

В. М. ЛИТВИНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної  
та електричної інженерії  
Херсонський державний аграрно-економічний університет  
ORCID: 0000-0002-9425-5551

## ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕПІТАКСІАЛЬНО-ПЛАНАРНОГО ВАРИКАПА

*Варикап – це напівпровідниковий діод, що використовує при своїй роботі залежність бар'єрної ємності p-n переходу від зворотної напруги. Ця залежність називається вольт-фарадною характеристикою. Варикапи застосовуються в схемах електронної перебудови частоти коливального контуру, в підсилюючих параметричних схемах, в дільниках і помножувачах частоти, в керованих фазообертачах тощо. Однак незважаючи на широке застосування, вартість варикапів залишається порівняно високою із-за низького виходу придатних діодів, що пояснюється високим рівнем зворотного струму приладів. В статті розглянуті причини та механізми деградації зворотних характеристик 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 епітаксіальні та окислювальні дефекти упакування, а також поверхневі ефекти за рахунок домішкових забруднень. Епітаксіальні дефекти упакування утворюються в кремнієвих структурах в процесі нарощування епітаксіальних шарів, окислювальні дефекти упакування – в процесах проведення високотемпературних операцій. З метою запобігання утворенню структурних дефектів необхідно було вибрати ефективний метод гетерування. Оскільки структурні дефекти утворюються починаючи з процесу епітаксії, вочевидь, що область гетера необхідно створювати в підкладах, на які будуть осаджуватись епітаксіальні шари. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню структурних дефектів в епітаксіальних шарах є створення гетеруючої області на зворотному боці підкладок за допомогою обробки її лазером. В результаті проведених досліджень встановлено, що відпал кремнієвих пластин за температури 1100°C в середовищі аргону після термічного окислення дає можливість суттєво знизити величину сумарного заряду в плівці SiO<sub>2</sub>. Детально розглянута запропонована технологія виготовлення структур варикапів з використанням гетерування за допомогою обробки зворотної сторони пластин лазером та проведення відпалу пластин в середовищі аргону. Наведено експериментальні результати дослідження впливу на зворотну характеристика варикапа процесу гетерування та відпалу структур в середовищі аргону, а також проаналізовано можливі механізми цього впливу. Показана ефективність запропонованої технології з використанням гетерування та відпалу кремнієвих пластин щодо зниження рівня зворотних струмів і підвищення виходу придатних приладів.*

**Ключові слова:** варикап, гетерування, дефекти упакування, поверхневі ефекти, зворотний струм, домішки.

V. M. LITVYNENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Hydraulic Construction, Water and Electrical Engineering  
Kherson State Agrarian and Economic University  
ORCID: 0000-0002-9425-5551

## OPTIMIZATION OF MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR EPITAXIAL-PLANAR VARICAP

*A varicap is a semiconductor diode that uses the dependence of the barrier capacitance p-n transition on the reverse voltage during its operation. This dependence is called the volt-farad characteristic. Varicaps are used in circuits for electronic adjustment of the frequency of an oscillating circuit, in amplifying parametric circuits, in frequency dividers and multipliers, in controlled phase shifters, etc. However, despite the widespread use, the cost of varicaps remains relatively high due to the low output of suitable diodes, 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 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 has been established that the main reason for the low percentage yield of suitable investigated varicaps is epitaxial and oxidation defects of the packaging, as well as surface effects due to impurities. Epitaxial packaging defects are formed in silicon structures during the growth of epitaxial layers, oxidation packaging defects – in the process of high-temperature operations. In order to prevent the formation of structural defects, it was necessary to choose an effective method of gettering. Since structural defects are formed starting from the epitaxy process, it is obvious that the getter region must be created in the substrates on which the epitaxial layers will be deposited. The conducted studies showed that the most effective method of preventing the formation of structural defects in epitaxial layers is the creation of a getter region on the reverse side of the substrates by means of its laser treatment. As a*

result of the conducted research, it was established that annealing silicon wafers at a temperature of 1100°C in an argon environment after thermal oxidation makes it possible to significantly reduce the amount of the total charge in the SiO<sub>2</sub> film.

The proposed manufacturing technology of varicap structures using hetering with the help of processing the reverse side of the plates with a laser and annealing the plates in an argon environment is considered in detail. The experimental results of the study of the effect on the inverse characteristic of the varicap of the process of gettering and annealing of structures in an argon medium are presented, and the possible mechanisms of this effect are also analyzed. The effectiveness of the proposed technology using gettering and annealing of silicon wafers in reducing the level of reverse currents and increasing the output of suitable devices is shown.

