою технологією

- шліфування тильної сторони пластин для зменшення їх товщини до  $190\text{—}200 \text{ мкм}$ ;
- формування омичних контактів: хімічне осадження нікелю 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 Ni, нанесення шару Au на обидві сторони пластини методом гальванічного осадження.

У результаті виконання всіх цих операцій було отримано структуру імпульсного діода, наведену на рис. 1.

### Дослідження структурних дефектів

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 METAM-1.

На пластинках ще до проведення першої високо-температурної операції (термічне окислення) були виявлені епітаксialні дефекти пакування, щільністю  $10^4\text{—}10^6 \text{ см}^{-2}$ . На рис. 2 наведено мікрофотографію поверхні однієї з досліджуваних епітаксialних структур після селективного травлення в травнику Сіртла протягом 15 хв.

Після термічного окислення і видалення шару  $\text{SiO}_2$  в епітаксialних структурах були виявлені окислювальні дефекти пакування щільністю до  $10^5 \text{ см}^{-2}$ ,

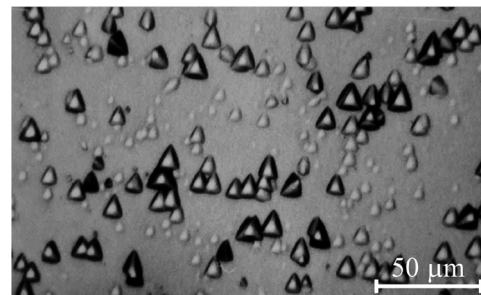


Рис. 2. Мікрофотографія поверхні епітаксialної плівки перед операцією термічного окислення після селективного травлення

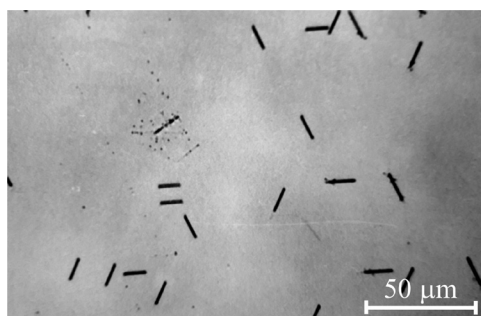


Рис. 3. Мікрофотографія поверхні епітаксильної структури після термічного окислення та проведення селективного травлення

при цьому час травлення структур у травнику Сіртла склав 20 с (рис. 3).

### Технологія гетерування та дослідження її ефективності

Для запобігання утворенню структурних дефектів у зразках імпульсного діода необхідно було обрати ефективний метод гетерування — технологічний процес, який широко використовується у сучасному виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем, що виготовляються на основі кремнію. Гетерування дозволяє накопичувати небажані домішки в неробочих ділянках пластин і повністю ліквідувати структурні дефекти або значно зменшити їх щільність у робочих областях [14, 15].

Класифікацію методів гетерування зазвичай проводять за технологією його здійснення: 1) утворення шару напівпровідникового матеріалу з порушеною кристалічною структурою; 2) нанесення гетеруючого шару; 3) проведення термообробки в спеціальному середовищі [14].

Широко використовуваним є метод гетерування за допомогою порушеного шару, принцип дії якого заснований на тому, що області порушень кристалічної структури стають стоками для точкових дефектів — вакансій і атомів швидкодіфундуючих домішок металів. Порушений шар створюється на неробочій стороні пластини, для чого використовуються лазерне випромінювання [16—18], шліфування [19], ударно-акустична обробка [14], ультразвуковий удар [19], дифузійне легування [20], іонна імплантація [21, 22].

Ефективне гетерування домішок можна здійснити за допомогою нанесення на поверхню кремнію плівок різного скла: фосфоро-, боро-, свинцево-силікатного, а також халькогенідного [23, 24]. Гетерування небажаних домішок в цьому випадку обумовлено їх підвищеною розчинністю в шарі скла. Також може наноситися шар поруватого кремнію [19].

У [25] показано, що високотемпературний відпал кремнієвих пластин перед термічним окисленням позитивно впливає на генерацію окислювальних дефектів пакування (ОДП). Помітне зменшен-

ня щільності ОДП пов'язують з розсмоктуванням у них ростових дефектів. При післяокислювальному високотемпературному відпалі пластин відбувається зменшення концентрації ОДП, що знаходяться поблизу поверхні, та утворення приповерхневої області, вільної від ОДП [14].

