

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.5.30>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕТЕРУВАННЯ СТРУКТУРНИХ ДЕФЕКТІВ ДИФУЗІЙНИМ ЛЕГУВАННЯМ У ВИРОБНИЦТВІ КРЕМНІЄВИХ ДІОДІВ

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

Варикап – це напівпровідниковий діод, дія якого заснована на використанні залежності ємності від зворотної напруги і який призначений для застосування як елемент із електрично керованою ємністю. Як керована ємність використовується бар'єрна (зарядова) ємність $p-n$ переходу. Дифузійна ємність не підходить для цієї цілі, так як вона проявляється при прямому зміщенні $p-n$ переходу, коли рівень прямого струму через діод великий, отже, для керування величиною дифузійної ємності необхідно витратити значну потужність джерела живлення. В той же час на зміну величини бар'єрної ємності при зворотному включенні варикапу витрачається зовсім незначна потужність джерела живлення.

Однак незважаючи на широке застосування, вартість варикапів залишається порівняно високою із-за низького виходу придатних варикапів, що визначається істотною залежністю зворотних характеристик варикапів від щільності структурних дефектів і домішок важких металів в їх активних областях. В статті розглянуті причини та механізми деградації зворотних характеристик варикапа. Встановлено, що головною причиною низького відсотка виходу придатних досліджуваних варикапів є окислювальні дефекти упакування, що утворюються в кремнієвих структурах в процесі проведення високотемпературних технологічних операцій. Для запобігання утворенню ОДУ, які були виявлені в епітаксійних структурах після термічного окислення, або зменшення їх щільності необхідно було вибрати ефективний метод гетерування. Так як ОДУ утворюються, починаючи з першої високотемпературної технологічної операції – термічного окислення, то очевидно, що слідє використовувати гетерування уже на самому початку технологічного маршруту виготовлення варикапа. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню структурних дефектів в епітаксціальних шарах є створення гетеруючої області на зворотному боці підкладок за допомогою проведення дифузії бору в неробочу сторону пластин перед їх термічним окисленням. Робота присвячена дослідженню порівняльної ефективності використання методу гетерування проведенням додаткової дифузії бору в неробочу сторону пластин: стандартного методу, який здійснюється після термічного окислення пластин, та модернізованого методу, який здійснюється перед термічним окисленням пластин, на рівень зворотного струму варикапних структур та відсоток виходу придатних приладів. Наведено експериментальні результати дослідження впливу на зворотну характеристику варикапа кожного з досліджуваних процесів гетерування, а також проаналізовано можливі механізми цього впливу.

Ключові слова: варикап, гетерування, дифузія бору, дефекти упакування, зворотний струм, домішки.

Litvinenko V. M. Study of the efficiency of heterogeneity of structural defects by diffusion doping in the production of silicon diodes

A varicap is a semiconductor diode whose operation is based on the use of the dependence of the capacitance on the reverse voltage and which is intended for use as an element with an electrically controlled capacitance. The barrier (charge) capacity of the $p-n$ junction is used as the controlled capacity. Diffusion capacitance is not suitable for this purpose, as it manifests itself in the direct bias of the $p-n$ junction, when the level of direct current through the diode is large, therefore, to control the value of diffusion capacitance, it is necessary to spend significant power of the power source. At the same time, changing the value of the barrier capacity when the varicap is turned on in reverse consumes very little power from the power source.

However, despite the wide application, the cost of varicaps remains relatively high due to the low yield of suitable varicaps, which is determined by the significant dependence of the inverse

