

К. т. н. В. М. ЛИТВИНЕНКО¹, к. т. н. С. В. ШУТОВ²

Україна, ¹Херсонський державний аграрно-економічний університет,
²м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
 E-mail: hersonlvn@gmail.com

ПОЛІПШЕННЯ ЗВОРОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНІЄВОГО ВАРИКАПА ЗА ДОПОМОГОЮ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГЕТЕРУВАННЯ

Розглянуто причини та механізми деградації зворотних характеристик варикапа в процесі формування омичного контакту на основі нікелю. Досліджено вплив низькотемпературного гетерувального відпалу варикапних структур після формування омичного контакту на основі нікелю на рівень зворотного струму варикапів, а також проаналізовано можливі механізми цього впливу. Показано ефективність запропонованої технології з використанням гетерування щодо зниження рівня зворотних струмів і підвищення виходу придатних приладів.

Ключові слова: нікель, омичний контакт, гетерування, варикап, структурні дефекти, зворотний струм.

Варикапи широко використовуються в радіоелектроніці як змінна ємність, величина якої управляється напругою [1—5]. Слабким місцем в технологічному маршруті виготовлення варикапів є процесі формування омичних контактів. Для одержання омичних контактів до варикапних структур зазвичай використовується нікель або алюміній. На відміну від алюмінію, нікель добре змочується припоєм і дозволяє приєднувати провідники пайкою, утворює з кремнієм силіциди, стабільні в широкому діапазоні температури, допускає електролітичне формування локальних контактів. Ці переваги дозволяють застосовувати простіші методи складання напівпровідникових приладів, виключити з технологічного процесу операції фотолітографії з металізації, підвищуючи таким чином ефективність виробництва приладів і знижуючи їхню собівартість [6, 7]. З іншого боку, використання нікелю для виготовлення омичного контакту викликає проблеми, пов'язані з деградацією зворотної гілки вольт-амперних характеристик (ВАХ) приладів в процесі формування контакту. Дослідження показали, що основною причиною високого рівня зворотних струмів діодів є структурні дефекти та домішки важких металів в активних областях діодів [8, 9]. Для запобігання утворенню структурних дефектів в кремнії та зменшенню щільності вже утворених дефектів застосовуються різноманітні методи гетерування [10—13].

Як показала практика, ні оптимізація режимів формування p^+ -області, ні використання операцій гетерування на початкових стадіях виготовлення варикапа не дозволяють повністю позбутися структурних дефектів і збільшити в результаті відсоток виходу придатних діодів. Майже завжди понад 10% ді-

одних структур мають збільшений рівень зворотних струмів.

Метою цієї роботи було дослідження причини деградації зворотних характеристик варикапа в процесі формування омичного контакту на основі нікелю, а також можливості застосування низькотемпературного гетерування для поліпшення його зворотних характеристик та підвищення відсотка виходу придатних приладів.

Експериментальні зразки

Досліджувані діодні структури виготовлялися за стандартною планарно-епітаксійною технологією [14] на легованих фосфором кремнієвих епітаксійних структурах n -типу провідності з питомим опором 2 Ом·см товщиною 11 мкм, вирощених на орієнтованій в кристалографічному напрямку (111) кремнієвій підкладці.

Для виготовлення варикапних структур проводилися такі основні технологічні операції:

- термічне окислення пластин в парах води за температури $T = 1050^\circ\text{C}$ із подальшим відпалом в середовищі аргону за температури процесу окислення;
- (I) фотолітографія для відкривання вікон у шарі діоксиду кремнію під дифузію бору;
- (I) загонка бору методом відкритої труби з джерела домішки B_2O_3 за температури 1100°C протягом 30 хв у суміші аргону (60 л/год) і сухого кисню (2,5 л/год);
- видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти;
- розгонка бору за температури 1150°C з подальшим чергуванням циклів: розгонка в середовищі сухого кисню (30 хв) \rightarrow розгонка в середовищі воло-

гого кисню (4 год) → розгонка в середовищі сухого кисню (30 хв);

- (II) фотолітографія для відкривання вікон у шарі діоксиду кремнію для проведення загонки бору;
- (II) загонка бору за температури 1050°C протягом 20 хв у суміші аргону (90 л/год) і кисню (4 л/год);
- видалення шару боросилікатного скла з використанням розчину плавикової кислоти;
- шліфування тильної сторони пластин до товщини 180—220 мкм;
- формування омичних контактів: хімічне осадження Ni з двох боків пластини з подальшим відпадом плівки нікелю за температури 700°C у середовищі аргону (200 л/год) протягом 20 хв (в процесі відпалу в результаті взаємодії Ni з Si утворюється силіцид нікелю NiSi). Товщина осадженої плівки нікелю складає приблизно 1 мкм.

