

УДК 621.328(076.5)
DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.20>

ПОКРАЩАННЯ ЗВОРОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВАРИКАПА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ГЕТЕРУВАННЯ

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 – напівпровідниковий діод, робота якого заснована на залежності бар'єрної ємності р-п-переходу від зворотної напруги. Робота варикапа актуальна при перебудові частоти вузлів в електроапаратурі. Пристрої використовуються в частотодавальних ланцюгах, оскільки дозволяють швидко і просто змінювати робочу частоту. Таке можливо, завдяки зміні ємності системи, яка змінюється при зміні керуючої напруги. Варикапи включені в схеми радіоприймачів і бездротових модулів для передачі даних, використовуються в пристроях, де задіяні частотозалежні ланцюги. Однак незважаючи на широке застосування, вартість варикапів залишається порівняно високою із-за низького виходу придатних варикапів, що пояснюється високим рівнем зворотного струму приладів. В статті розглянуті причини та механізми деградації зворотних характеристик високовольтного варикапа. Показано, що причиною низького виходу варикапів являється суттєвий вплив на їх зворотні характеристики структурних дефектів і сторонніх домішок та якості поверхні варикапних структур. Встановлено, що головною причиною низького відсотка виходу придатних досліджуваних варикапів є окислювальні дефекти упакування, що утворюються в активних областях варикапних структур в процесах проведення високо-температурних операцій, а також поверхневі ефекти за рахунок домішкових забруднень. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню структурних дефектів в епітаксialних шарах є створення гетеруючої області на зворотному боці підкладок за допомогою імплантації в неї іонів фосфору. Детально розглянута запропонована технологія виготовлення структур варикапів з використанням двостороннього гетерування за допомогою імплантації іонів фосфору в зворотну сторону пластин та проведення додаткової дифузії бору в робочу сторону пластин. Наведено експериментальні результати дослідження впливу на зворотну характеристика варикапу 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: варикап, структурні дефекти, гетерування, окислювальні дефекти упакування, поверхневі ефекти, зворотний струм.

Lytvynenko V. M. Improvement of feedback characteristics of high voltage varicap using hetering

A varicap is a semiconductor diode whose operation is based on the dependence of the barrier capacitance of the p-n junction on the reverse voltage. The operation of the varicap is relevant when adjusting the frequency of nodes in electrical equipment. The devices are used in frequency-setting circuits, as they allow you to quickly and easily change the operating frequency. This is possible due to the change in system capacitance, which changes when the control voltage changes. Varicaps are included in the circuits of radio receivers and wireless modules for data transmission, used in devices where frequency-dependent circuits are involved. However, despite the wide application, the cost of varicaps remains relatively high due to the low yield of suitable varicaps, which is explained by the high level of reverse current of the devices. The article discusses the causes and mechanisms of degradation of the reverse characteristics of the high-voltage varicap. It is shown that the reason for the low yield of varicaps is the significant influence on their reverse characteristics of structural defects and foreign impurities and the quality of the surface of varicap structures. It was established that the main reason for the low yield percentage of suitable investigated varicaps is the oxidation defects of the packaging, which are formed in the active regions of the varicap structures in the processes of 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 structural defects in epitaxial layers is the creation of a heterogenous region on the reverse side of the substrates by implanting phosphorus ions into it. The proposed manufacturing technology of varicap structures using two-way heterization with the help of implantation of phosphorus ions in the reverse side of the plates and carrying out additional diffusion of boron in the working side of the plates is considered in detail. The experimental results of the study of the influence on the inverse characteristic of the varicap of bilateral heterogeneity are presented, as well as the possible mechanisms of this influence are analyzed. The effectiveness of the proposed technology with the use of hetering in reducing the level of reverse currents and increasing the output of suitable devices is shown.

Key words: varicap, structural defects, heterogeneity, oxidation packing defects, surface effects, reverse current.

Постановка проблеми. Варикапи широко використовуються в радіоелектроніці в якості змінної ємності, величина якої управляється напругою [1]. Одною з основних проблем технології виготовлення варикапів є низький вихід придатних приладів на операціях контролю їх зворотного струму. Причиною низького виходу варикапів являється суттєвий вплив на їх зворотні характеристики структурних дефектів і сторонніх домішок та якості поверхні варикапних структур [2; 3]. Вплив поверхневих ефектів на зворотні характеристики особливо проявляється в високовольтних варикапах, так як база високовольтного варикапа збіднена основними носіями заряду, що при наявності неконтрольованих домішок на її поверхні може привести до поверхневого пробію, тунелюванню носіїв заряду крізь потенційний бар'єр р-n переходу, міграції іонів по поверхні р-n переходу, що призводить до збільшення струму поверхневого витоку [4].

