

УДК 621.382.28

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.53>

ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІОДА З БАР'ЄРОМ ШОТТКІ

Литвиненко В. М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-9425-5551

Діод Шотткі – це напівпровідниковий діод, випрямні властивості якого засновані на взаємодії металу та збідненого шару напівпровідника. Для створення діодів Шотткі використовується перехід метал-напівпровідник. Робота цих діодів заснована на перенесенні основних носіїв заряду і характеризується високою швидкістю, так як в них відсутнє характерне для p-n переходів накопичення неосновних носіїв заряду. Діоди Шотткі використовують як елементи інтегральних мікросхем, а також як дискретні прилади. Найчастіше для виготовлення діодів з бар'єром Шотткі використовують підкладки з кремнію з низьким опором та з тонким шаром епітаксії з високим опором. На поверхню шару епітаксії наносять металевий електрод для отримання випрямляючого контакту. В статті розглянуті причини та механізми деградації зворотних характеристик діода Шотткі. Показано, що причиною низького виходу діодів являється суттєвий вплив на їх зворотні характеристики структурних дефектів і сторонніх домішок та якості поверхні діодних структур. Встановлено, що головною причиною низького відсотка виходу придатних досліджуваних діодів Шотткі є окислювальні дефекти упакування, що утворюються в активних областях діодних структур в процесах проведення високотемпературних операцій, а також поверхневі ефекти за рахунок домішкових забруднень. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню ОДУ є метод створення гетеруючої області на зворотній області пластини за допомогою імплантації іонів аргону у зворотний бік пластини та подальшого відпалу пластин у суміші азоту та кисню перед осадженням шарів нітриду кремнію. Для поліпшення стану поверхні діодних структур і зменшення рівня їх зворотних струмів був розроблений метод гетерування сторонніх домішок на поверхні діодних структур за допомогою проведення дифузії бору в робочу сторону пластин після формування захисного шару SiO_2 . Наведено експериментальні результати дослідження впливу на зворотні характеристики діода Шотткі двостороннього гетерування, а також проаналізовано можливі механізми цього впливу. Показана ефективність запропонованої технології з використанням гетерування щодо зниження рівня зворотних струмів і підвищення виходу придатних приладів.

Ключові слова: діод Шотткі, структурні дефекти, гетерування, окислювальні дефекти упакування, поверхневі ефекти, зворотний струм.

Lytvynenko V. M. Improvement of the electrical parameters of the schottky barrier diode

A Schottky diode is a semiconductor diode whose rectification properties are based on the interaction of a metal and a depleted semiconductor layer. A metal-semiconductor transition is used to create Schottky diodes. The operation of these diodes is based on the transfer of the main charge carriers and is characterized by high speed, since they do not have the accumulation of non-main charge carriers characteristic of p-n transitions. Schottky diodes are used as elements of integrated circuits, as well as as discrete devices. Most often, for the manufacture of Schottky barrier diodes, substrates made of silicon with low resistance and a thin layer of epitaxy with high resistance are used. A metal electrode is applied to the surface of the epitaxy layer to obtain a rectifying contact. The article discusses the causes and mechanisms of degradation of the reverse characteristics of the Schottky diode. It is shown that the reason for the low yield of diodes is the significant influence on their reverse characteristics of structural defects and foreign impurities and the quality of the surface of diode structures. It has been established that the main reason for the low yield percentage of suitable studied Schottky diodes is oxidizing packing defects formed in the active regions of diode structures during high-temperature operations, as well as surface effects due to impurities. The conducted studies showed that the most effective method of preventing the formation of ODS is the method of creating a heterogenization region

on the reverse side of the plate with the help of implantation of argon ions in the reverse side of the plate and subsequent annealing of the plates in a mixture of nitrogen and oxygen before the deposition of silicon nitride layers. To improve the state of the surface of diode structures and reduce the level of their reverse currents, a method of heterization of extraneous impurities on the surface of diode structures was developed by means of boron diffusion into the working side of the plates after the formation of the SiO_2 protective layer. The experimental results of the study of the effect on the reverse characteristics of the two-way heterojunction Schottky diode are presented, as well as the possible mechanisms of this effect are analyzed. The effectiveness of the proposed technology with the use of heterizing in reducing the level of reverse currents and increasing the output of suitable devices is shown.