Примітка. II загонка бору є гетерувальним технологічним процесом, що проводиться з метою ліквідації структурних дефектів типу окислювальних дефектів упакування (ОДУ) в активних областях варикапних структур. Застосування цього методу гетерування в технології варикапів з омичним контактом на основі нікелю докладно розглянуто в [15].

У результаті була отримана структура варикапа, наведена на **рис. 1**.

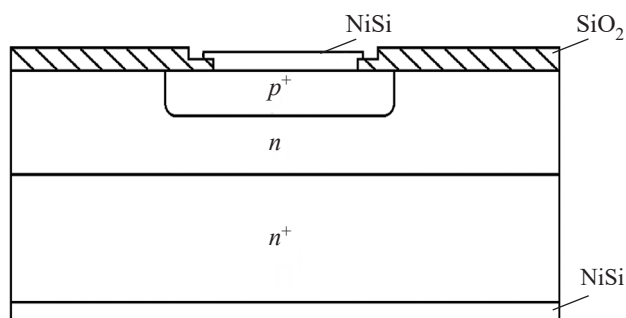


Рис. 1. Структура варикапа, виготовленого за базовою технологією

Для з'ясування причин низького відсотка виходу придатних варикапів були проведені металографічні дослідження. Для виявлення структурних дефектів використовувався травник Сіртла. Вид структурних дефектів і їх щільність оцінювалися за допомогою металографічного мікроскопа МЕТАМ-1 (**рис. 2**). На пластинках після проведення технологічної операції «розгонка бору» були виявлені окислювальні дефек-

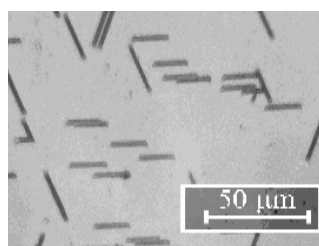


Рис. 2. Мікрофотографія поверхні епітаксійної структури після термічного окислення та селективного травлення

ти упакування щільністю до $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, при цьому час травлення структур у травнику Сіртла складає 15 с.

Вибір технології гетерування

Для запобігання утворенню та для ліквідації структурних дефектів у структурах кремнієвих діодів зазвичай застосовують гетерування — цей технологічний процес широко використовується у сучасному виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних схем, які виготовляються на основі кремнію. Щоб досягти високої ефективності гетерування дефектів, необхідно забезпечити високу рухливість точкових дефектів в напівпровідниковому матеріалі. У зв'язку з цим будь-який метод гетерування містить термообробку, температура і тривалість якої мають бути достатніми для дифузії домішок з областей формування приладів до області гетера. Гетерування дозволяє накопичувати небажані домішки в неробочих ділянках пластин і повністю очистити активні області від структурних дефектів або значно зменшити їх щільність [16, 17]. Існують різні методи гетерування, які відрізняються за місцем розміщення гетера, гетерувальною фазою та способом створення гетера.

Можна виділити п'ять основних механізмів взаємодії точкових дефектів, завдяки яким відбувається гетерування [16]:

- взаємодія точкових дефектів з полем пружних напружень;
- електрична взаємодія точкових дефектів між собою;
- поглинання домішкових точкових дефектів рідкою або рідиноподібною фазою;
- виділення власних і домішкових дефектів до вакууму або до газової фази;
- адсорбція дефектів на розвиненій поверхні твердого тіла.

У зв'язку з тим, що гетерування дефектів зазвичай пов'язане з декількома механізмами, класифікацію методів гетерування доцільно провести не за механізмом, а за технологією його здійснення [18]:

- нанесення гетерувального шару на поверхню пластини;
- утворення шару напівпровідникового матеріалу з порушеною кристалічною структурою;
- проведення термічної обробки пластин в спеціальному середовищі.

