

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ ФЕДЬКОВИЧА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КУКУРУДЗЯК МИКОЛА СТЕПАНОВИЧ

УДК 537.312.5: 621.383.52

ДИСЕРТАЦІЯ

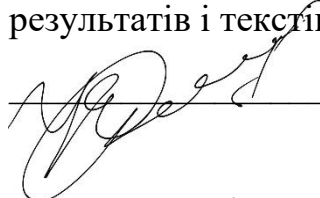
**ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ЯВИЩА В КРЕМНІЄВИХ ПЛАНАРНИХ n^+p - p^+ -
СТРУКТУРАХ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ
ФОТОДІОДІВ НА ЇХ ОСНОВІ**

104 - Фізика та астрономія

10 - Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 М. С. Кукурудзяк

Науковий керівник **Майструк Едуард Васильович**, доктор
фізико-математичних наук, професор

Чернівці -2025

АНОТАЦІЯ

Кукурудзяк М. С. Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича МОН України, Чернівці, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню фотоелектричних властивостей кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структур, а також вдосконаленню та виготовленню на їх основі високочутливих фотоприймачів (ФП) - $p-i-n$ фотодіодів (ФД) для детектування електромагнітного випромінювання видимої та ближньої ІЧ області спектру.

Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та чотирьох додатків.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи; сформульовано мету, основні завдання, об'єкт та предмет дослідження; вказано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів; наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У **першому розділі** дисертації описано принцип роботи ФД на основі високоомних кремнієвих n^+p-p^+ структур, представлено літературний огляд, який свідчить про значну зацікавленість науковців з усього світу в розробці надійних напівпровідникових фотодетекторів з максимальною чутливістю при мінімальних темнових струмах. Також наведено аналіз передових виробництв ФП та їх $p-i-n$ ФД, представлених на ринку.

Аналіз властивостей n^+p-p^+ -структур показав, що для забезпечення високих порогових характеристик та низьких темнових струмів досліджуваних ФП потрібно забезпечувати структурну досконалість високоомної області. Встановлено, що конструкцією типових $p-i-n$ ФД забезпечується поглинання максимальної кількості випромінювання в i -області, це забезпечує високі значення

фоточутливості. Значна швидкодія таких ФД зумовлена можливістю використання великих зворотних зміщень. Відповідно, в $p-i-n$ - структурі рух носіїв заряду відбувається шляхом дрейфу через i -область в сильному електричному полі, на відміну від дифузії носіїв заряду в звичайній $p-n$ -структурі, де можливість прикладання високих напруг відсутня (внаслідок низьких напруг пробою).

Провідними виробниками ФП є Excelitas Technologies Corp. (Тайвань), First Sensor AG (Німеччина), Hamamatsu (Японія) та ін. Кращі зразки кремнієвих $p-i-n$ ФД, призначені для детектування ближнього ІЧ-випромінювання, володіють максимумом спектральної характеристики близько $\lambda=1000$ нм та монохроматичною струмовою чутливістю близько $S_L \approx 0.6-0.7$ А/Вт.

У другому розділі дисертації досліджено вплив електрофізичних характеристик кремнію на кінцеві параметри ФД, а також вплив легування n^+ - та p^+ -шарів фосфором та бором відповідно на фотоелектричні параметри n^+-p-p^+ -структур. Описано технологію виготовлення планарних $p-i-n$ ФД. Встановлено, що темновий струм і чутливість ФД, виготовлених на основі кремнію з вищим питомим опором базового матеріалу сягають насичення при нижчій напрузі зворотного зміщення, а ФД на основі кремнію з більшим часом життя неосновних носіїв заряду мають менші значення темнового струму. Однак, ФД на основі кремнію із вищим питомим опором більш схильні до утворення поверхневих провідних інверсійних каналів на межі розділу Si-SiO₂, що провокує зниження пору ізоляції чутливих елементів багатoelementних ФД.

Для забезпечення максимального значення коефіцієнта збирання носіїв заряду та поглинання випромінювання в i -області ФД потрібно використовувати оптимальну концентрацію домішок в n^+ - та p^+ -областях. Встановлено, що при зниженні концентрації фосфору та бору в n^+ - та p^+ -шарах відповідно, коефіцієнт їх пропускання знижується, але для забезпечення належної міри геттерування легованими шарами, оптимальними значеннями поверхневих опорів після дифузії фосфору та бору є $R_S \approx 2,7-3$ Ом/□, та $R_S \approx 18$ Ом/□ відповідно. Отримано ФД із темновими струмами $I_m = 28-36$ нА та імпульсною чутливістю $S_{imn} = 0,46-0,48$ А/Вт.