Key words: Schottky diode, structural defects, heterization, oxidation packing defects, surface effects, reverse current.

Постановка проблеми. Діоди Шотткі широко використовуються в багатьох областях електроніки як випрямляючі діоди невеликої та середньої потужності, а також як імпульсні діоди [1, 2]. При цьому слід зазначити, що вартість діодів Шотткі залишається порівняно високою через низький вихід придатних діодів, що пояснюється їх високим рівнем зворотного струму і нижчою, порівняно з р-п переходами, пробивною напругою. Ці явища пов'язані із суттєвою залежністю зворотного струму діода Шотткі від якості поверхні діодної структури та впливу на нього структурних дефектів та сторонніх домішок [3, 4].

Серед структурних дефектів насамперед слід зазначити окислювальні дефекти упакування (ОДУ), що утворюються в активних областях діодів під час проведення високотемпературних операцій [2]. Зазвичай ОДУ розташовуються у приповерхневій ділянці кристала. Не декоровані домішками ОДУ мало впливають на зворотні властивості діодів. Декорування ОДУ домішками важких металів у процесі термічного окиснення призводить до того, що у приповерхневому шарі кремнію утворюється висока щільність поверхневих станів. Після осадження на таку поверхню молибдену, що формує бар'єр Шотткі, бар'єр межі розділу «метал – напівпровідник» стає досить тонким для тунельного проходження електронів з металу в напівпровідник при зворотному зміщенні переходу [5].

Формулювання мети дослідження. Метою даної роботи є дослідження впливу структурних дефектів та домішкових забруднень поверхні на рівень зворотних струмів діодів Шотткі і визначення можливості застосування операцій гетерування для його зниження та підвищення виходу придатних приладів.

Експериментальні зразки. Структури досліджуваних діодів виготовлялися за ізопланарною технологією [6] на кремнієвих епітаксціальних структурах n-типу провідності з питомим опором $1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і товщиною 3 мкм , вирощених на кремнієвій підкладці, орієнтованій за площиною (111).

Базовий технологічний маршрут виготовлення діодних структур включав такі основні технологічні операції: – стандартну хімічну обробку пластин; послідовне нанесення шарів нітриду та двоокису кремнію, товщиною відповідно $0,1$ та $0,3 \text{ мкм}$; формування методами фотолітографії меза-структур висотою $0,5 \text{ мкм}$, використовуючи як маску круглі ділянки нітриду кремнію діаметром 50 мкм ; окислення меза-структур при температурі 1050°C протягом $2,5$ год з наступним чергуванням циклів окислювального середовища: сухий O_2 (10 хв) – пари води (100 хв) – сухий O_2 (10 хв) і завершальним відпалом в атмосфері аргону протягом 30 хв за температури окиснення; товщина вирощеного захисного шару двоокису кремнію SiO_2 (рис. 1) становила $0,7 \text{ мкм}$; видалення плівки нітриду кремнію з контактних майданчиків витримкою структур у киплячій ортофосфорній кислоті (час травлення 30 хв), попередньо витримавши структури в травнику ($\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$

= 1 : 20) протягом 20 с (на випадок наявності тонкої плівки SiO_2 на поверхні нітриду); осадження методом вакуумного термічного випаровування шару молібдену (Mo) товщиною 0,3 мкм та формування методами фотолітографії випрямляючого контакту діаметром 60 мкм; шліфування пластини з боку підкладки до товщини 180...200 мкм; формування омичного контакту зі зворотного боку пластини послідовним нанесенням шарів титану (Ti), нікелю (Ni) (методом вакуумного термічного випаровування) та золота (Au) (методом гальванічного осадження). В результаті отримуємо структуру діода, наведену на рис. 1.