Поширеним способом гетерування у виробництві напівпровідникових приладів є відпал пластин у газовому середовищі, що містить хлор [26]. Дослідження цього способу показало, що поліпшення параметрів кремнію та виготовлених з нього приладів пов'язане з нейтралізацією небажаного впливу домішок металів, які або видаляються з поверхні кремнієвих пластин у вигляді летких сполук, або перетворюються в нейтральні комплекси.

З метою очищення приповерхневої області кремнієвих пластин від небажаних домішок використовують метод внутрішнього гетерування [27—29]. Він заснований на використанні кисню, що зазвичай присутній у кремнії. При довготривалому відпалі пластин починається його виділення на внутрішній частині пластини у вигляді преципітатів складу  $\text{SiO}_x$ , навколо яких існують механічні напружки, що призводить до утворення дислокацій та інших дефектів, які є ефективними центрами гетерування.

Труднощі вибору методу гетерування в нашому випадку полягали в тому, що для імпульсного діода, який виготовляється із застосуванням легування його структури золотом, не можна використовувати гетер, що функціонує протягом усього маршруту виготовлення діодних структур, через поглинання областю гетера атомів золота. Це унеможливило використання таких розповсюджених підходів, як, наприклад, гетер, 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 [13—16, 19] тощо.

Для вирішення проблеми були випробувані кілька методів гетерування дефектів, пов'язаних з передокислювальним і післяокислювальним відпалом в інертному середовищі [25, 26]. Найефективнішим виявився передокислювальний відпал пластин в атмосфері аргону (120 л/год) за температури 1170—1180°C протягом 4 год.

Для дослідження запропонованої технології виготовлення структур імпульсного діода було сформовано кілька дослідних партій, кожна з яких ділилася на дві частини: одна частина партії пластин була виготовлена за базовою технологією, друга частина — за розробленою технологією з гетеруванням. Передокислювальний відпал пластин проводився за температури 1175°C протягом 4 год в атмосфері аргону.

Ефективність використання передокислювального відпалу оцінювалася за вольт-фарадними та

вольт-амперними характеристиками зразків, що є ефективним інструментом для оцінки якості кремнієвих діодних структур [30], зокрема, за відсотком виходу придатних діодних структур при їх відбракуванні за двома критеріями:

1) значення номінальної ємності  $C_0$  (критерій придатності:  $C_0 \leq 2$  пФ за нульового зміщення);

2) величина зворотного струму  $I_{зв}$  (критерій придатності:  $I_{зв} \leq 0,2$  мкА за зворотної напруги 45 В).

Очевидно, що відсоток виходу придатних діодних структур при їх відбракуванні за значеннями  $C_0$  є обернено пропорційним розкиду значень  $C_0$  по площині пластини. Як видно з таблиці (партії пластин № 1-6 та № 1-г), використання запропонованої технології дозволяє підвищити вихід придатних діодних структур за цим критерієм на 8,9%, що непрямо підтверджує зменшення розкиду значень номінальної ємності структур по площині пластини.

*Вихід придатних діодних структур, виготовлених за базовою та розробленою технологією*

Технологія виготовлення діодних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних діодних структур, %	
		за значенням номінальної ємності $C_0$	за значенням зворотного струму $I_{зв}$
Базова (без використання гетерування)	1-6	77,9	—
	2-6	—	86,7
	3-6	—	85,3
	4-6	—	84,6
Розроблена (з передокислювальним відпалом у Ar при 1175°C, 4 год)	1-г	86,8	—
	2-г	—	94,1
	3-г	—	95,2
	4-г	—	95,5

З наведених у таблиці результатів відбракування діодних структур за величиною зворотного струму (партії № 2-6, 3-6, 4-6 та № 2-г, 3-г, 4-г) видно, що запропонована технологія дозволяє підвищити вихід придатних за цим критерієм структур у середньому на 9,4%. Слід зазначити, що при цьому рівень їхніх зворотних струмів нижчий у 2—9 разів.

Проведені перед формуванням омичних контактів металографічні дослідження показали, що у діодних структур, виготовлених із застосуванням гетерування у вигляді передокислювального відпалу в атмосфері аргону, відсутні епітаксіальні та окислювальні дефекти пакування (рис. 4).