У третьому розділі наведено деякі перспективні структури кремнієвих *p-i-n* ФД. Запропоновано кремнієвий відрізаючий абсорбційний фільтр, який дозволяє виключити вплив короткохвильового фонового випромінювання з довжиною хвилі $\lambda \leq 850$ нм на корисний сигнал ФД. Досліджено оптичні властивості фільтрів та встановлено, що при збільшенні товщини фільтра край його пропускання зміщується в сторону більших довжин хвиль, але зменшується його коефіцієнт пропускання. Для нівелювання втрат потужності випромінювання внаслідок використання абсорбційного світлофільтра запропоновано використовувати їх в комбінації із оптичним концентратором.

Виготовлено та досліджено ФД із збільшеним коефіцієнтом збирання носіїв заряду. Збільшення вказаного параметру досягається шляхом зменшення товщини кристалу ФД в проекціях чутливих елементів на тилу сторону підкладки. Зменшення товщини кристалу з 500 мкм до 300 мкм дозволяє збільшити чутливість ФД на 25 %.

Запропоновано варіант кремнієвого *p-i-n* ФД з меза-структурою, в якому чутливі елементи формуються шляхом травлення меза-профілю, а утворені канавки є зазорами між активними елементами ФП. Такий принцип виготовлення ФД дозволяє виключити з технологічного маршруту високотемпературну операцію термічного окислення. Зменшення кількості термообробок дозволяє уникнути значної деградації електрофізичних характеристик напівпровідника та отримати зразки із покращеними параметрами.

Запропоновано метод підвищення опору ізоляції чутливих елементів і охоронного кільця кремнієвих чотириквadrантних ФД шляхом розриву поверхневих інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂. Метод ґрунтується на травленні тонкої оксидної плівки в проміжках між активними елементами, що дозволяє видалити інверсійні шари. За відсутності збільшення опору ізоляції після цих маніпуляцій, пропонується формувати меза-профіль шляхом травлення кремнію в проміжках між чутливими елементами на глибину до 10 мкм. Метод дозволяє значно знизити темнові струми ФД та збільшити опір

ізоляції активних елементів. Метод також зменшує коефіцієнт фотозв'язку чутливих елементів. Також досліджено вплив наявності інверсійних шарів на вольт-фарадні та вольт-амперні характеристики структур.

В Додатку 1 досліджено генезис кристалографічних дефектів на поверхні та в об'ємі *p-i-n* ФД, їх вплив на параметри ФП та методи зменшення їх густини.

Наведено деякі нові аспекти дефектоутворень на поверхні кремнієвих структур під час різних технологічних операцій. Також встановлено, що дефекти структури часто розміщуються на пластинах нерівномірно і спричиняють нерівномірність параметрів чутливих елементів багатеlementних ФД. Причинами нерівномірного розподілу дислокацій по поверхні ФД є нерівномірний розподіл точкових дефектів, що утворилися в результаті окиснення, наявність мікродефектів, утворених під час механічного або хіміко-динамічного полірування, а також неоднорідність точкових чи лінійних дефектів (ростових) в об'ємі злитка чи пластини. Лінійні дефекти часто перетинають всю пластину, утворюючи центри рекомбінації в області просторового заряду (ОПЗ) ФД.

Виявлено динаміку дислокацій по поверхні структур Si-SiO₂ з інверсійними шарами в напрямку периферії кристала під час відпалу, що сприяло значному зниженню густини структурних дефектів на поверхні чутливих елементів. Описане явище можна використовувати для отримання високолегованих бездефектних кремнієвих структур. Запропонованим методом вдається знизити густину дислокацій на поверхні чутливих елементів на 2–3 порядки.