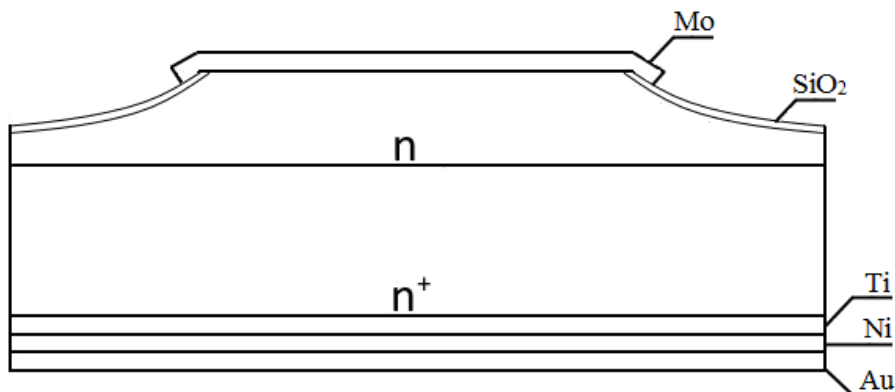


Рис. 1. Структура діода Шотткі, виготовлена за базовою технологією

Дослідження структурних дефектів. Проведені дослідження відбракованих непридатних за рівнем зворотного струму діодні структури показали наявність у їх активних областях високої щільності окислювальних дефектів упаковки. Виявлення структурних дефектів проводилося за допомогою селективного травлення структур в реактиві Сіртла протягом від 10 до 180 с. Встановлення виду структурних дефектів та оцінка їх щільності проводилися за допомогою металографічного мікроскопа МЕТАМ-1. В активних областях діодів було виявлено ОДУ щільністю до 10^5 см^{-2} .

Мікрофотографію поверхні однієї з досліджуваних діодних структур після селективного травлення в реактиві Сіртла протягом 25 с наведено на рис. 2.



Рис. 2. Поверхня діодної структури з виявленими ОДУ

Вибір технології гетерування. Для запобігання утворення ОДУ необхідно було вибрати ефективний метод гетерування, який органічно вписувався б у технологічний маршрут виготовлення діода [7–9]. Так як ОДУ утворюються, починаючи з першої високотемпературної операції – термічного окислення, то очевидно, що слід використовувати гетерування вже на початку технологічного маршруту виготовлення діода. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним для придушення ОДУ є метод створення гетеруючої області на зворотній стороні пластини за допомогою імплантації іонів аргону у зворотний бік пластини та подальшого відпалу пластин у суміші азоту та кисню перед осадженням шарів нітриду кремнію.

Область гетера на звороті пластини була сформована за допомогою імплантації іонів аргону у зворотний бік пластини з енергією 100 кеВ, дозою $5 \cdot 10^{15} \text{см}^{-2}$ на установці «Везувій-5» та подальшого відпалу пластин у суміші азоту (130 л/год) та кисню (6 л/год) при температурі $T=1100^\circ\text{C}$ протягом 3 год.

Для поліпшення стану поверхні структур діодів і зменшення рівня їх зворотних струмів був випробуваний метод гетерування за допомогою проведення дифузії бору в робочу сторону структур після формування захисного шару SiO_2 [4]. Дифузія бору проводилася методом відкритої труби з джерела B_2O_3 за температури 950°C протягом 30 хв у суміші аргону (100 л/год) і сухого кисню (4 л/год). При цьому на поверхні захисного шару двоокису кремнію утворилася плівка боросилікатного скла (БСС) (рис. 3).