Поверхневі ефекти виникають в р-n переході при забрудненні його поверхні домішками металів (Na, K, Cu, Au, Ni і ін.), які знаходяться у вигляді іонів, і утворюють поверхневий заряд. Ці домішки можуть потрапити на пластининапівпровідника, наприклад, з травильних розчинів, кварцевих труб дифузійних і окислювальних печей тощо.

Серед структурних дефектів, що утворюються в активних областях варикапних структур в процесі проведення високотемпературних операцій, в першу чергу, слід відмітити окислювальні дефекти упакування (ОДУ) [2]. В діодах на основі кремнію, домішки тяжких металів, прискорюючись вздовж структурних дефектів, проникають в область просторового заряду р-n переходу, де створюють в забороненій зоні кремнію глибокі рівні, через які відбувається додаткова генерація носіїв заряду, що призводить до збільшення рівня зворотних струмів діода [5].

З метою зменшення щільності структурно-домішкових дефектів в кремнії використовуються різні методи гетерування [6; 7], але, як показала практика, багато з них виявляються малоефективними для зниження рівня зворотного струму діодів. Розроблено багато різних методів для покращання поверхневих властивостей структур діодів, однак далеко не всі вони ефективні для покращання зворотних характеристик діодів.

Формулювання мети дослідження. Метою даної роботи є дослідження впливу структурних дефектів і домішкових забруднень поверхні діодної структури на рівень зворотного струму високовольтного варикапа і визначенню ефективності запропонованої технології створення гетерних областей в структурі варикапа по відношенню до зниження рівня його зворотного струму і підвищення відсотка придатних приладів.

Експериментальні зразки. Досліджувані варикапні структури виготовлялися за стандартною мезапланарною технологією [1] на легованих фосфором

кремнієвих епітаксціальних структурах n-типу провідності з питомим опором 5 Ом·см товщиною 30 мкм, вирощених на кремнієвій підкладці, орієнтованій в кристалографічному напрямку (111). Для виготовлення варикапних структур проводилися такі основні технологічні операції: – осадження на робочу поверхню пластин шару нітриду кремнію товщиною 0,1 мкм на установці «Ізотрон-1» при температурі 700°C; – фотолітографія по шару нітриду кремнію, залишаючи круглі ділянки нітриду кремнію, в якості маски при травленні меза-структур; – формування меза-структур методом хімічного травлення, використовуючи травильний розчин ($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH} = 2:9:4$); – термічне окислення меза-структур в дифузійній установці СДОМ-3/100 при температурі 1050°C протягом 2 г з наступним чергуванням циклів окислювального середовища: сухий O_2 (10 хв) – пари води (90 хв) – сухий O_2 (30 хв); – видалення шарів нітриду кремнію з контактних майданчиків травленням пластин в киплячій ортофосфорній кислоті на протязі 30 хв, заздалегідь витримавши пластини в травнику $\text{HF} + \text{H}_2\text{O} = 1 : 20$ протягом 20 с (на випадок наявності тонкої плівки SiO_2 на поверхні нітриду кремнію); – (I) стадію дифузії бору (загонку) методом відкритої труби з джерела домішки B_2O_3 за температури 1100 °C протягом 40 хв у суміші аргону (80 л/год) і сухого кисню (5 л/год); – видалення шару боросилікатного скла з використанням розчину плавикової кислоти; – другу стадію дифузії бору – розгонку бору при температурі 1150 °C по циклу: сухий кисень (30 хв) – вологий кисень (4,5 год) – сухий кисень (30 хв); – осадження методом вакуумного термічного випаровування шару алюмінію товщиною 0,3 мкм на робочу сторону пластин і формування методами фотолітографії невідпрямляючого контакту; – шліфування тильної сторони пластин до товщини 190-200 мкм; – формування омичного контакту з неробочої сторони пластини послідовним нанесенням шарів титану, нікелю (методом вакуумного термічного випаровування) і золота (методом гальванічного осадження).

У результаті виконання перерахованих операцій була отримана структура варикапа, що наведена на рис. 1.