**Key words:** varicap, gettering, packing defects, surface effects, reverse current, impurities.

### Постановка проблеми

Варикап – це напівпровідниковий діод, що використовується як ємність, керована напругою. Робочими елементами для варикапів є бар’єрні ємності р-п переходів, які працюють у режимі зворотного зміщення. Основне призначення варикапів – електронне підстроювання резонансної частоти коливальних контурів [1]. Проблемою 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, сторонніх домішок та якості поверхні варикапних структур [2]. Поверхневі ефекти виникають в р-п переході при забрудненні його поверхні домішками металів (Na, K, Cu, Au, Ni і ін.), які знаходяться у вигляді іонів, і утворюють поверхневий заряд. Домішки можуть потрапити на пластини напівпровідника, наприклад, з травильних розчинів, кварцевих труб дифузійних і окислювальних печей тощо. При наявності структурних дефектів в активних областях варикапних структур, домішки тяжких металів, прискорюючись вздовж дефектів, проникають в область просторового заряду р-п переходу, де створюють в забороненій зоні кремнію глибокі рівні, через які відбувається додаткова генерація носіїв заряду, що призводить до збільшення рівня зворотних струмів варикапа.

Генераційна компонента зворотного струму діода виражається формулою [1]:

$$I_G = qSd \left( \frac{n_i}{\tau_n + \tau_p} \right),$$

де  $q$  – заряд електрона;  $\tau_n, \tau_p$  – час життя відповідно електронів і дірок в збідненій області р-п переходу;  $n_i$  – концентрація власних носіїв заряду в напівпровіднику;  $S$  – площа р-п переходу;  $d$  – ширина області просторового заряду р-п переходу.

Особливо інтенсивно проходить генерація носіїв заряду в області просторового заряду р-п переходу при наявності високої щільності структурних дефектів в активних областях діода, так як при цьому суттєво зменшуються  $\tau_n, \tau_p$  [3].

Для зменшення щільності або повної ліквідації структурних дефектів в кремнії використовуються різні методи гетерування [4, 5], але, як показала практика, багато з них виявляються малоефективними для зниження рівня зворотного струму варикапів. З метою покращання поверхневих властивостей варикапних структур розроблено багато різних методів [6], однак далеко не всі вони ефективні для покращання зворотних характеристик варикапів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Невпинний розвиток мікроелектроніки, чітка тенденція до мініатюризації робочих елементів, створення новітніх перспективних, конструктивно складних приладів продовжують залишати актуальними питання впливу структурних дефектів матеріалу на параметри і відсоток виходу придатних приладів та розробки методів ліквідації структурних дефектів в напівпровідникових кристалах.

В роботі [7] представлено оптичний метод дослідження дислокацій в кристалах кремнію за допомогою моделювання процесу розпізнавання об’єктів. Запропонований метод дослідження дозволяє: – уточнювати форми дефектів; – визначати їх розташування в кристалі; – визначати просторові характеристики дефектів; – формувати розподіл дефектів за розмірами. Запропонований метод дає можливість врахувати вплив процесів дифузії та самодифузії домішок, процесів дефектоутворення в напівпровідниках на електричні параметри напівпровідникових приладів.

Досліджуючи утворення інверсійних шарів на межі поділу Si-SiO<sub>2</sub> в технології виготовлення кремнієвих фотоприймачів, було виявлено деяку динаміку дислокацій після ізотермічних відпалів, яка була відсутня в зразках без інверсії [8]. Після селективного травлення зразків з інверсійними шарами спостерігалась локалізація дислокацій по периферії фоточутливих елементів із скупченням на поверхні охоронних кілець чи інших елементів топології p<sup>+</sup>-типу поза фоточутливими елементами. Це свідчило про рух дислокацій по поверхні структур Si-SiO<sub>2</sub> з інверсних шарів в напрямку периферії кристала під час ізотермічного відпалу, що сприяло значному зниженню густини структурних дефектів в фоточутливому елементі. Описане явище можна використовувати для отримання високолегованих бездефектних кремнієвих структур, оскільки наявність дислокацій чи інших порушень кристалічної ґратки негативно впливають на параметри виробів.