Запропоновано метод зниження густини поверхневих структурних дефектів шляхом проведення операції хіміко-динамічного полірування (ХДП) в зонах чутливих елементів після термічного окиснення. Метод дозволяє ліквідувати структурні дефекти утворені під час окиснення, які є центрами генерації дислокацій під час дифузійних операцій. ХДП з використанням маскування за допомогою SiO₂ формує структуровану поверхню, яка геттерує генераційно-рекомбінаційні центри (ГРЦ) в об'ємі кристалу та зменшує коефіцієнт відбивання випромінювання від поверхні ФД. Цей метод також дозволяє отримати ФД із

низькими значеннями темнових струмів та підвищеною фоточутливістю.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати досліджень, проведених у рамках цієї дисертаційної роботи мають велике практичне значення для виготовлення надійних високочутливих ФП на основі високоомних кремнієвих n^+p -структур. Результати дисертації застосовані та впроваджені в Центральному конструкторському бюро «Ритм» при виготовленні таких ФД: ФД-14М, ФД-15М, ФД-15М-01, ФД-29, ФД-255, ФД-31СФ.

1. Впроваджено технологічні режими дифузії фосфору та бору з планарних твердотільних джерел, які дозволяють отримувати ФД з покращеними параметрами: значення темнового струму $I_m \leq 30$ нА та імпульсної чутливості $S_{imp} \approx 0,48-0,5$ А/Вт при $U_{zm} = -120$ В. (Патент на корисну модель № 149890) [150].

2. Досліджено вплив товщини адгезійного підшару хрому з тилової сторони підкладки на коефіцієнт збирання носіїв заряду та чутливість ФД. Встановлено що товщина адгезійного шару 10-12 нм забезпечує мінімальне поглинання випромінювання ($T=4\%$ при $\lambda=1,05$ мкм) та забезпечує мінімальний спад чутливості без втрат адгезійних властивостей золота. Зменшення товщини шару хрому призводить до зниження його коефіцієнта пропускання.

3. Запропоновано метод зниження густини поверхневих структурних дефектів шляхом проведення операції ХДП в зонах чутливих елементів після термічного окислення. Метод дозволяє ліквідувати структурні дефекти утворені під час окиснення, які є центрами генерації дислокацій під час дифузійних операцій. При використанні методу вдається знизити поверхневу густину дислокацій з $N_{duc} \approx 4-6 \cdot 10^6$ см⁻² до $N_{duc} \approx 0,5-2 \cdot 10^2$ см⁻². Проведення ХДП з використанням маскування за допомогою SiO₂ формує структуровану поверхню, яка геттерує ГРЦ в об'ємі кристалу ФД та зменшує коефіцієнт відбивання випромінювання від поверхні ФД. Описане дозволяє отримати ФП із покращеними фотоелектричними властивостями внаслідок зменшення густини структурних дефектів та введення додаткового механізму геттерування структурованою поверхнею.

4. Запропоновано та впроваджено використання кремнієвих абсорбційних відрізаючих світлофільтрів, які дозволяють виключити вплив фонового короткохвильового випромінювання із $\lambda \leq 850$ нм на корисний сигнал ФД. Розроблено конструкцію світлофільтра, який забезпечує коефіцієнт пропускання випромінювання робочої довжини хвилі $T \geq 70\%$ (Патент на корисну модель № 151697) [106].

5. Запропоновано та виготовлено кремнієвий $p-i-n$ ФД з меза-структурою, який дозволяє нівелювати зменшення часу життя неосновних носіїв заряду та питомого опору базового матеріалу за рахунок виключення високотемпературної операції пасивації. Зниження кількості термічних операцій дозволяє отримати ФД із підвищеною чутливістю ($S_{imn.} = 0,53$ А/Вт). Виготовлення ФД за меза-технологією також знижує їх вартість порівняно із виробами, виготовленими за класичною планарною технологією (Патент на корисну модель № 151696) [131].

6. Розроблено ряд методів збільшення опору ізоляції чутливих елементів багатоелементних ФД, які базуються на розриві інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂ шляхом травлення тонкої оксидної плівки чи поверхневого шару кремнію, або утворення областей обмеження каналів витоку ізотипних із матеріалом підкладки (p^+ -типу) в зазорах між чутливими елементами. Запропоновані методи дозволяють виготовляти квадрантні ФД із міжквадрантним опором ≥ 20 МОм (Патент на корисну модель № 149108) [153].