characteristics of varicaps on the density of structural defects and heavy metal impurities in their active regions. The article discusses the causes and mechanisms of degradation of the reverse characteristics of the varicap. It was established that the main reason for the low percentage of yield of suitable investigated varicaps is the oxidation defects of the packaging formed in silicon structures during high-temperature technological operations. In order to prevent the formation of ODEs, which were detected in epitaxial structures after thermal oxidation, or to reduce their density, it was necessary to choose an effective method of heterization. Since ODUs are formed starting with the first high-temperature technological operation – thermal oxidation, it is obvious that heterization should be used at the very beginning of the technological route of varicap production. The conducted studies showed that the most effective method of preventing the formation of structural defects in epitaxial layers is the creation of a heterogenous region on the reverse side of the substrates by diffusion of boron to the non-working side of the plates before their thermal oxidation. The work is devoted to the study of the comparative efficiency of using the heterization method by carrying out additional diffusion of boron to the non-working side of the plates: the standard method, which is carried out after thermal oxidation of the plates, and the modernized method, which is carried out before thermal oxidation of the plates, on the level of reverse current of varicap structures and the percentage of output of suitable devices. The experimental results of the study of the influence on the inverse characteristic of the varicap of each of the researched heterogenization processes are presented, as well as the possible mechanisms of this influence are analyzed.

Key words: varicap, heterogenization, boron diffusion, packing defects, reverse current, impurities.

Постановка проблеми. Проблемою виробництва кремнієвих напівпровідникових діодів є порівняно висока їх вартість, що пояснюється низьким виходом придатних діодів із-за високого рівня зворотного струму приладів. Як показали дослідження, причиною низького виходу діодів являється суттєвий вплив на їх зворотні характеристики структурних дефектів і сторонніх домішок [1, 2]. Серед структурних дефектів, що утворюються в активних областях варикапних структур в процесі проведення високотемпературних операцій, в першу чергу, слід відмітити окислювальні дефекти упакування (ОДУ) [3]. Не декоровані домішками ОДУ практично не створюють впливу на зворотні характеристики діодів. Взаємодія ОДУ з домішками металів, які попадають на кремнієві пластини з травильних розчинів та кварцової оснастки дифузійних печей, а також взаємодія дефектів з матеріалами омичних контактів, нприклад Ni та Al, призводить до збільшення рівня зворотного струму діодів. Для зменшення щільності структурно-домішкових дефектів в кремнії використовуються різні методи гетерування [4], але, як показала практика, багато з них виявляються малоефективними для зниження рівня зворотного струму діодів.

Метою даної роботи є дослідження порівняльної ефективності впливу стандартного та модернізованого методів гетерування проведенням додаткової дифузії бору в неробочу сторону пластин на рівень зворотного струму діодних структур та відсоток виходу придатних приладів.

Експериментальні зразки. Досліджувані варикапні структури виготовлялися за стандартною планарно-епітаксальною технологією [7] на легованих фосфором кремнієвих епітаксійних структурах n-типу провідності з питомим опором $1,8 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ товщиною 10 мкм, вирощених на орієнтованій в кристалографічному напрямку (111) кремнієвій підкладці. Для виготовлення варикапних структур проводилися наступні 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; – нанесення на робочу сторону пластин захисного шару фоторезиста ФП383 і виделення шару SiO_2 з неробочої сторони пластини травленням в плавиковій кислоті. – проведення дифузії бору в неробочу сторону пластин при $T = 1200^\circ\text{C}$ на протязі 1 год в суміші аргону

(120 л/г) і кисню (5 л/год) із твердого джерела B_2O_3 ; – видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти; – (I) фотолітографія для відкривання вікон у шарі діоксиду кремнію під дифузію бору; – загонка бору в робочу сторону пластин методом відкритої труби з джерела домішки B_2O_3 за температури $1100^\circ C$ протягом 25 хв у суміші аргону (100 л/год) і сухого кисню (3 л/год); – видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти; – розгонка бору за температури $1150^\circ C$ з подальшим чергуванням циклів: розгонка в середовищі сухого кисню (20 хв) → розгонка в середовищі вологого кисню (3,5 год) → розгонка в середовищі сухого кисню (40 хв); – (II) фотолітографія для відкривання вікон у шарі діоксиду кремнію для створення омичного контакту з робочої сторони пластини; – осадження плівки алюмінію в вакуумі на робочу сторону пластин, проведення фотолітографії по шару алюмінію і відпал контакту в інертному середовищі за температури $550^\circ C$ на протязі 15 хвилин; – шліфування тильної сторони пластин до товщини 190–210 мкм; – формування омичного контакту з неробочої сторони пластини: хімічне осадження Ni з подальшим відпалом плівки нікелю за температури $680^\circ C$ у середовищі аргону (200 л/год) протягом 25 хв.