Ефективне гетерування домішок можна здійснити шляхом нанесення на поверхню кремнієвих пластин шару порушеного кремнію [18] або плівки скла: фосфо-, боро-, свинцево-силікатного, халькогенідного [8, 19]. В цьому випадку гетерування небажаних домішок обумовлено їхньою підвищеною розчинністю в шарі скла.

Широко використовуваним є також метод гетерування за допомогою порушеного шару, заснований на тому, що області порушень кристалічної структури стають стоками для точкових дефектів — вакан-

сій і атомів швидкодифундуючих домішок металів. Зазвичай порушений шар створюється на неробочій стороні пластини, і для цього може використовуватись шліфування [8, 18], ударно-акустична обробка [16, 18], лазерне випромінювання [20—22], ультразвуковий удар [8], дифузійне легування [23, 24], іонна імплантація [17, 25]. Високотемпературний відпал кремнієвих пластин перед термічним окисленням дає можливість зменшити щільність ОДУ, які утворюються в процесі окислювання [8]. Під час післяокислювального високотемпературного відпалу пластин відбувається зменшення щільності ОДУ, розташованих поблизу поверхні [18]. Поширеним способом гетерування у виробництві напівпровідникових приладів є відпал пластин у газовому середовищі, що містить хлор [8, 18]. Дослідження механізму гетерування цим методом показало, що поліпшення параметрів 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. Очищення приповерхневої області кремнієвих пластин від небажаних домішок забезпечується використанням методу внутрішнього гетерування [17, 18], заснованому на використанні кисню, що зазвичай присутній у кремнії. В процесі довготривалого відпалу пластин починається виділення кисню на внутрішній частині пластини у вигляді преципітатів складу SiO_x . Навколо них існують механічні напруження, що призводять до утворення дислокацій та інших дефектів, які є ефективними центрами гетерування.

В процесі виготовлення досліджуваного варикапа за базовою технологією для усунення ОДУ застосовується гетерування шляхом додаткової дифузії бору в робочу сторону пластини після розгонки бору (технологічна операція: «(II) загонка бору») [15]. Проведені перед формуванням омичних контактів металографічні дослідження на варикапних структурах, виготовлених із застосуванням додаткової дифузії бору, показали відсутність в них окислювальних дефектів упакування (рис. 3). Слід зазначити, що використання додаткової дифузії бору дало можливість підвищити вихід придатних діодних структур на 10—15%.

Але, як показали дослідження, на вихід придатних діодних структур, навіть за відсутності ОДУ, негативно впливає процес формування нікелевого омичного контакту — цей показник знижується на операції контролю варикапних структур за зворотним

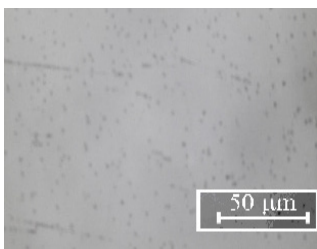


Рис. 3. Поверхня варикапної структури, виготовленої з використанням гетерування, після розгонки бору

струмом. Для підтвердження припущення, що збільшення рівня зворотних струмів пов'язане з нікелем, на відбракованих за зворотним струмом варикапних структурах було проведено дослідження енергетичного спектра носіїв заряду методом DLTS [26]. Воно показало наявність у забороненій зоні кремнію глибоких центрів, які відповідають нікелю.

Вплив процесу формування нікелевого омичного контакту на рівень зворотних струмів варикапа в умовах відсутності ОДУ, вочевидь, можна представити таким чином. Відомо [7, 27], що під час термічного відпалу кремнієвих пластин з плівкою нікелю утворюються силіциди. В загальному випадку, залежно від температури відпалу, мають місце послідовні стадії зростання трьох фаз силіцидів: Ni_2Si , NiSi , NiSi_2 . Процес відпалу півки нікелю та зростання шару силіциду нікелю супроводжуються відривом атомів кремнію від поверхні та генерацією вакансій на межі розділу «кремній — силіцид». Через це в процесі відпалу півки нікелю ($T=700^\circ\text{C}$) і зростання шару силіциду нікелю на межі розділу «кремній — силіцид» підтримується висока концентрація вакансій. Не всі атоми нікелю можуть бути залучені до утворення силіциду нікелю NiSi , що є кінцевою фазою відпалу півки нікелю в атмосфері аргону у діапазоні температури $350—750^\circ\text{C}$ [27]. Значна кількість надлишкових атомів нікелю, які не були залучені до утворення NiSi , з урахуванням високої концентрації вакансій, знаходяться у вузлах кристалічної структури кремнію біля межі розділу $\text{Si}—\text{NiSi}$. Поява надлишкових атомів нікелю та рівень їх концентрації можуть залежати від концентрації точкових дефектів (типу дефектів за Френкелем) під осадженою півкою нікелю, механічних напружень на межі $\text{Si}—\text{NiSi}$, флуктуації товщини осадженої півки нікелю по поверхні пластини та між окремими процесами осадження півки нікелю тощо. В процесі зростання шару силіциду нікелю надлишкові атоми нікелю переходять із вузлів кристалічної решітки кремнію до міжвузлів і по них дифундують в область об'ємного заряду $p^+—n$ -переходу, де завдяки високій концентрації вакансій знову переходять до вузлів кристалічної решітки кремнію і стають електрично активними. 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 об'ємного заряду $p—n$ -переходу [28].