В роботі [9] досліджено метод різання кремнієвих підкладок диском із алмазною кромкою. Проаналізовано вплив режимів різання на темнові струми охоронних кілець р-і-n фотодіодів. Встановлено оптимальні режими обробки, що мінімізують деградацію параметрів зразків. Погіршення параметрів фотодіодів після операції різання відбувається внаслідок набутих механічних напружень та розірваних хімічних зв'язків на торцях кристалів. При термічній обробці підкладок, які були попередньо розділені алмазним диском, спостерігається утворення сіток дислокацій вздовж ліній різання. Встановлені режими обробки дозволяють уникнути деградації параметрів фотодіодів в процесі різання.

Метод неруйнівного контролю внутрішніх напружень та дефектів в оптичних матеріалах (в тому числі і в кристалах напівпровідників) представлено в роботі [10]. Експериментально доведена можливість використання дисплейних екранів комп'ютера як джерела поляризованого випромінювання. Показано, що спеціальний прилад ПКС-250, який має обмеження геометричних розмірів деталей до 250 мм, що контролюються за наявності внутрішніх напружень, можливо замінити на дисплейний екран розміром, що відповідає завданням контролю. Для прецизійних вимірювань внутрішніх напружень та їх розподілу в оптичних деталях запропоновано використовувати поляризаційно-модуляційний спосіб.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є дослідження впливу структурних дефектів та поверхневих ефектів на рівень зворотного струму варикапа і можливості застосування гетерування для поліпшення зворотних характеристик варикапа і підвищення виходу придатних приладів.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

**Експериментальні зразки.** Структури досліджуваних варикапів виготовлялися за стандартною планарно-епітаксialною технологією [1]. Для проведення епітаксialного процесу використовувались кремнієві підкладки, леговані стибієм, з потовим опором 0,01 Ом·см, орієнтовані за площиною (111). Нарощування епітаксialних шарів на підготовлених підкладках проводилося хлоридним методом за температури 1150°C [1]. Отримані епітаксialні структури мали питомий опір 2 Ом·см і товщину 12 мкм. Для виготовлення варикапних структур проводилися наступні основні технологічні операції: – термічне окислення пластин при  $T = 1050^\circ\text{C}$  з наступним чергуванням циклів: окислення в сухому кисні (15 хвилин) – окислення у вологому кисні (120 хвилин) – окислення в сухому кисні (30 хвилин); – I фотолітографія для розкриття вікон у шарі діоксиду кремнію під дифузію бору; – I загонка бору методом відкритої труби з джерела домішки  $\text{B}_2\text{O}_3$  при  $T = 1100^\circ\text{C}$  протягом 35 хвилин в суміші аргону (65 л/год) і сухого кисню (2 л/год); – видалення боросилікатного скла в розчині плавикової кислоти; – розгонка бору при  $T = 1150^\circ\text{C}$  в середовищі сухого кисню (60 л / год) протягом 4,5 год; – II фотолітографія для розкриття вікон у шарі діоксиду кремнію під дифузію бору; – II загонка бору при  $T = 1050^\circ\text{C}$  протягом 30 хвилин у суміші аргону (95 л/год) і кисню (5 л/год); – видалення шару боросилікатного скла з використанням розчину плавикової кислоти; осадження плівки алюмінію в вакуумі на робочу сторону пластин; – III фотолітографія по шару алюмінію; відпал алюмінієвого контакту в інертному середовищі при  $T = 570^\circ\text{C}$  на протязі 15 хвилин; – шліфування тильної сторони пластин для зменшення її товщини до 185–200 мкм; – формування омичного контакту з неробочої сторони пластини нанесенням шару нікелю методом вакуумного термічного випаровування і золота методом гальванічного осадження.