Примітка. Додаткова дифузія бору в зворотну сторону пластини після проведення термічного окислення пластин є гетерувальним технологічним процесом, що проводиться з метою ліквідації структурних дефектів типу ОДУ в активних областях варикапних структур. Застосування методу гетерування проведенням додаткової дифузії бору докладно розглянуто в [8].

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

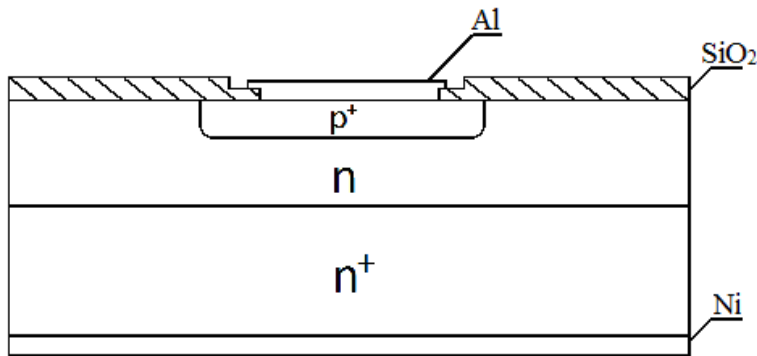


Рис. 1. Структура варикапа, що виготовлена за базовою технологією

Дослідження структурних дефектів. 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. На пластинах після проведення технологічної операції «термічне окислення пластин» були виявлені дефекти упаковки щільністю до $7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, при цьому час травлення структур у травнику Сіртла склав 20 с (рис. 2).

Вибір технології гетерування. З метою запобігання утворенню та ліквідації структурних дефектів у структурах кремнієвих діодів, зазвичай, застосовують гетерування – технологічний процес, що широко використовується у сучасному виробництві кремнієвих напівпровідникових приладів та інтегральних схем.

Гетерування дає можливість накопичувати небажані домішки в неробочих ділянках пластин і повністю ліквідувати структурні дефекти або значно зменшити щільність дефектів в активних областях діодів [4–6].

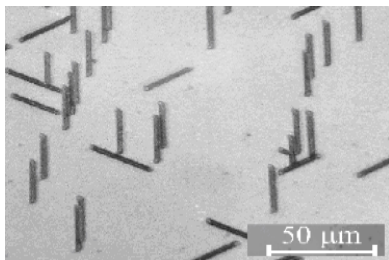


Рис. 2. Мікрофотографія поверхні епітаксильної структури після термічного окислення і проведення селективного травлення

Для запобігання утворенню ОДУ, які були виявлені в епітаксійних структурах після термічного окислення, або зменшення їх щільності необхідно було вибрати ефективний метод гетерування. Так як ОДУ утворюються, починаючи з першої високотемпературної операції – термічного окислення, то очевидно, що слідє використовувати гетерування уже на самому початку технологічного маршрута виготовлення варикапа. За базовою технологією в технологічному маршруті виготовлення варикапних структур використовується метод гетерування проведенням дифузії бору в неробочу сторону пластин після їх термічного окислення (див. розділ «експериментальні зразки»), що дало можливість, як показали дослідження, підвищити вихід придатних діодних структур на 10–15%. З метою підвищення ефективності гетерування дефектів і домішок в активних областях діодних структур і підвищення виходу придатних варикапів була проведена модернізація процесу гетерування дифузійним легуванням, яка заключалась в наступному. Перед термічним окисленням на робочу сторону пластин методом окислення моносилана осаджується захисна плівка SiO_2 товщиною 0,35 мкм при температурі підкладки 350°C. Гетеруючий процес дифузії проводився із твердого джерела в вакуумі при залишковому тиску 1,3 Па при температурі 1100°C на протязі 40 хв.