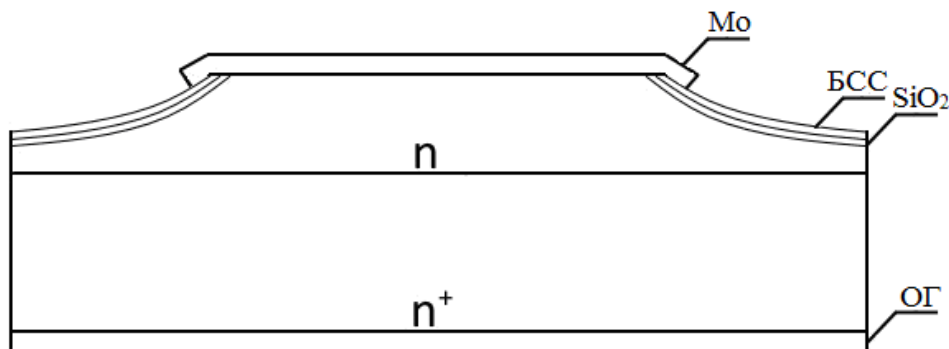


Рис. 3. Структура діода Шотткі, виготовлена за розробленою технологією, перед операцією шліфування зворотної сторони пластини: ОГ – область гетера

Вплив додаткової дифузії бору, що проводиться в робочу сторону пластин після окислення меза-структур, на якість поверхні діодних структур оцінювали за методикою наведеною в роботі [4]. На контрольних пластинках вирощувалася плівка SiO_2 в умовах аналогічних до окислення меза-структур. Далі контрольні пластини ділилися навпіл і на одній з половинок проводилася дифузія бору в шар SiO_2 за режимами, що відповідають проведенню дифузії бору в технологічному циклі виготовлення діода Шотткі відповідно до розробленої технології. На обидві половинки пластин осаджували Al і з допомогою фотолітографії виготовляли МОН – структури ($\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$). За методикою [4], із застосуванням C-V методу, розраховували величину сумарного заряду Q_{ss1} на МОН – структурі, виготовленої з використанням додаткової дифузії бору, а також величину сумарного заряду

Q_{ss2} на МОН – структурі, виготовлену без використання додаткової дифузії бору. Отримали такі результати: $Q_{ss1} = 2,3 \cdot 10^{-9}$ Кл; $Q_{ss2} = 3,2 \cdot 10^{-9}$ Кл. Розраховували відношення зарядів: $Q_{ss2} / Q_{ss1} = (3,2 \cdot 10^{-9}) \text{ Кл} / (2,3 \cdot 10^{-9}) \text{ Кл} \approx 1,4$. Таким чином, проведення додаткової дифузії бору дозволило зменшити в 1,4 рази величину сумарного заряду SiO_2 , що адекватно зменшенню щільності поверхневих станів на межі розділу $\text{Si} - \text{SiO}_2$. Це дозволяє істотно зменшити явище тунелювання носіїв струму крізь потенційний бар'єр і тим самим зменшити рівень зворотних струмів діодів.

Дослідження ефективності розробленої технології. Для випробування запропонованої технології виготовлення структур діода Шотткі були сформовані дослідні партії, кожна з яких ділилася на дві частини: одна частина партії була виготовлена за базовою технологією, друга частина – за розробленою технологією із застосуванням 2 стадій гетерування дефектів:

1) гетерування областю гетера, створеною на зворотній стороні пластини перед осадженням нітриду кремнію;

2) гетерування шаром боросилікатного скла, в процесі проведення дифузії бору в робочий бік пластин після окислення меза-структур. Ефективність використання запропонованої технології оцінювалася за відсотком виходу придатних діодних структур на контролі зворотного струму ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 1 \text{ мкА}$ при зворотній напрузі 30 В.

У таблиці 1 наведено порівняльні результати розбракування за зворотним струмом діодів, виготовлених за базовою (партії № 1, 2, 3) та розробленою (партії № 4, 5, 6) технологіями. Видно, що використання розробленої технології виготовлення діодів дозволяє підвищити вихід придатних діодних структур за зворотним струмом в середньому на 10,1%. При цьому діодні структури, виготовлені за розробленою технологією, мали рівень зворотних струмів у 3...6 разів нижчий порівняно з діодними структурами, виготовленими за базовою технологією.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики базової та розробленої технологій

Технологія виготовлення діодних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних діодних структур на контролі рівня їх зворотних струмів, %
Без використання гетерування	1	83,5
	2	84,1
	3	82,4
З використанням 2 стадій гетерування	4	94,2
	5	93,3
	6	92,8

Проведені перед формуванням випрямляючого контакту металографічні дослідження на структурах діодів, виготовлених із застосуванням гетерування, показали відсутність у структурах окисних дефектів упакування (рис. 4).