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

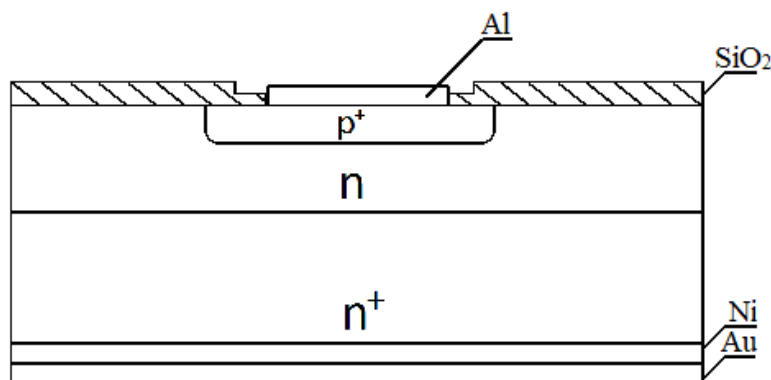
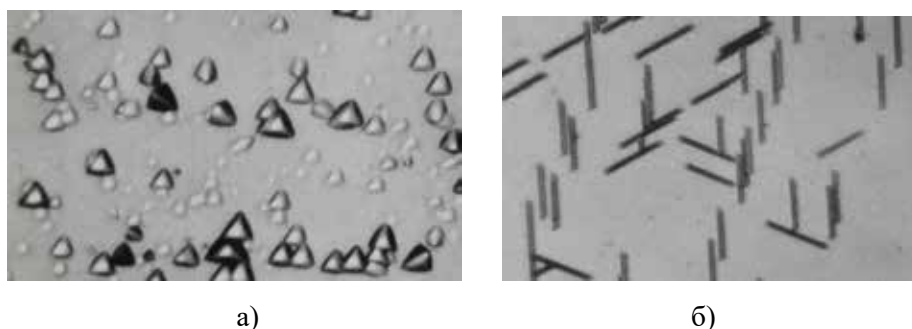


Рис. 1. Структура варикапа, що виготовлена за базовою технологією

**Дослідження структурних дефектів.** Для з'ясування причин деградації зворотних характеристик варикапів були проведені металографічні дослідження варикапних структур, відбракованих на контролі їх рівня зворотних струмів.



**Рис. 2. Поверхня кремнієвої епітаксіальної структури з виявленими епітаксіальними дефектами упакування (а) та окислювальними дефектами упакування після термічного окислення (б). Збільшення 507<sup>x</sup>**

На вихідних пластинах ще до проведення першої високотемпературної операції – термічного окислення, були виявлені епітаксіальні дефекти упакування, щільність яких складала  $10^2$ – $10^3$  см<sup>-2</sup> (рис. 2, а). Після термічного окислення і видалення шару SiO<sub>2</sub> в епітаксіальних структурах були виявлені окислювальні дефекти упакування щільністю до  $10^5$  см<sup>-2</sup> (рис. 2, б).

**Вибір технології гетерування.** З метою запобігання утворенню структурних дефектів необхідно було вибрати ефективний метод гетерування. Оскільки структурні дефекти утворюються починаючи з процесу епітаксії, вочевидь, що область гетера необхідно створювати в підкладках, на які будуть осаджуватись епітаксіальні шари. Проведені дослідження показали, що найбільш ефективним методом запобігання утворенню структурних дефектів в епітаксіальних шарах є створення гетеруючої області на зворотному боці підкладок за допомогою її обробки лазером при щільності випромінювання 14 Дж/см<sup>2</sup> з послідовним відпалом пластин при температурі 1050°C в середовищі аргону (130 л/год) і кисню (8 л/ч) на протязі 50 хв.

З метою покращання властивостей поверхні структур варикапів і зменшення рівня їх зворотних струмів був опробований також метод гетерування шляхом проведення додаткового відпалу кремнієвих пластин після технологічної операції термічного окислення при температурі  $T=1100^\circ\text{C}$  в середовищі аргону на протязі 40 хв. Вплив відпалу в середовищі аргону на якість поверхні діодних структур оцінювали за методикою, наведеною в роботі [6]. На вихідних пластинах нарощувалась плівка SiO<sub>2</sub> в умовах, аналогічних умовам процесу термічного окислення кремнієвих пластин, після чого їх розділяли на дві частини. Одну з них залишали в якості контрольної, а іншу поміщали в дифузійну піч і проводили відпал у відповідності з наведеним вище режимом. Після цього на всі пластини осаждали Al і за допомогою фотолитографії виготовляли МОН-структури (Al – SiO<sub>2</sub> – Si). Далі з використанням С-V-методу розраховували значення сумарного заряду на структурі, виготовленій з використанням відпалу ( $Q_{ss1}$ ), і на контрольній МОН-структурі ( $Q_{ss2}$ ). Вольт-фарадні характеристики вимірювали за допомогою приладу RLC E7-12. В результаті було отримано  $Q_{ss1} = 2,9 \cdot 10^{-9}$  Кл;  $Q_{ss2} = 4,2 \cdot 10^{-9}$  Кл, відношення зарядів складало  $Q_{ss2} / Q_{ss1} \approx 1,4$ . Таким чином, використання додаткового відпалу дало можливість зменшити в 1,4 рази величину сумарного заряду в SiO<sub>2</sub>, що адекватно зменшенню щільності поверхневих станів на межі розділу Si – SiO<sub>2</sub>. А це, очевидно, зменшує вірогідність тунелювання носіїв струму крізь потенційний бар'єр р-п переходу і, таким чином, забезпечує зниження рівня зворотних струмів варикапа.