7. Запропоновано неруйнівний метод визначення кінцевого питомого опору базового матеріалу n^+-p-p^+ - структур, який добре корелює із методом визначення на основі ефекту Холла. Метод базується на визначенні напруги зворотного зміщення, при якій ширина ОПЗ набуває максимального значення.

Ключові слова: напівпровідники, кремній, детектор фотонів, $p-i-n$ фотодіод, фільтр, темновий струм, тонка плівка, оксид кремнію, оптичні властивості, область просторового заряду, струмова монохроматична чутливість, вольт-амперна характеристика, вольт-фарадна характеристика, електрофізичні властивості, структурні дефекти.

ABSTRACT

M. S. Kukurudziak. Photoelectric phenomena in silicon planar $n^+p\text{-}p^+$ - structures and physical and technical aspects of manufacturing photodiodes based on them.

Thesis on search for the Doctor of Philosophy degree in specialty 104 – Physics and Astronomy. – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2025.

The dissertation is devoted to the study of the photoelectric properties of silicon planar $n^+p\text{-}p^+$ -structures, as well as the improvement and manufacture of highly sensitive photodetectors - $p\text{-}i\text{-}n$ photodiodes (PD) for detecting electromagnetic radiation in the visible and near-infrared spectral regions.

The thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references and three appendices.

The introduction substantiates the relevance of the work; formulates the purpose, main tasks, object and subject of the study; indicates the scientific novelty and practical value of the results; provides information on the personal contribution of the applicant, the testing of the work, its structure and scope.

The first chapter of the dissertation describes the principle of operation of PDs based on high-resistance silicon $n^+p\text{-}p^+$ -structures, presents a literature review that shows the significant interest of scientists from around the world in developing reliable semiconductor detectors of photons in the visible and near-infrared regions of the spectrum with maximum sensitivity at minimum dark currents. A list of advanced photodetectors and their $p\text{-}i\text{-}n$ PDs on the market is also provided.

The analysis of the properties of $n^+p\text{-}p^+$ -structures has shown that to ensure high threshold characteristics and low dark currents of the manufactured photodetectors, it is necessary to ensure the structural perfection of the high-resistances i -region. It has been established that the design of typical $p\text{-}i\text{-}n$ PDs ensures the absorption of the maximum amount of radiation in the i -region, which provides high photosensitivity values. Significant performance of such PDs is due to the fact that the process of diffusion of charge carriers in a conventional PD structure is replaced in the $p\text{-}i\text{-}n$ structure by the drift

of carriers through the *i*-region in a strong electric field.

The leading manufacturers of photodetectors are Excelitas Technologies Corp. (Taiwan), First Sensor AG (Germany), Hummamatsu (Japan), etc. The best samples of silicon *p-i-n* PDs designed for near-infrared radiation detection have a maximum spectral response of about $\lambda=1000$ nm and a monochromatic current sensitivity of about $S_{\lambda}\approx 0.6-0.7$ A/W.

In **the second chapter** of the dissertation, the influence of the electrophysical characteristics of silicon on the final parameters of PDs, as well as the effect of doping the n^+ - and p^+ - layers with phosphorus and boron, respectively, on the parameters of n^+ - p - p^+ -structures, is investigated. The fabrication technology of planar *p-i-n* PDs is described. It was found that the dark current and sensitivity of the PDs made on the basis of silicon with a higher resistivity of the base material reach saturation at a lower reverse bias voltage, and the PDs based on silicon with a longer lifetime of minor charge carriers have lower values of the dark current. However, the silicon-based PD with a higher resistivity is more prone to the formation of surface conductive inversion channels at the Si-SiO₂ interface, which provokes a decrease in the pore insulation of the sensitive elements of multielement PDs.

To ensure the maximum value of the charge carrier collection coefficient and radiation absorption in the *i*-region of the PD, it is necessary to use the optimal concentration of impurities in the n^+ - and p^+ -regions. It has been found that with a decrease in the concentration of phosphorus and boron in the n^+ - and p^+ -layers, respectively, their transmittance decreases, but to ensure the proper degree of doping by the doped layers, the optimal values of surface resistances after the diffusion of phosphorus and boron are $R_S\approx 2.7-3$ $\Omega/\square$ and $R_S\approx 18-20$ $\Omega/\square$, respectively. The PDs with dark currents $I_d=28-36$ nA and pulse sensitivity $S_{pulse}=0.46-0.48$ A/W were obtained.