На рис. 5 наведено зворотні гілки ВАХ діодних структур, виготовлених за базовою технологією, а також у разі застосування 2 стадій гетерування структурно-домішкових дефектів.

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



Рис. 4. Поверхня діодної структури, виготовленої з використанням гетерування

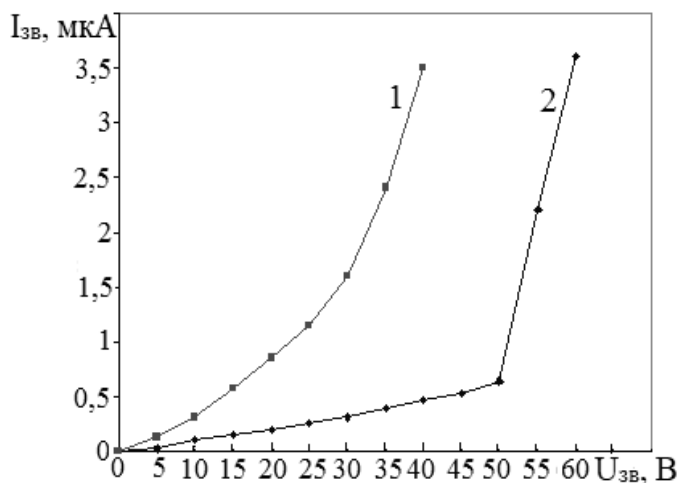


Рис. 5. Вольт-амперні характеристики діодних структур: 1 – виготовленої за базовою технологією; 2 – виготовленої з використанням двох стадій гетерування

Вплив створеної на звороті пластини області гетера перед осадженням нітриду кремнію на параметри діода можна пояснити таким чином. У процесі відпау після імплантації іонів аргону на зворотній стороні пластини формується висока щільність дислокацій, що є стоком для домішок металів, також пригнічуються зародки ОДУ, які можуть утворюватися в кремнії при вирощуванні злитків і в процесі епітаксії. Це значною мірою запобігає утворенню ОДУ в процесі термічного окислення пластин. Якщо з будь-якої причини ОДУ в процесі термічного окислення все-таки утворилися, то в процесі проведення наступної високотемпературної операції – дифузії бору атоми кремнію, що становлять ОДУ, дифундують до стоків області гетера, створеним на зворотній стороні пластини, і захоплюються ними, що призводить до ліквідації ОДУ (див. рис. 4). Ефективне гетерування неконтрольованих домішок (зазвичай, домішок важких металів) та структурних дефектів, утвореним на зворотній стороні пластини гетеруючим шаром, забезпечує значне зниження рівня зворотних струмів діодних структур та збільшення виходу придатних діодів Шотткі.

Позитивну дію дифузії бору, яка була проведена в робочу сторону пластин після окислення меза-структур, можна пояснити наступним чином. У процесі проведення дифузії бору на поверхні захисної плівки SiO_2 формується шар боросилікатного скла, який виявляє гетеруючу дію по відношенню до домішкових забруднень, які зазвичай потрапляють у шар SiO_2 , що вирощується при термічному окисненні зі стінок кварцової труби і окислювального середовища (Na, K, Fe, Ni, Cu та ін). За рахунок гетеруючої дії шару боросилікатного скла в процесі дифузії бору здійснюється глибоке очищення захисного шару оксиду кремнію і межі розділу Si-SiO₂ від сторонніх домішок, що дозволяє зменшити величину сумарного заряду SiO₂, що рівнозначно зменшенню щільності поверхневих станів на межі розділу Si – SiO₂. Досягнуте, за рахунок застосування гетерування, поліпшення якості поверхні структур практично виключає явище тунелювання носіїв струму крізь потенційний бар'єр, що, у свою чергу, забезпечує зменшення рівня зворотних струмів діодів. Крім того, вирощений на поверхні SiO₂ шар боросилікатного скла дає можливість уникнути попадання в об'єм захисного шару SiO₂ небажаних домішок на наступних технологічних операціях, пов'язаних з нагріванням діодних структур (зокрема, на операції «Вакуумне осадження металів» – при формуванні бар'єру Шотткі на робочій стороні пластини та омичного контакту на неробочій стороні пластини).