Проведені перед формуванням омичних контактів металографічні дослідження на варикапних структурах, виготовлених із застосуванням модернізованого методу гетерування проведенням дифузії бору в неробочу сторону пластин перед термічним окисленням, показали відсутність в них окислювальних дефектів упакування (рис. 3).



Рис. 3. Поверхня варикапної структури, виготовленої з використанням гетерування дифузійним легуванням

Дослідження ефективності розробленої технології. Для випробування модернізованого способу гетерування дифузійним легуванням були сформовані експериментальні партії варикапних структур, кожна з яких ділилася на дві рівні частини: одна частина партії була виготовлена з використанням стандартного методу гетерування дифузійним легуванням, інша – з використанням запропонованого модернізованого методу гетерування дифузійним легуванням. Ефективність використання запропонованого способу оцінювалася за відсотком виходу придатних варикапних структур на їх контролі по рівню зворотних струмів ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 0,2$ мкА при зворотній напрузі 35 В.

У таблиці 1 наведені порівняльні результати контролю за зворотним струмом варикапних структур, що виготовлені за базовою (партії № 4–6) і розробленою (партії № 1–3) технологіями. Видно, що використання запропонованої технології дає можливість підвищити вихід придатних варикапних структур у середньому на 5,7%. При цьому варикапні структури, виготовлені з використанням розробленого методу гетерування, мали рівень зворотних струмів в 2 рази нижчий у порівнянні з варикапними структурами, виготовленими з використанням стандартного методу гетерування.

Таблиця 1

Порівняльні результати контролю за зворотним струмом варикапних структур, що виготовлені за базовою і розробленою технологіями

Спосіб виготовлення варикапних структур	Номер експериментальної партії	Вихід придатних варикапних структур на контролі рівня їх зворотних струмів, %
З використанням розробленого методу гетерування	1	93
	2	92
	3	93
З використанням стандартного методу гетерування	4	87
	5	88
	6	86

Отже, використання запропонованого способу гетерування дозволяє суттєво підвищити вихід придатних варикапних структур на контролі рівня їх зворотних струмів, істотно знизивши при цьому рівень зворотних струмів варикапів.

На рис. 4 приведені зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених з використанням стандартного та розробленого методів гетерування. Видно, що варикапна структура, виготовлена з використанням розробленого методу гетерування має за зворотної напруги 35 В рівень зворотного струму приблизно в 2 рази менший, а також більшу пробивну напругу у порівнянні з варикапною структурою, виготовленою з використанням стандартного методу гетерування.

Одержані експериментальні результати можна пояснити наступним чином. При використанні стандартного методу гетерування в процесі проведення термічного окислення пластин в кремнії утворюються ОДУ, так як перед термічним окислення в кремнієвих пластинах знаходяться зародки ОДУ, які можуть утворюватись в кремнії при вирощуванні злитків і в процесі епітаксії. Утворені ОДУ повинні ліквідуватись в послідовному процесі гетерування проведенням дифузії бору в неробочу сторону пластини при температурі 1200°C в суміші аргону і кисню. При цьому повне очищення об'єму кремнієвої пластини від структурних

дефектів не гарантовано. При використанні розробленого методу гетерування дифузійним легуванням для захисту робочої сторони пластин використовують піролітичну плівку двоокису кремнію товщиною 0,35 мкм, осаджену за температури підкладки 350°C, що виключає утворення структурних дефектів в кремнії. В процесі гетерування, яке проводиться в вакуумі при температурі 1100°C відбувається ліквідація зародків ОДУ. Це запобігає утворенню ОДУ в процесі термічного окислення пластин та послідуєчих термічних операцій. Крім того, в процесі термічного окислення і послідуєчих термічних операцій область гетера ефективно поглинає неконтролюємі домішки із об'ємної і приповерхневої областей пластини, зменшуючи тим самим зворотні струми варикапів.