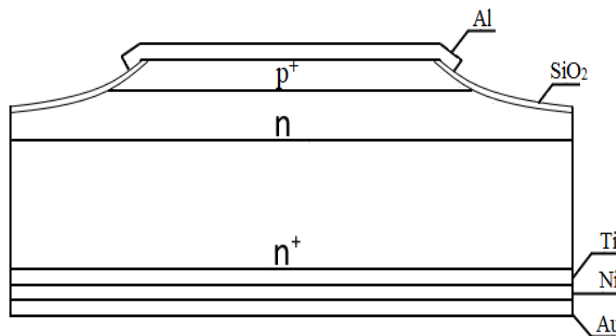


Рис. 1. Структура варикапа, що виготовлена за базовою технологією

Дослідження структурних дефектів. Для виявлення причин низького відсотка виходу придатних варикапів були проведені металографічні дослідження. Виявлення структурних дефектів проводили з використанням травника Сіртла. Вид структурних дефектів і їх щільність оцінювалися за допомогою металографічного мікроскопа МЕТАМ-1. На пластинах після проведення технологічної операції «термічне окислення» були виявлені окислювальні дефекти упакування

(ОДУ) щільністю до $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, при цьому час травлення структур у травнику Сіртла склав 20 с (рис. 2).

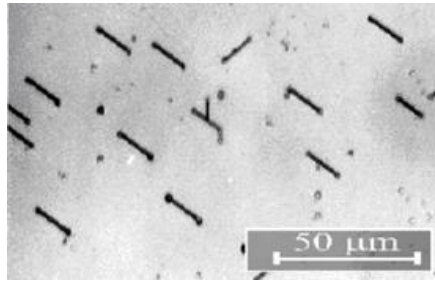


Рис. 2. Мікрофотографія поверхні епітаксильної структури після термічного окислення і проведення селективного травлення

Вибір технології гетерування. З метою запобігання утворенню ОДУ, які були виявлені в епітаксильних структурах після термічного окислення, необхідно було вибрати ефективний метод гетерування – технологічний процес видалення і дезактивації дефектів [6]. Так як ОДУ утворюються, починаючи з першої високотемпературної операції – термічного окислення, то очевидно, що слід використовувати гетерування уже в самому початку технологічного маршрута виготовлення варикапа. Було випробувано декілька методів гетерування [7–9]. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню структурних дефектів в епітаксильних шарах є створення гетеруючої області на зворотному боці підкладок за допомогою імплантації в неї іонів фосфору. Область гетера (ОГ) була сформована на зворотному боці підкладки після осадження шару нітриду кремнію на робочу сторону пластин імплантацією іонів фосфору з енергією 100 кеВ, дозою $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ на установці «Везувій-5» та послідовним відпалом пластин при температурі 1100°C в атмосфері аргону (120 л/г) на протязі 2,5 год (див. рис. 3). На рис. 3 приведена структура варикапа, виготовлена з використанням двостороннього гетерування, перед операцією шліфівка зворотної сторони пластини.

Відомо [1], що для високовольтних напівпровідникових діодів, виготовлених за мезапланарною технологією, характерними являються поверхневі ефекти, які призводять до збільшення зворотних струмів діодів.

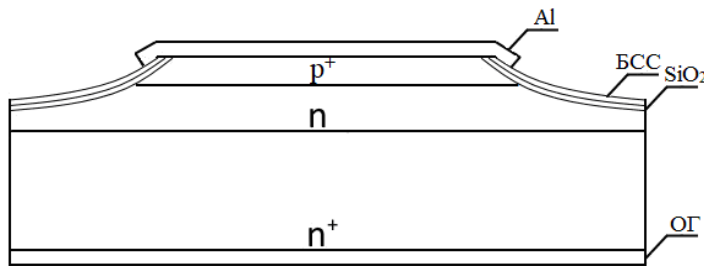


Рис. 3. Структура варикапа, виготовлена за розробленою технологією з використанням двостороннього гетерування

З метою покращання властивостей поверхні структур діодів і зменшення рівня їх зворотних струмів був опробований також метод створення області гетера на робочій стороні пластини проведенням додаткової дифузії бору із джерела B_2O_3 при температурі 1050 °C на протязі 20 хв в суміші аргону (120 л/г) і сухого кисню (5 л/г). При цьому на поверхні захисного шару SiO_2 утворюється плівка боросилікатного скла (БСС) (див. рис. 3).