In **the third chapter**, we present some promising structures of silicon *p-i-n* PDs. A silicon cut-off adsorption light filter is proposed, which eliminates the influence of short-wave background radiation with a wavelength of $\lambda\leq 850$ nm on the useful signal of the PD. The optical properties of filters were studied and it was established that as the

thickness of the filter increases, its transmission edge shifts toward longer wavelengths, but its transmittance decreases. To level the radiation power losses due to the use of an adsorption light filter, it is proposed to use them in combination with an optical concentrator.

PDs with an increased charge carrier collection coefficient have been fabricated and studied. The increase of this parameter is achieved by reducing the thickness of the PD crystal in the projections of the responsive elements on the back side of the substrate. Reducing the crystal thickness from 500 μm to 300 μm allows increasing the sensitivity of the PD by 25 %.

A crystal of a silicon *p-i-n* PD with a mesa-structure is proposed, in which the responsive elements are formed by etching a mesa-profile, and the resulting grooves are the gaps between the active elements of the photodetector. This principle of PD manufacturing allows to exclude the high-temperature thermal oxidation operation from the technological route. Reducing the number of heat treatments avoids significant degradation of the electrophysical characteristics of semiconductor and produces samples with improved parameters.

A method of increasing the insulation resistance of responsive elements and the guard ring of silicon four-quadrant PDs by breaking the surface inversion conductive channels at the Si-SiO₂ interface is proposed. The method is based on the etching of the thin oxide film in the gaps between the active elements, which allows to remove the inversion layers. In the absence of an increase in insulation resistance after these manipulations, it is proposed to form a mesa-profile by etching silicon in the gaps between the responsive elements to a depth of 10 microns. The method can significantly reduce the dark currents of PDs and increase the insulation resistance of active elements. The method also reduces the photocoupling coefficient of the responsive elements. The influence of inversion layers on the volt-farad and volt-ampere characteristics of structures was also investigated.

In **Appendix 1** the genesis of crystallographic and non-crystallographic defects on the surface and in the volume of *p-i-n* PDs is investigated.

Some new aspects of defect formation on the surface of silicon structures have been established. It has been established that structural defects are often unevenly distributed on the plates and cause unevenness in the parameters of sensitive elements of multi-element PD. The reasons for the uneven distribution of dislocations on the PD surface are the uneven distribution of point defects formed as a result of oxidation, the presence of microdefects formed during mechanical or chemical-dynamic polishing, as well as the heterogeneity of point or linear defects (growth defects) in the volume of the ingot (respectively, in the volume of the plate). Linear defects often cross the entire plate, forming recombination centers in the space charge region of the PD.

The dynamics of dislocations on the surface of Si-SiO₂ structures with inversion layers in the direction of the crystal periphery during isothermal annealing was revealed, which contributed to a significant reduction in the density of structural defects on the surface of responsive elements. The described phenomenon can be used to obtain high-alloyed defect-free silicon structures. The proposed method makes it possible to reduce the density of dislocations on the surface of responsive elements by 2-3 orders of magnitude. The calculations suggest that during isothermal annealing, dislocations also move from the substrate volume to the surface.

A method of reducing the density of surface chip defects by performing a chemical-dynamic polishing operation in the zones of responsive elements after thermal oxidation is proposed. The method allows eliminating structural defects formed during oxidation, which are the centers of dislocation generation during diffusion operations. Chemical-dynamic polishing using SiO₂ masking forms a structured surface that getter generation and recombination centers in the crystal volume and reduces the coefficient of reflection of radiation from the PD surface. This method also makes it possible to produce PDs with low dark currents and increased sensitivity.

Practical significance of the results.

The results of the research carried out within the framework of this thesis are of great practical importance for the manufacture of reliable high-sensitivity PDs based on high-resistance silicon $n^+p\text{-}p^+$ -structures. The results of the dissertation were

implemented in the Rhythm Optoelectronics Sareholding Company in the manufacture of PDs PD-14M, PD-15M, PD-15M-01, PD 29, PD-255.

1. Technological modes of phosphorus and boron diffusion from planar solid-state sources were introduced, which allow to obtain PDs with improved parameters: dark current $I_d \leq 30$ nA and pulse sensitivity $S_{pulse} \approx 0.48-0.5$ A/W at $U_{bias} = -120$ V. (Patent for utility model No. 149890) [150].