Для розв'язання проблеми деградації зворотних характеристик варикапа в процесі формування омичного контакту на основі нікелю були випробувані декілька методів низькотемпературного гетерування дефектів (високотемпературний відпал застосувати в нашому випадку не можна через деградацію деяких параметрів варикапа, порушення структури омичного контакту тощо). За результатами експериментальних

досліджень для гетерування було запропоновано після формування омичного контакту проводити додатковий відпал пластин за температури $T = 250\text{—}350^\circ\text{C}$ протягом 20—60 хв в атмосфері аргону. При цьому готовим «власним гетером» є межа розділу Si—NiSi.

Дослідження ефективності технології гетерування

Для випробування запропонованої технології виготовлення структур варикапа були сформовані дослідні партії пластин, кожна з яких ділилася на дві частини: одна була виготовлена за базовою технологією, інша — за розробленою технологією з використанням низькотемпературного гетерування. Додатковий відпал пластин після закінчення формування нікелевого омичного контакту проводився за температури 300°C протягом 40 хв у атмосфері аргону (150 л/год).

Ефективність використання низькотемпературного відпалу оцінювалася за відсотком виходу придатних діодних структур за контролем зворотного струму ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 0,5$ мкА при зворотній напрузі 35 В.

У таблиці наведено результати розбраковки за зворотним струмом діодних структур, виготовлених за базовою та розробленою технологіями. Тут видно, що використання запропонованої технології підвищує вихід придатних діодних структур у середньому на 7,2%. При цьому, як видно з рис. 4, рівень зворотних струмів таких структур від 2 до 7 разів нижчий в порівнянні з діодними структурами, виготовленими за базовою технологією.

Вихід придатних діодних структур, виготовлених за базовою та розробленою технологією, за значенням зворотного струму

Технологія виготовлення	№ партії	Вихід придатних, %
Базова (без гетерування)	1-а	83,7
	2-а	85,3
	3-а	86,8
Розроблена (з відпалом в атмосфері Ar за $T = 300^\circ\text{C}$ протягом 40 хв)	1-б	92,4
	2-б	91,7
	3-б	93,5

Зворотні ВАХ досліджуваних варикапних структур, виготовлених з використанням гетерування (крива 2 на рис. 4), є типовою для кремнієвого діода, в активних областях якого відсутні структурні дефекти та небажані домішки. І навпаки, варикапна структура, виготовлена за базовою технологією, має так звану «м'яку» ВАХ (крива 1), вигляд якої може вказувати на наявність в активних областях варикапа домішок важких металів.

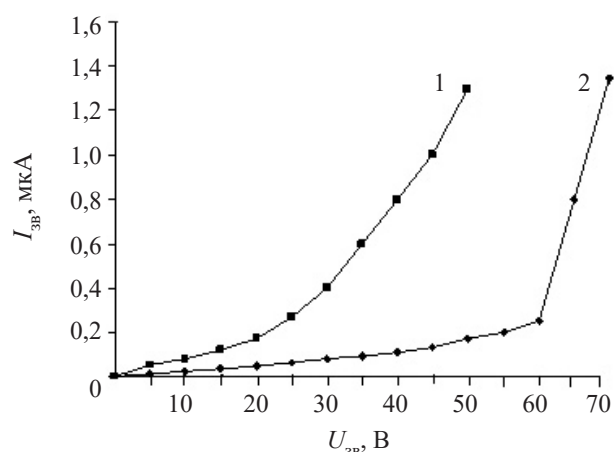


Рис. 4. Типові зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених за базовою технологією (1) та з використанням гетерування (2)