Вплив додаткової дифузії бору на якість поверхні діодних структур оцінювали за методикою, приведеною в роботі [4]. На вихідних пластинках нарощувалась плівка SiO_2 в умовах, аналогічних умовам розгонки бору, після чого їх розрізали на дві частини. Одну з них залишали в якості контрольної, а в іншій проводили додаткову дифузію бору в шар SiO_2 в режимі, що відповідає розробленій технології. Після цього на всі пластини осаждали Al і за допомогою фотолитографії виготовляли МОН-структури (Al – SiO_2 – Si). Далі з використанням C-V-методу розраховували значення сумарного заряду на структурі, виготовленій з використанням додаткової дифузії бору (Q_{ss1}), і на контрольній МОН-структурі (Q_{ss2}). Вольт-фарадні характеристики вимірювали за допомогою приладу RLC E7-12. В результаті було отримано $Q_{ss1} = 3,3 \cdot 10^{-9}$ Кл; $Q_{ss2} = 5,1 \cdot 10^{-9}$ Кл, відношення зарядів склало $Q_{ss2} / Q_{ss1} \approx 1,5$.

Таким чином, використання додаткової дифузії бору дало можливість зменшити в 1,5 рази величину сумарного заряду в SiO_2 , що адекватно зменшенню щільності поверхневих станів на межі розділу Si – SiO_2 [4]. Це дало можливість суттєво зменшити тунелювання носіїв струму крізь потенційний бар'єр p-n переходу і тим самим зменшити рівень зворотного струму діода.

Дослідження ефективності розробленої технології. Для випробування запропонованого способу виготовлення структур високовольтного варикапа були сформовані експериментальні партії, кожна з яких ділилася на дві частини: одна частина партії була виготовлена відомим способом, інша – запропонованим способом. Ефективність використання запропонованого способу оцінювалася по відсотку виходу придатних діодних структур при їх контролі по рівню зворотних струмів ($I_{зв}$). Критерій придатності: $I_{зв} \leq 3$ мкА при зворотній напрузі 150 В.

Таблиця 1

Спосіб виготовлення структур високовольтного варикапа	Номер експериментальної партії	Вихід придатних варикапних структур на контролі рівню їх зворотних струмів, %
Запропонований спосіб виготовлення	1	94
	2	91
	3	93
Відомий спосіб виготовлення	4	86
	5	84
	6	83

У таблиці 1 наведені порівняльні результати розробки за зворотним струмом діодних структур, що виготовлені за базовою (партії № 4–6) і розробленою (партії № 1–3) технологіями. Видно, що використання запропонованої технології дає можливість підвищити вихід придатних діодних структур у середньому на 8,4%. При цьому діодні структури, виготовлені запропонованим способом, мали рівень зворотних струмів в 6–10 разів нижчий у порівнянні з діодними структурами,

виготовленими відомим способом. Отже, використання запропонованого способу виготовлення структур високовольтного діода дозволяє суттєво підвищити вихід придатних діодних структур на контролі рівня їх зворотних струмів, істотно знизивши при цьому рівень зворотних струмів діодів.

Проведені після розгонки бору металографічні дослідження на структурах варикапів, виготовлених із застосуванням гетерування, показали відсутність в них структурних дефектів.

На рис. 4 приведені зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених за базовою технологією та за технологією з використанням гетерування. Видно, що варикапна структура, виготовлена з використанням гетерування має ВАХ (крива 2) типову для кремнієвого діода при відсутності в його активних областях структурних дефектів та небажаних домішок. І, навпаки, варикапна структура, виготовлена за базовою технологією, має так звану «м'яку» ВАХ (крива 1), вигляд якої може вказувати на наявність в активних областях варикапу структурних дефектів і домішок металів.

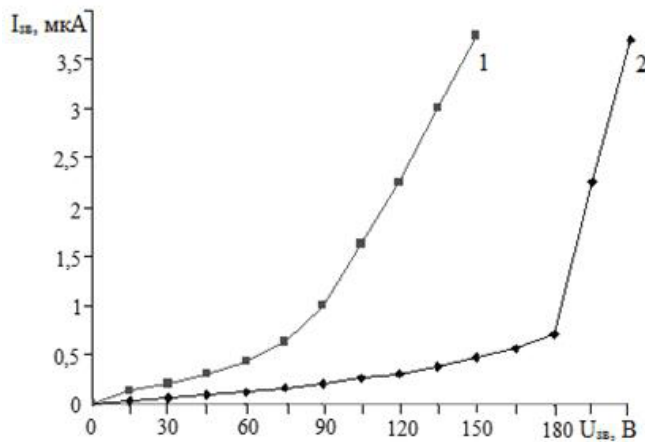


Рис. 4. Зворотні ВАХ варикапних структур:

- 1 – варикапна структура, виготовлена за базовою технологією;
2 – варикапна структура, виготовлена з використанням гетерування

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

Проаналізуємо механізми впливу областей гетерування, створених іонним легуванням фосфором на зворотній стороні пластини після осадження плівки нітриду кремнію на робочу сторону пластин та проведення додаткової дифузії бору в робочу сторону пластини після розгонки бору на параметри діода.