**Дослідження ефективності розробленої технології.** Для випробування запропонованого способу виготовлення структур варикапа були сформовані дві експериментальні партії варикапних структур, які були поділені на дві рівні частини. Одна частина структур у кожній партії була виготовлена за базовою технологією, інша – з використанням гетерування. Ефективність технології оцінювалася за виходом придатних варикапних структур за результатами металографічних досліджень і за рівнем зворотного струму. Критерій придатності:  $I_{зв} \leq 0,2$  мкА при зворотній напрузі 35 В.

У таблиці 1 наведені порівняльні результати розбраковки за зворотним струмом варикапних структур, що виготовлені за базовою (партії № 1–3) і розробленою (партії № 4–6) технологіями.

З таблиці 1 видно, що використання гетерування дає можливість підвищити вихід придатних варикапних структур у середньому на 8,6%. При цьому варикапні структури, які виготовлені за розробленою технологією, мали рівень зворотних струмів у 3 ... 9 разів нижчий в порівнянні з варикапними структурами, які виготовлені за базовою технологією.

Проведені після розгонки бору металографічні дослідження морфології поверхні варикапних структур, які були виготовлені із застосуванням гетерування, показали відсутність структурних дефектів.

Таблиця 1

## Порівняльні характеристики базової і розробленої технологій

Технологія виготовлення варикапних структур	Номер партії пластин	Вихід придатних варикапних структур за значенням зворотного струму, %
Без використання гетерування	1	85,3
	2	83,9
	3	82,8
З використанням гетерування	4	92,1
	5	93,2
	6	92,4

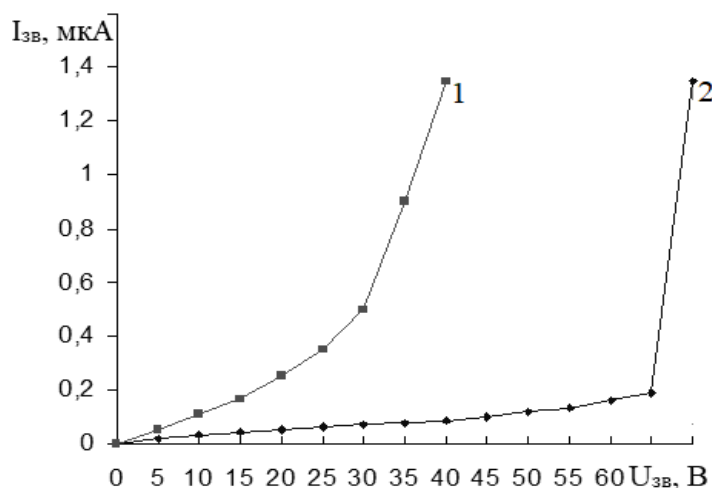


Рис. 3. Типові зворотні ВАХ структур варикапів, виготовлених за базовою технологією (1) та за запропонованою технологією (2)

На рис. 3 приведені зворотні ВАХ варикапних структур, виготовлених за базовою технологією (крива 1) та за технологією з використанням гетерування (крива 2). Видно, що варикапна структура, виготовлена з використанням гетерування, має ВАХ, що є типовою 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, вигляд якої вказує на наявність в активних областях варикапа структурних дефектів та домішок металів. З порівняння кривих 1 і 2 видно, що застосування гетерування забезпечує належний низький рівень зворотних струмів варикапа.

## Висновки

Спираючись на проведені експериментальні дослідження, можна зробити висновок, що причиною низького відсотка виходу придатних структур варикапа при контролюванні рівня його зворотного струму є дефекти упакування, які утворюються в активних областях діодів під час епітаксії та в процесах проведення високотемпературних технологічних операцій, а також неконтрольовані домішки металів, які попадають на пластини напівпровідника в технологічному процесі виготовлення варикапа.

Розроблена технологія виготовлення структур варикапа з використанням гетерування областю гетера, що створена на зворотній стороні кремнієвої підкладки за допомогою обробки її лазером перед осадженням епітаксіального шару, дозволяє запобігти утворенню структурних дефектів в активних областях структур, що забезпечує зниження рівня зворотних струмів варикапа і підвищення виходу придатних приладів.