Вплив на параметри варикапа запропоновано додаткового відпалу варикапних структур після формування нікелевого омичного контакту, вочевидь, можна пояснити таким чином. Додатковий відпал проводиться після завершення формування силіциду нікелю, тому не супроводжується додатковою генерацією вакансій. За порівняно низької температури відпалу (300°C) суттєво знижується гранична розчинність міжвузлових атомів нікелю та рівноважна концентрація вакансій в p^+ -області варикапів. Межа розділу Si—NiSi слугує стоком (гетером) для атомів нікелю, і надлишкові атоми Ni переходять з вузлів до міжвузлів і по них дифундують до області гетера, покидаючи таким чином область об'ємного заряду p^+ - n -переходу (тут треба враховувати, що коефіцієнт дифузії нікелю в кремнії на декілька порядків вищий, ніж атомів легувальних домішок, таких як бор і фосфор).

Висновки

Спираючись на проведені експериментальні дослідження, можна зробити припущення, що за відсутності в активних областях варикапа структурних дефектів типу окислювальних дефектів упаковки деградація зворотних характеристик варикапних структур в процесі формування омичного контакту на основі нікелю пов'язана з проникненням до області об'ємного заряду p^+ - n -переходу атомів Ni, що не були залучені до утворення силіциду нікелю. Застосування розробленої технології виготовлення структур варикапів з використанням низькотемпературного відпалу в атмосфері аргону після формування омичного контакту на основі нікелю дозволяє вивести з області об'ємного заряду p^+ - n -переходу атоми Ni, у результаті чого знижується рівень зворотних струмів діодів і, як наслідок, підвищується відсоток виходу придатних приладів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. 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.
2. Викулин И.М., Стафеев В.И. *Физика полупроводниковых приборов*. Москва, Радио и связь, 1990, 264 с.
3. Ирха В.И. Флуктуационные процессы в варикапах. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*, 2016, № 1, с. 15–21.
4. Савченко М.П., Старовойтова О.В. Цепь отрицательной обратной связи по шумам для автогенератора с варикапами. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Физико-математические и технические науки*, 2016, №2, с. 66–69.
5. Спиридонов А.Б., Лицоев С.В., Петручук И.И. Разработка МДП-варикапа с переносом заряда в СВЧ-диапазоне. *Прикладная физика*, 2016, № 3, с. 75–80.
6. Курносоев А. И., Юдин В. В. *Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем*. Москва, Высшая школа, 1986. 368 с.
7. Поут Дж., Ту К., Мейер Дж., Розенберг Р. *Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакции* / Под ред. Дж. Поута. Москва, Мир, 1982, 576 с.
8. Литвиненко В.Н., Богач Н.В. Дефекты и примеси в кремнии и методы их геттерирования. *Вісник ХНТУ*, 2017, т. 60, №1, с. 32–42.
9. Рейви К. *Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии*. Москва, Мир, 1984, 472 с.
10. Бахадирханов М.К., Исмаилов Б.К. Геттерирующие свойства кластеров атомов никеля в решетке кремния. *Приборы*, 2020, т. 240, № 6, с. 44–48.
11. Воробей Р.И., Гусев О.К., Тявловский К.Л. и др. Геттерирование эпитаксиальных структур редкоземельными элементами. *Труды 10-й Междунар. конф. «Приборостроение – 2017»*. РБ, Минск, 2017, с. 73–74.
12. 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>
13. Литвиненко В.М., Богач М.В. Моделювання процесів гетерування швидкодіючих діодів в технології діодів Шоттки. *Вісник ХНТУ*, 2019, т. 68, №1, с. 25–33.
14. Литвиненко В.М. *Фізика та технологія напівпровідникових діодів*. Херсон, ФОП Вишемирський В.С., 2018, 184 с.
15. Литвиненко В.М. Исследование влияния сезонных факторов на обратные токи кремниевых варикапов. *Вісник ХНТУ*, 2016, т. 56, № 1, с. 39–44.
16. 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.
17. 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.
18. Лабунов В.А., Баранов И.Л., Бондаренко В.П., Дорофеев А.М. Современные методы геттерирования в технологии полупроводниковой электроники. *Зарубежная электронная техника*, № 11(270), 1983, с. 3–66.
19. Верховский Е.И. Методы геттерирования примесей в кремнии. *Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы*, 1981, вып. 8(838), с. 1–48.
20. 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.
21. Vikulin I.M., Litvinenko V.N., Shutov S.V. et al. Enhancing parameters of silicon varicaps using laser gettering. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2018, no. 2, p. 29–32. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2018.2.29>
22. 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.
23. Litvinenko V. N., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Improvement of the reverse characteristics of Schottky diodes using gettering. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2019, no. 1–2, p. 34–39. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2019.1-2.34>
24. Литвиненко В.М., Вікулін І.М. Вплив властивостей поверхні на зворотні характеристики напівпровідникових приладів. *Вісник ХНТУ*, 2018, т. 64, № 1, с. 46–56.
25. Litvinenko V. N., Baganov Ye. A., Vikulin I.M., Gorbachev V.E. Influence of gettering on aluminum ohmic contact formation. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2020, no. 1–2, p. 45–50. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2020.1-2.45>
26. Воробьев Ю.В., Добровольский В.Н., Стриха В.И. *Методы исследования полупроводников*. Киев, Выща школа, 1988, 232 с.
27. Мьюрарка Ш. *Силициды для СБИС*. Москва, Мир, 1986, 176 с.
28. Милнс А. *Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках*. Москва, Мир, 1977, 562 с.