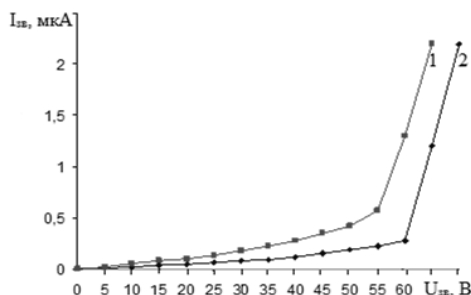


Рис. 4. Типові зворотні ВАХ варикапних структур: 1 – варикапна структура, виготовлена з використанням стандартного методу гетерування; 2 – варикапна структура, виготовлена з використанням розробленого методу гетерування

Висновки. За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що причиною низького відсотка виходу придатних варикапних структур при контролюванні їх зворотного струму є окислювальні дефекти упакування, які утворюються в активних областях діодів в процесах проведення високотемпературних технологічних операцій.

Перевага розробленого методу гетерування у порівнянні зі стандартним методом заключається в наступному: використання розробленого методу гетерування практично гарантує відсутність ОДУ в пластинах кремнію, так як перед проведенням термічного окислення з об'єму кремнієвих пластин видаляються зародки ОДУ. В той же час використання стандартного методу гетерування проведенням дифузії бору в неробочу сторону пластин після термічного окислення такої гарантії не дає.

Таким чином, розроблена технологія гетерування проведенням дифузії бору в неробочу сторону пластин перед їх термічним окисленням дає можливість запобігти утворенню окислювальних дефектів упакування в активних областях діодів, що забезпечує зниження рівня зворотних струмів діодів і, як наслідок, підвищення відсотка виходу придатних приладів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Milnes A. G. Deep Impurities In Semiconductors. John Wiley & Sons, New York, 1973. 526 p.
2. 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.
3. Ravi K.V. Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon. John Wiley & Sons, New York, 1981. 379 p.

4. Литвиненко В.М., Богач М.В. Моделювання процесів гетерування швидко-дифундуючих домішок в технології діодів Шоттки. Вісник ХНТУ, 2019. Т. 68. № 1. С. 25-33.

5. 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.

6. 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.

7. Литвиненко В.М. Фізика та технологія напівпровідникових діодів: монографія. Херсон : ФОП Вишемирський В.С, 2018. 184 с.

8. Литвиненко В.М., Волос О.О., Шутов С.В., Самойлов М.О. Оптимізація технології виготовлення варикапів з омичними контактами на основі Ni та Al // *Біомедична інженерія та електроніка*. № 5, 2017. С. 120-131.

REFERENCES:

1. Milnes A. G. (1973) *Deep Impurities In Semiconductors*. John Wiley & Sons, New York, 526 p.

2. Meda L., Gerofolini G.F., Queirodo Gr. (1987) Impurities and defects in silicon single crystal // *Progress Crystal Growth and Characterization*, 15(2), 97-131.

3. Ravi K.V. (1981) *Imperfections and Impurities in Semiconductor Silicon*. John Wiley & Sons, New York, 379 p.

4. Litvinenko V. M., Bohach N. V. (2019) Modeling of heterization processes of fast-diffusing impurities in Schottky diode technology. *Visnyk of KhNTU*, vol. 68, iss. 1, pp. 25–33 [in Ukrainian].

5. 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.

6. Renschi S. (1984) Durability of mechanical damage gettering effect in Si wafers // *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 23, no. 8, pt.1, pp. 959-964.

7. Litvinenko V.M. (2018) *Fizyka ta tekhnolohiya napivprovodnykovykh diodiv: monograph [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]*. Kherson. Vysheirsky V.S., 184 p. [in Ukrainian].

8. Litvinenko V.M., Volos O.O., Shutov S.V., Samoiloiv M.O. (2017) Optimization of the manufacturing technology of varicaps with ohmic contacts based on Ni and Al // *Biomedical engineering and electronics*, iss. 5, pp.120-131 [in Ukrainian].