В процесі відпалу пластин після імплантації іонів фосфору на зворотній стороні пластини формується висока щільність дислокацій, які являються стоком для домішок металів. При цьому знешкоджуються зародки ОДУ, які можуть утворюватись в кремнії при вирощуванні злитків і в процесі епітаксії. Це запобігає утворенню ОДУ в процесі термічного окислення пластин та послідоючих термічних операцій. Крім того, в процесі відпалу пластин після імплантації іонів фосфору

і термічного окислення утворена область гетера ефективно поглинає неконтрольовані домішки із об'ємної і приповерхневої областей пластини, зменшуючи тим самим зворотні струми діодів, обумовлені як об'ємними, так і поверхневими механізмами.

Шар боросилікатного скла, який утворюється в процесі проведення дифузії бору на поверхні захисної плівки SiO_2 , проявляє гетеруючу дію по відношенню до домішкових забруднень, які зазвичай попадають в плівку SiO_2 в процесі термічного окислення із стінок кварцевої труби і окислювального середовища (зазвичай це домішки Na, K, Fe, Ni, Cu і ін.). За рахунок цього відбувається глибока очистка шару захисного оксиду і межі розділу Si – SiO_2 від сторонніх домішок, що дає можливість зменшити величину сумарного заряду в SiO_2 , а це рівнозначно зменшенню щільності поверхневих станів на межі розділу Si – SiO_2 . Здобуте за рахунок гетерування покращення якості поверхні структур практично виключає тунелювання носіїв струму крізь потенційний бар'єр p-n переходу, що в свою чергу забезпечує суттєве зменшення струмів поверхневого витоку при зворотному включенні діодів.

Висновки. З проведених досліджень можна зробити висновок, що причиною низького відсотка виходу придатних структур високовольтного варикапа при контролюванні їх зворотного струму є окислювальні дефекти упакування, які утворюються в активних областях діодів в процесі проведення високотемпературних технологічних операцій, а також неконтрольовані домішки металів, які попадають на пластини напівпровідника в процесі проведення технологічних операцій.

Використання гетера, сформованого імплантацією іонів фосфору на зворотній стороні пластини, і послідуєчий високотемпературний відпал дозволяють запобігти утворенню ОДУ в активних областях варикапів, що дає можливість суттєво зменшити рівень їх зворотних струмів.

Наявність гетера, отриманого дифузиею бору в робочу сторону пластини, дає можливість суттєво зменшити поверхневий заряд, що запобігає небажаним поверхневим ефектам, таким як тунелювання носіїв струму крізь потенційний бар'єр p-n переходу, міграція іонів по поверхні p-n переходу та поверхневий пробій діодів і, таким чином, виключити струми поверхневого витоку.

Таким чином, розроблена технологія виготовлення структур високовольтного варикапа дає можливість запобігти утворенню окислювальних дефектів упакування в активних областях діодів і покращати стан поверхні діодних структур, що забезпечує зниження рівня зворотних струмів діодів і, як наслідок, підвищення відсотка 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. Milnes A. G. Deep Impurities In Semiconductors. John Wiley & Sons, New York, 1973. 526 p.

6. 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.

7. 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.

8. Prussin S. Ion implantation gettering: a fundamental approach // *Solid State Technology*, 1981. № 7. P. 52–54.

9. 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.

REFERENCES:

1. Litvinenko V.M. (2018) *Fizyka ta tekhnolohiya napivprovodnykovykh diodiv* [Physics and Technology of Semiconductor Diodes]. Kherson. Vyshehirsky 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. Milnes A. G. (1973) *Deep Impurities In Semiconductors*. John Wiley & Sons, New York, 526 p.

6. 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.

7. Renschi S. (1984) Durability of mechanical damage gettering effect in Si wafers // *Japanese Journal of Applied Physics*, 23(8), 1, 959–964.

8. Prussin S. (1981) Ion implantation gettering: a fundamental approach // *Solid State Technology*, (7), 52–54.

9. 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].