*Дата надходження рукопису
до редакції 25.12 2022 р.*

Опис статті для цитування:

Литвиненко В. М., Шутов С. В. Поліпшення зворотних характеристик кремнієвого варикапа за допомогою низькотемпературного гетерування. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2 с. 43–49. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.1-2.43>

Cite the article as:

Litvinenko V. N., Shutov S.V. Improvement of inverse characteristics of silicon varicap by using low-temperature gettering. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 43–49. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.1-2.43>

IMPROVEMENT OF INVERSE CHARACTERISTICS OF SILICON VARICAP BY USING LOW-TEMPERATURE GETTERING

Varicaps are widely used in radio electronics as a variable capacitance, the value of which is controlled by voltage. However, it should be noted that the cost of varicaps remains relatively high due to a low yield of suitable devices. This is caused by high levels of reverse currents and low breakdown voltages of varicaps, which is determined by the significant dependence of the reverse characteristics of varicaps on the density of structural defects and heavy metal impurities in their active regions.

This study aimed to discover the causes and mechanisms of degradation of the reverse characteristics of varicaps with an ohmic contact based on nickel during annealing of a nickel film during the formation of an ohmic contact. Another goal was to determine the possibility of using gettering operations to prevent degradation of the reverse characteristics of varicaps and increase the yield of suitable devices.

The conducted experimental studies have shown that the reason for the degradation of the reverse characteristics of varicaps during the formation of a nickel-based ohmic contact is that, during the annealing of the nickel film, the excess nickel atoms not involved in the formation of NiSi silicide penetrate into the region of the space charge of the p-n junction.

The authors consider in detail the proposed technology for manufacturing nickel-based varicap structures with an ohmic contact using gettering of excess nickel atoms by carrying out additional low-temperature annealing of varicap structures using a ready-made “intrinsic getter” — the Si-NiSi interface.

It is shown that the developed technology for fabricating varicap structures using gettering makes it possible to clean the active regions of varicaps from nickel atoms, which ensures a significant decrease in the level of varicap reverse currents and an increase in the yield of suitable devices.

Keywords: nickel atoms, ohmic contact, gettering, varicap, structural defects, reverse current.