З вольт-фарадних та вольт-амперних характеристик досліджуваних діодних структур, які наведені на рис. 5 та 6, видно, що застосування гетерування дозволяє зменшити середнє значення їхньої номінальної ємності та істотно знизити розкид значень  $C_0$  по площині пластин і рівень зворотного струму, завдяки

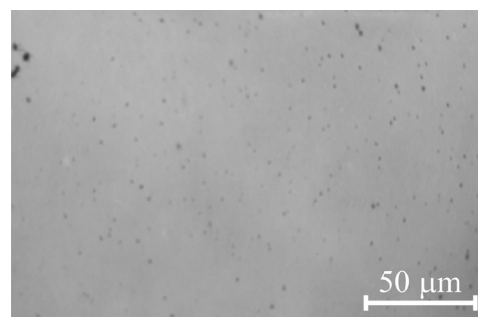


Рис. 4. Поверхня діодної структури, виготовленої із застосуванням передокислювального високотемпературного відпалу, після селективного травлення

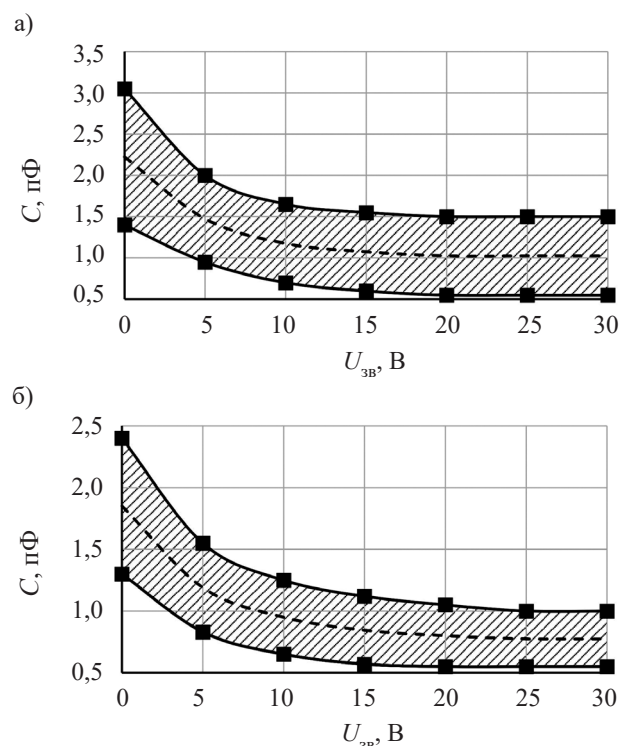


Рис. 5. Вольт-фарадні характеристики діодних структур, виготовлених за базовою технологією (а) та з використанням гетерування (б)

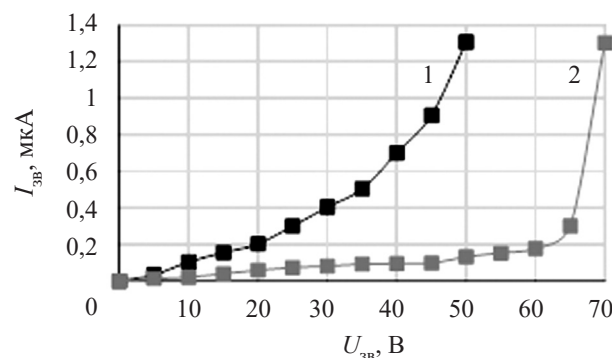


Рис. 6. Типові зворотні вольт-амперні характеристики діодних структур, виготовлених за базовою технологією (1) та з використанням гетерування (2)

чому збільшується відсоток виходу придатних приладів (див. таблицю).

Вплив відпалу, проведеного перед окисленням у середовищі аргону, на параметри діода можна пояснити наступним чином. У процесі відпалу відбувається розсмоктування епітаксціальних дефектів пакування, а також пригнічення зародків окислювальних дефектів пакування, які утворилися в кремнії як при вирощуванні зливків, так і в процесі епітаксії. Це значною мірою запобігає утворенню окислювальних дефектів пакування на наступних високотемпературних операціях (термічне окислення, загонка та розгонка бору), що забезпечує рівномірний розподіл золота в базі діода та, як наслідок, значне зменшення розкиду значень смності діодних структур по площині пластини, а також зниження величини їхніх зворотних струмів, рівень яких пов'язаний з впливом дефектів.

### Висновки

Таким чином, з проведених досліджень можна зробити висновок, що причиною низького відсотка виходу придатних структур імпульсного діода при контролюванні зворотного струму та номінальної смності є дефекти пакування, які утворюються в активних областях діодів під час епітаксії та 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, у результаті чого знижується рівень зворотних струмів і зменшується розкид значень номінальної смності діодів по площині пластини і, як наслідок, підвищується відсоток виходу придатних приладів.

### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

- Chen C.M., Arshad M.K.M., Rahim R.A. et al. The impacts of platinum diffusion to the reverse recovery lifetime of a high power diode devices. *MATEC Web Conf.*, 2016, vol. 78, 01089, 7 p. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167801089>
- Mauch D. L., Zutavern F. J., Delhotal J. J. et al. Ultrafast reverse recovery time measurement for wide-bandgap diodes. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, iss. 12, pp. 9333–9341. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2657491>
- Викулин И.М., Стафеев В.И. *Физика полупроводниковых приборов*. Москва, Радио и связь, 1990, 264 с.
- Болтакс Б.И., Бахадырханов М.К., Городецкий С.М. и др. *Компенсированный кремний*. Ленинград, Наука, 1972, 266 с.
- Болтакс Б.И. *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках*. Ленинград, Наука, 1972, 384 с.
- Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. *Полупроводниковые приборы*. Москва, Энергоатомиздат, 1990, 576 с.
- 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.
- Смульский А.С. Бездислокационный кремний и создание современных полупроводниковых приборов. *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, 1983, т. 668, вып. 12, с. 12–43.
- Таланин В.И., Таланин И.Е. Диффузионная модель образования ростовых микродефектов: новый подход к дефектообразованию в кристаллах (Обзор). *Физика твердого тела*, 2016, т. 58, вып. 3, с. 417–427. <https://doi.org/10.1134/S106378341603029X>
- 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. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.242.147>
- Khorosheva M. A., Kveder V. V., Seibt M. On the nature of defects produced by motion of dislocations in silicon. *Phys. Status Solidi A*, 2015, vol. 212, p. 1695–1703. <https://doi.org/10.1002/pssa.201532153>
- Рейви К. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии*. Москва, Мир, 1984, 472 с.
- Литвиненко В.М. *Фізика та технологія напівпровідникових діодів*. Херсон, ФОП Вишемирський В.С., 2018, 184 с.
- Литвиненко В.Н., Богач Н.В. Дефекты и примеси в кремнии и методы их геттерирования. *Вісник ХНТУ*, 2017, т. 60, №1, с. 32–42.
- Пилипенко В. А., Горушко В. А., Петлицкий А. Н. и др. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2013, № 2–3, с. 43–57.
- 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.
- Пилипенко В.А., Вечер Д.В., Понарядов В.В. и др. Влияние лазерного геттерирования на структурные и электрические параметры эпитаксиальных слоев кремния. *Вестник БГУ. Сер. 1*, 2007, вып. 2, с. 39–42.
- Vikulin I.M., Litvinenko V.N., Shutov S.V. et al. Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2018, no. 2, p. 29–32. <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.2.29>
- Немцев Г.З. Пекарев А.И., Чистяков Ю.Д., Бурмистров А.Н. Геттерирование точечных дефектов в производстве полупроводниковых приборов. *Зарубежная электронная техника*, 1981, т. 245, вып. 311, с. 3–63.
- Литвиненко В.М. Исследование влияния сезонных факторов на обратные токи кремниевых варикапов. *Вісник ХНТУ*, 2016, т. 56, №. 1, с. 39–44.
- 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, no. 1–2, p. 34–39. <https://doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.34>
- 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, p. 45–50. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.45>
- Верховский Е.И. Методы геттерирования примесей в кремнии. *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, 1981, вып. 8(838), с. 1–48.
- Литвиненко В.Н., Дощенко Г.Г., Самойлов Н.А. Исследование геттерирующих свойств пленок халькогенидных стекол. *Биомедицинская инженерия и электроника*, 2016, № 3, 6 с.
- Vasilev Yu.B., Verezub N.A., Mezheny M.V. et al. Fatures of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-diameter silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian*

*Microelectronics*, 2013, vol. 42, iss. 8, pp. 467–476. <https://doi.org/10.1134/S1063739713080155>

26. Харченко В.А. Проблемы надежности электронных компонентов. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2015, т. 18, № 1, с. 52–57. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-1-52-57>

27. Меженный М.В., Резник В.Я. *Способ формирования эффективного промежуточного геттера в монокристаллических бездислокационных пластинах. Пат. 2512258 РФ*, 2014.

28. Бахадирханов М.К., Исмаилов Б.К. Геттерирующие свойства кластеров атомов никеля в решетке кремния. *Приборы*, 2020, т. 240, № 6, с. 44–48.