Високотемпературний гетеруючий відпал пластин після їх термічного окислення в середовищі аргону, дає можливість суттєво зменшити поверхневий заряд, що запобігає небажаним поверхневим ефектам, таким як тунелювання носіїв струму крізь потенційний бар'єр р-п переходу, міграція іонів по поверхні р-п переходу та поверхневий пробій діодів і, таким чином, виключити струми поверхневого витоку.

Таким чином, розроблена технологія виготовлення структур варикапа дає можливість запобігти утворенню епітаксіальних та окислювальних дефектів упакування в активних областях варикапів і покращити стан поверхні варикапних структур, що забезпечує зниження рівня зворотних струмів варикапів і, як наслідок, підвищення відсотка виходу придатних приладів.

## Список використаної літератури

1. Литвиненко В.М. Фізика та технологія напівпровідникових діодів: монографія. 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. Milnes A. G. Deep Impurities In Semiconductors. John Wiley & Sons, New York, 1973. 526 p.
4. Литвиненко В.М., Богач М.В. Моделювання процесів гетерування швидкодифундуючих домішок в технології діодів Шоттки. Вісник ХНТУ, 2019. Т.68. № 1. С. 25–33.
5. 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.
6. Литвиненко В.М., Вікулін І.М. Вплив властивостей поверхні на зворотні характеристики напівпровідникових приладів. Вісник ХНТУ, 2018. Т. 64. № 1. С. 46–56.
7. Пятайка М. І., Стрількова Т. О. Дослідження дефектів дислокації в напівпровідникових матеріалах оптичними методами. Приладобудування: стан і перспективи: матеріали XXII Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 16–17 травня 2023 року. Київ, 2023. С. 45–47.
8. Кукурудзяк М.С. Метод «очищення» поверхні фоточутливих елементів кремнієвих р-і-п фотодіодів від дислокацій // Хімія, фізика та технологія поверхні, 2023. Т. 14. № 2. С. 182–190. [https://doi: 10.15407/hftp14.02.182](https://doi.org/10.15407/hftp14.02.182).
9. Кукурудзяк М. С. Різання підкладок алмазним диском у технології кремнієвих р-і-п фотодіодів // Наукоємні технології, 2022. № 2(54). С. 127–137. <https://doi.org/0000-0002-0059-1387>.
10. Маслов В.П., Н.В. Качур Н.В. Стан та перспективи розвитку оптичних методів неруйнівного контролю внутрішніх напружень та дефектів в оптичних матеріалах // Вісник ЖДТУ, 2014. № 1 (68). С. 66–74. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2014\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2014_1_12)

## References

1. Litvinenko V.M. (2018) Fyzyka ta tekhnolohiya napivprovodnykovykh diodiv: monograph [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. Milnes A. G. (1973) Deep Impurities In Semiconductors. John Wiley & Sons, New York, 526 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. 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.
6. Lytvynenko V.M., Vikulin I.M. (2018) Influence of surface properties on reverse characteristics of semiconductor devices. Visnyk of KhNTU, vol. 64, iss.1, pp. 46–56 [in Ukrainian].
7. Pyataikina M. I., Strilkova T. O. (2023) Study of dislocation defects in semiconductor materials by optical methods. Instrument building: state and prospects: materials of the XXII International. science and technology conference, Kyiv, May 16–17, 2023, Kyiv, pp. 45–47 [in Ukrainian].
8. Kuzurziak M.S. (2023) The method of «cleaning» the surface of photosensitive elements of silicon p-i-n photodiodes from dislocations // Chemistry, physics and surface technology, vol. 14, no. 2, pp. 182–190. [https://doi: 0.15407/hftp14.02.182](https://doi.org/10.15407/hftp14.02.182) [in Ukrainian].
9. Kuzurzyak M. S. (2022) Cutting of substrates with a diamond disc in the technology of silicon p-i-n photodiodes // Scientific technologies, no. 2, iss. 54, pp. 127–137. <https://doi.org/0000-0002-0059-1387> [in Ukrainian].
10. Maslov V.P., N.V. Kachur N.V. (2014) Status and prospects of the development of optical methods of non-destructive control of internal stresses and defects in optical materials // Bulletin of ZHTU, no. 1, iss. 68, pp. 66–74. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu\\_2014\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vzhdtu_2014_1_12) [in Ukrainian].