REFERENCES

1. Timoshenkov S. P., Boyko A. N., Gaev D. S., Kalmykov R. M. Integrated high-capacity varicap based on porous silicon. *Izvestiya vuzov. Elektronika*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 15–19. (Rus)
2. Vikulin I.M., Stafeyev V.I. *Fizika Poluprovodnikovyykh priborov* [Physics of Semiconductor Devices]. Moscow, Radio i Svyaz', 1990, 264 p. (Rus)
3. Irha V.I. Fluctuation processes in varicaps. *Proceedings of the O. S. Popov ONAT*, 2016, no. 1, pp. 15–21. (Ukr)
4. Savchenko M. P., Starovoitova O. V. Negative feedback circuit by noise for an autogenerator with varicaps. *Vestnik Baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskije nauki*, 2016, no. 2, pp. 66–69. (Rus)
5. Spiridonov A.B., Lytsoev S.V., Petrichuk I.Y. Development of MDP-varicap with charge transfer in the microwave range. *Applied Physics*, 2016, no. 3, p. 75–80. (Rus)
6. Kurnosov A. I., Yudin V. V. *Tekhnologiya proizvodstva poluprovodnikovyykh priborov i integral'nykh mikroskhem* [Fabrication technology of semiconductor devices and integrated circuits]. Moscow, Vysshaya Shkola, 1986, 368 p. (Rus)
7. Pout Dzh., Tu K., Meyyer Dzh., Rozenberg R. *Tonkiye plenki. Vzaimnaya diffuziya i reaktsii* [Thin films. Mutual diffusion and reactions] / Ed by Dzh. Pouta. Moscow, Mir, 1982, 576 p. (Rus)
8. 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)
9. Ravi K.V. *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*. John Wiley & Sons, New York, 1981, 379 p.
10. Bakhadirhanov M.K., Ismailov B.K. Gettering properties of clusters of nickel atoms in the silicon lattice. *Devices*, 2020, vol. 240, iss. 6, pp. 44–48. (Rus)
11. Vorobey R.Y., Gusev O.K., Tyavlovsky K.L., Shadurskaya L.I., Rusakevich D.A. Getterization of epitaxial structures with rare earth elements. *10th International Conference “Pryborostroenie-2017”. Section 1. Measuring systems and devices, technical safety means*. Minsk, 2017, pp. 73–74. (Rus)
12. 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)
13. Litvinenko V. M., Bohach M. V. Modeling of heterization processes of fast-diffusing impurities in Schottky diode technology. *Visnyk of KhNTU*, 2019, vol. 68, no. 1, pp. 25–33. (Ukr)
14. Litvinenko V.M. *Fizyka ta tekhnolohiya napivprovidnykovyykh diodiv* [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]. Kherson, Vyshemirsky V.S., 2018, 184 p. (Ukr)
15. 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)
16. Nemtsev G.Z., Pekarev A.I., Chistyakov Yu.D., Burmistrov A.N. Gettering of point defects in semiconductor device manufacturing. *Foreign Electronic Technology*, 1981, vol. 245, iss. 311, pp. 3–63. (Rus)
17. 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).

18. Labunov V.A., Baranov I.L., Bondarenko V.P., Dorofeev A.M. Modern methods of gettering in semiconductor electronics technology. *Foreign electronic technology*, 1983, no. 11(270), pp. 3–66. (Rus)

19. Verkhovsky E.I. Methods for gettering impurities in silicon. *Reviews on Electronic Technology. Ser. 2. Semiconductor Devices*, 1981, iss. 8 (838), pp. 1–48. (Rus)

20. 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)

21. 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. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.29>

22. 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)

23. 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. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2019.1-2.34>

24. Litvinenko V.M., Vikulin I.M. Influence of surface properties on reverse characteristics of semiconductor devices. *Visnyk of KhNTU*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 46–56. (Ukr)

25. 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, pp. 45–50. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.1-2.45>

26. Vorobyev Yu.V., Dobrovolskyi V.N., Strykha V.Y. *Metody issledovaniya poluprovodnikov* [Semiconductor research methods]. Kyiv, Vyshcha Shkola, 1988, 232 p. (Rus)

27. Murarka S.P. *Silicides for VLSI Applications*. Academic Press, 1983, 200 p.

28. Milnes A. G. *Deep Impurities in Semiconductors*. John Wiley & Sons, New York, 1973, 526 p.

НОВІ КНИГИ

НОВІ КНИГИ

Заячук Д. М. Нанотехнології в медицині та біології. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022.

Викладено основи нанотехнологій в їх застосуванні до потреб медицини й біології: основні поняття наномедицини; візуалізація нанооб'єктів біологічного походження; адресне доставлення ліків та системи її реалізації; питання наноносіїв для транспорту ліків, засобів їх адресації та наведення на мішень; сучасні матеріали для наномедицини: ліпосоми, дендримери, наноструктури карбону — фулерени та нанотрубки, металеві нанооболонки та металовмісні наночастинки, напівпровідникові квантові точки; лабораторії на чипі, їхні переваги та сфери застосування; розглянуто потенційні ризики, які може створювати використання нанотехнологій в медицині. Для студентів, аспірантів та молодих вчених.