29. Харченко В.А. Геттеры в кремнии. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*, 2018, т. 21, № 1, с. 5–17. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-1-5-17>

30. Nyamhere C., Scheinemann A., Schenk A. et al. A comprehensive study of the impact of dislocation loops on leakage currents in Si shallow junction devices. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 118, iss. 18, pp. 184501-1 – 184501-13. <https://doi.org/10.1063/1.4935293>

Дата надходження рукопису  
до редакції 17.05 2021 р.

DOI: 10.15222/TKEA2021.3-4.50  
UDC 621.382

V. M. LITVINENKO<sup>1</sup>, Ye. A. BAGANOV<sup>2</sup>,  
I. M. VIKULIN<sup>3</sup>, V. E. GORBACHEV<sup>3</sup>

Ukraine, <sup>1</sup>Kherson educational complex № 33,  
<sup>2</sup>Kherson National Technical University;

<sup>3</sup>Odessa National Academy of Telecommunications named after A. S. Popov

E-mail: hersonlvn@gmail.com

## IMPROVING PARAMETERS OF PLANAR PULSE DIODE USING GETTERING

*Pulse diodes are widely used as part of high-frequency pulse circuits. However, it should be noted that the cost of pulsed diodes remains relatively high, due to the low yield of suitable devices when they are sorted according to the criteria of reverse current and rated capacitance. This is largely caused by the significant dependence of their electrical parameters on the density of structural defects and impurities in the active regions of the diodes.*

*The study is devoted to identifying the causes and mechanisms of the low yield of diodes when they are sorted according to the criteria of reverse current and rated capacitance, as well as determining the possibility of using gettering operations to increase the yield of suitable devices.*

*It is found that the low yield of the diodes is caused by the structural defects that are formed in the active areas of the diodes during high-temperature technological operations. The paper describes the mechanisms in which the structural defects affect the electrical parameters of diodes.*

*The proposed technology for manufacturing diode structures using gettering of structural impurity defects by means of high-temperature annealing in an inert medium before the thermal oxidation operation is considered.*

*It is shown that high-temperature annealing of silicon structures before thermal oxidation eliminates packing defects formed during epitaxy, cleans the active areas of the diodes from nuclei of defects and unwanted impurities, and prevents the formation of structural defects in them during the subsequent high-temperature thermal operations. The use of the proposed technology allows increasing the yield of suitable diode structures by 8.9% when sorted according to rated capacitance and by 9.4% when sorted according to reverse current, the level of reverse currents reducing by 2–9 times.*

*Keywords: gettering, reverse current, rated capacitance, diode, structural defects, annealing.*

### REFERENCES

1. Chen C.M., Arshad M.K.M., Rahim R.A. et al. The impacts of platinum diffusion to the reverse recovery lifetime of a high power diode devices. *MATEC Web Conf.*, 2016, vol. 78, 01089, 7 p. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167801089>

2. Mauch D. L., Zutavern F. J., Delhotal J. J. et al. Ultrafast reverse recovery time measurement for wide-bandgap diodes. // *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, iss. 12, pp. 9333–9341. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2657491>

3. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika Poluprovodnikovykh priborov* [Physics of Semiconductor Devices]. Moscow, Radio i Svyaz', 1990, 264 p. (Rus)

4. Boltaks B.I., Bakhadyrkhanov M.K., Gorodetsky S.M. et al. *Kompensirovanny kremniy* [Compensated Silicon]. Leningrad, Nauka, 1972, 266 p. (Rus)

5. Boltaks B.I. *Diffuziya i tochechnyye defekty v poluprovodnikakh* [Diffusion and Point Defects in Semiconductors]. Leningrad, Nauka, 1972, 384 p. (Rus)

6. Tugov N.M., Glebov B.A., Charykov N.A. *Poluprovodnikovyye pribory* [Semiconductor Devices]. Moscow, Energoatomizdat, 1990, 576 p. (Rus)

7. Klimanov E.A. Mechanism of gettering the generation-recombination centers in silicon at diffusion of phosphorus and boron *Successes of Applied Physics*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 121–124. (Rus)