2. The effect of the thickness of the adhesive chromium sublayer on the back side of the substrate on the charge carrier collection coefficient and PD sensitivity was investigated. It was found that the thickness of the adhesive layer of 10-12 nm provides minimal radiation absorption ($T = 4\%$ at $\lambda = 1,05$ μm) and ensures minimal sensitivity decline without loss of gold adhesive properties. Reducing the thickness of the chromium layer leads to a decrease in its transmittance.

3. A method for reducing the surface density of structural defects has been proposed by performing chemical-dynamic polishing in the sensitive element areas after thermal oxidation. This method eliminates structural defects formed during oxidation, which serve as dislocation generation centers during diffusion processes. Using this method, the surface dislocation density can be reduced from $N_{dis} \approx 4-6 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2}$ to $N_{dis} \approx 0.5-2 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}$. Chemical-dynamic polishing with SiO_2 masking creates a structured surface that gettered recombination centers within the PD crystal and reduces the surface reflectance of incident radiation. This approach results in photodetectors with improved photoelectric properties due to reduced structural defect density and the introduction of an additional gettering mechanism via the structured surface.

4. The implementation of silicon adhesive-cutoff optical filters is proposed and applied. These filters eliminate the influence of background short-wavelength radiation with $\lambda \leq 850$ nm on the useful signal of the PD. A filter design has been developed that ensures a transmission coefficient of $T \geq 70\%$ at the working wavelength (Patent for utility model No. 151697) [106].

5. A silicon $p-i-n$ PD with a mesa structure has been proposed and fabricated. This design minimize the degradation of minority carrier lifetime and the resistivity of

the base material by excluding the high-temperature passivation process. Reducing the number of thermal operations allows for the production of PDs with increased sensitivity ($S_{imp.} = 0.53 \text{ A/W}$). Fabrication of PD using mesa technology also reduces production costs compared to devices manufactured using classical planar technology (Patent for utility model No. 151696) [131].

6. A series of methods has been developed to increase the insulation resistance of sensitive elements in multi-element PDs. These methods are based on interrupting the inversion conduction channels at the Si-SiO₂ interface by etching the thin oxide film or the silicon surface layer, or by creating channel-blocking regions of the same conductivity type as the substrate material (p^+ -type) in the gaps between sensitive elements. It is proposed to perform boron diffusion to form p^+ -layers between the active elements simultaneously with the formation of the ohmic contact layer on the back side of the substrate, thereby avoiding additional thermal operations in the technological process and reducing degradation of the silicon's electrophysical properties during heat treatment. These methods allow the fabrication of quadrant PDs with inter-quadrant resistance of $\geq 20 \text{ M}\Omega$ (Patent for utility model No. 149108) [153].

7. A non-destructive method has been proposed for determining the final resistivity of the base material in n^+-p-p^+ -structures, which correlates well with the Hall effect-based method. The method is based on determining the reverse bias voltage at which the space charge region width reaches its maximum value.

Keywords: semiconductors, silicon, photon detector, $p-i-n$ photodiode, filter, dark current, thin film, silicon oxide, optical properties, space-charge region, current monochromatic sensitivity, current-voltage characteristic, capacitance-voltage characteristic, electro-physical properties, structural defects.

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань

України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Kukurudziak M. S. 1064 nm wavelength pin photodiode with low influence of periphery on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 01023-1 – 01023-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01023](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01023) (Scopus).
2. Kukurudziak M. S. Formation of dislocations during phosphorus doping in the technology of silicon p-i-n photodiodes and their influence on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 04015-1 – 04015-6. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.14(4).04015) (Scopus).
3. Kukurudziak M. S. Diffusion of phosphorus in technology for manufacturing silicon p-i-n photodiodes. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2022. Vol. 25, No. 4. P. 385-393. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.04.385> (WoS, Scopus).
4. Kukurudziak M. S. Influence of surface resistance of silicon p-i-n photodiodes n^+ -layer on their electrical parameters. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. Vol. 23, No. 4. P. 756-763. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.756-763> (WoS, Scopus).
5. Kukurudziak M. S. Problems of Masking and Anti-Reflective SiO₂ in Silicon Technology. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 2. P. 289-295. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-2-33> (WoS, Scopus).
6. Kukurudziak M. S. Isolation of Responsive Elements of Planar Multi-Element Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 3. P. 434-440. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-48> (WoS, Scopus).
7. Кукурудзяк М. С. Дослідження морфології макропористого Si, одержаного металом стимульованим щавленням за допомогою Au. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2023. Т. 21, №. 3. С. 605-616. <https://doi.org/10.15407/nnn.21.03.605> (Scopus).
8. Kukurudziak M. S., & Lipka V. M. Influence of silicon characteristics on the