Висновки. Таким чином, причиною низького відсотка виходу структур діода Шотткі на операції контролю рівня їх зворотного струму є окислювальні дефекти упакування, що утворюються в активних областях діодів у процесі проведення термічного окиснення та домішкові забруднення на поверхні діодних структур. Розроблена технологія виготовлення структур діода Шотткі із застосуванням 2 стадій гетерування структурно-домішкових дефектів дозволяє запобігти утворенню або ліквідувати вже утворені окислювальні дефекти упакування в активних областях діодів і покращити стан поверхні діодних структур, що забезпечує зниження рівня зворотних струмів діодів і, як наслідок, підвищення виходу придатних приладів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Литвиненко В.М. Фізика та технологія напівпровідникових діодів. Херсон : ФОП Вишемирський В.С, 2018. 184 с.
2. Ravi K.V. Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon. John Wiley & Sons, New York, 1981. 379 p.
3. Meda L., Gerofolini G.F., Queirodo Gr. Impurities and defects in silicon single crystal //Progress Crystal Growth and Characterization, 1987. Vol.15. № 2. P. 97-131.
4. Литвиненко В.М., Вікулін І.М. Вплив властивостей поверхні на зворотні характеристики напівпровідникових приладів. Вісник ХНТУ, 2018. Т. 64. № 1. С. 46-56.
5. Литвиненко В.М., Богач М.В. Моделювання процесів гетерування швидко-дифундуючих домішок в технології діодів Шотткі. Вісник ХНТУ, 2019. Т.68. № 1. С. 25-33.
6. Павлов С. М. Основи мікроелектроніки. Навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 224 с.
7. Lecrosnier D., Paugam J., Richou F. et al. Influence of phosphorus-induced point defects on a gold- gettering mechanism in silicon // J. Appl. Phys., 1980. Vol. 51. № 2. P. 1036-1040.
8. Renschi S. Durability of mechanical damage gettering effect in Si wafers // Japanese Journal of Applied Physics, 1984. Vol. 23. № 8. Pt.1. P. 959-964.
9. Prussin S. Ion implantation gettering: a fundamental approach // Solid State Technology, 1981. № 7. P. 52-54.

REFERENCES:

1. Litvinenko V.M. (2018) *Fizyka ta tekhnolohiya napivprovidnykovykh diodiv* [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]. Kherson. Vyshemirsky V.S., 184 p [in Ukrainian].
2. Ravi K.V. (1981) *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*. John Wiley & Sons, New York, 379 p.
3. Meda L., Gerofolini G.F., Queirodo Gr. (1987) Impurities and defects in silicon single crystal // *Progress Crystal Growth and Characterization*, 15(2), 97-131.
4. Lytvynenko V.M., Vikulin I.M. (2018) Influence of surface properties on reverse characteristics of semiconductor devices. *Visnyk of KhNTU*, 64(1), 46-56 [in Ukrainian].
5. Litvinenko V. N., Bohach N. V. (2019) Modeling of heterization processes of fast-diffusing impurities in Schottky diode technology. *Visnyk of KhNTU*, 68(1), 25-33 [in Ukrainian].
6. Pavlov S. M. (2010) *Fundamentals of microelectronics*. Tutorial. Vinnytsia: VNTU, 224 p. [in Ukrainian]
7. Lecrosnier D., Paugam J., Richou F. et al. (1980) Influence of phosphorus-induced point defects on a gold- gettering mechanism in silicon // *J. Appl. Phys*, 51(2), 1036-1040.
8. Rensch S. (1984) Durability of mechanical damage gettering effect in Si wafers // *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(8), 1, 959-964.
9. Prussin S. (1981) Ion implantation gettering: a fundamental approach // *Solid State Technology*, (7), 52-54.