8. Smulsky A.S. Dislocation-free silicon and the creation of modern semiconductor devices. *Reviews on Electronic Engineering. Ser. 2. Semiconductor Devices*, 1983, vol. 668, iss. 12, pp. 12–43. (Rus)
9. Talanin V.I., Talanin I.E. Diffusion model of the formation of growth microdefects: a new approach to defect formation in crystals (Review). *Solid State Physics*, 2016, vol. 58, no. 3, pp. 427–437. <https://doi.org/10.1134/S106378341603029X>
10. 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, pp. 147–154. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.242.147>
11. Khorosheva M. A., Kveder V. V., Seibt M. On the nature of defects produced by motion of dislocations in silicon. *Phys. Status Solidi A*, 2015, vol. 212, pp. 1695–1703. <https://doi.org/10.1002/pssa.201532153>
12. Ravi K.V. *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*. John Wiley & Sons, New York, 1981, 379 p.
13. Litvinenko V.M. *Fizyka ta tekhnologiya napivprovodnykovykh diodiv* [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]. Kherson, Vyshemirsky V.S., 2018, 184 p. (Ukr)
14. Litvinenko V. N., Bohach N. V. Defects and impurities in silicon and methods for their gettering. *Visnyk of KhNTU*, 2017, vol. 60, iss. 1, pp. 32–42. (Rus)
15. Pilipenko V. A., Gorushko V. A., Petlitskiy A. N. et al. Methods and mechanisms of gettering of silicon structures in the production of integrated circuits. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no. 2–3, pp. 43–57. (Rus).
16. Bokhan Yu.I., Kamenkov V.S., Tolochko N.K. Dominant factors of laser gettering of silicon wafers. *Semiconductors Physics and Technology*, 2015, vol. 49, iss. 2, pp. 278–282. (Rus)
17. Pilipenko V.A., Vecher D.V., Ponaryadov V.V. et al. Influence of laser gettering on the structural and electrical parameters of epitaxial silicon layers. *Vestnik of BSU. Ser. 1*, 2007, iss. 2, pp. 39–42. (Rus)
18. Vikulin I.M., Litvinenko V.N., Shutov S.V. et al. Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 29–32. <https://doi.org/10.15222/TKEA2018.2.29>
19. Nemtsev G.Z., Pekarev A.I., Chistyakov Yu.D., Burmistrov A.N. Gettering point defects in semiconductor device manufacturing. *Foreign Electronic Technology*, 1981, vol. 245, iss. 311, pp. 3–63. (Rus)
20. Litvinenko V.M. Investigation of the influence of seasonal factors on reverse currents of silicon varicaps. *Visnyk of KhNTU*, 2016, vol. 56, iss. 1, pp. 39–44. (Rus)
21. 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, no. 1–2, pp. 34–39. <https://doi.org/10.15222/TKEA2019.1–2.34>
22. Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. *ekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 1–2, pp. 45–50. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.45>
23. Verkhovskiy E.I. Methods for gettering impurities in silicon. *Reviews on Electronic Technology. Ser. 2. Semiconductor Devices*, 1981, iss. 8 (838), pp. 1–48. (Rus)
24. Litvinenko V.N., Doshchenko G.G., Samoilo N.A. Investigation of the gettering properties of chalcogenide glass films. *Biomedical Engineering and Electronics*, 2016, no. 3, 6 p. (Rus)
25. Vasilev Yu.B., Verezub N.A., Mezheny M.V. et al. Features of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-diameter silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian Microelectronics*, 2013, vol. 42, iss. 8, pp. 467–476. <https://doi.org/10.1134/S1063739713080155>
26. Kharchenko V.A. Problems of reliability of electronic components. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materials of Electronics Engineering*, 2015, vol.18, iss. 1, pp. 52–57. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2015-1-52-57> (Rus)
27. Mezheny M.V., Reznik V. Ya. [The Method of Forming an Efficient Internal Getter in Single-Crystal Dislocation-Free Wafers]. *Patent 2512258 RF*, 2014. (Rus).
28. Bakhadirhanov M.K., Ismailov B.K. Hettering properties of clusters of nickel atoms in the silicon lattice. *Devices*, 2020, vol. 240, iss. 6, pp. 44–48. (Rus)
29. Kharchenko V.A. The getters in silicon. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2018, vol. 21, iss. 1, pp. 5–17. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2018-1-5-17> (Rus)
30. Nyamhere C., Scheinmann A., Schenk A. et al. A comprehensive study of the impact of dislocation loops on leakage currents in Si shallow junction devices. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 118, iss. 18, pp. 184501-1 – 184501-13 <https://doi.org/10.1063/1.4935293>

**Опис статті для цитування:**

Литвиненко В. М., Баганов Є. О., Вікулін І. М., Горбачов В. Е. Покращення параметрів планарного імпульсного діода при використанні гетерування. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 3–4, с. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.50>

**Cite the article as:**

Litvinenko V. M., Baganov Ye. A., Vikulin I. M., Gorbachev V. E. Improving parameters of planar pulse diode using gettering. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 3–4, pp. 50–56. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.50>