parameters of manufactured photonics cells. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 4. P. 197-205. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-4-24> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Ліпка В. М.: обговорення результатів). (WoS, Scopus).

9. Kukurudziak M. S. The influence of the structure of guard rings on the dark currents of silicon p-i-n photodiodes. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 603-609. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.4.603-609> (WoS, Scopus).

10. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Study of the Charge Carrier Collection Coefficient of Silicon p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 1. P. 386-392. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-1-39> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, розрахунки, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В. : вимірювання спектрів пропускання легованих шарів, обговорення результатів) (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).

11. Kukurudziak M. S. Effect of Structural Defects on Parameters of Silicon Four-Quadrant p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 2. P. 345-352. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-41> (WoS, Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>).

12. Kukurudziak M. S., Lipka, V. M., & Ryukhtin, V. V. Silicon p-i-n Mesa-Photodiode Technology. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 3 P. 385-389. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-3-47> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Ліпка В. М. та Рюхтін В. В: обговорення результатів) (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).

13. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., & Koziarskyi I. P. Influence of Boron

Diffusion on Photovoltaic Parameters of n⁺-p-p⁺ Silicone Structures and Based Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 4. P. 289-296. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-4-31> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: вимірювання спектрів пропускання легованих шарів, обговорення результатів; Козярьський І. П.: вимірювання фотоелектричних параметрів). (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).

14. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Methods of Correction of Spectral Characteristics of Silicon Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 1. P. 290-294. <https://doi.org/290-294.10.26565/2312-4334-2025-1-34> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Рухтін В. В.: обговорення результатів) (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).

Наукові праці у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

15. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021, December. Vol. 12126. P. 511-518. <https://doi.org/10.1117/12.2616170>. ISSN: 0277-786X. (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті, доповідь; Майструк Е. В.: обговорення результатів, вимірювання спектрів пропускання зразків з різною товщиною хрому). (WoS, Scopus).

16. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. High-responsivity silicon p–i–n mesa-photodiode. *Semiconductor Science and Technology*. 2023. Vol. 38, No. 8. P. 085007. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/acdf14> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: обговорення результатів) (WoS; Scopus Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=27191&tip=sid&clean=0>).
17. Kukurudziak M. S. A method of increasing the interquadrant resistance of four-quadrant p-i-n photodiodes. *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19, No. 9, P. P09006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/P09006>. (WoS, Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=4900152808&tip=sid&clean=0>).
18. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., Yatskiv R., Koziarskyi I. P., & Koziarskyi D. P. Silicon p-i-n photodiode with reduced crystallographic defect density and structured surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58, No. 16. P. 165106. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/adbd4d> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду, обговорення результатів; Яцків Р.: СЕМ; Козярьський І. П. та Козярьський Д. П.: вимірювання спектрів пропускання) (WoS, Scopus Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=28570&tip=sid&clean=0>).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

19. Кукурудзяк М. С. Вплив хімічної обробки на товщину просвітлюючого SiO₂ в кремнієвій технології. *Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка: тези доповідей на VII Міжнародній науково-практичній конференції: 14-16 травня, 2022 р. Кременчук, 2022. С. 18-19. URL: https://drive.google.com/file/d/1l6LZMdaehKpjnbeE9BEoZapmBXCXq_QL/view*
20. Кукурудзяк М. С. Дослідження спектральної характеристики чутливості р-і-п фотодіодів. *Перспективні напрямки сучасної електроніки,*

інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2022). Тези доповідей на VII Всеукраїнській науково-практичній конференції: 23-25 листопада 2022 р., м. Дніпро, 2022. С. 155-156. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2022.pdf>

21. Кукурудзяк М. С. Метод оцінки часу життя неосновних носіїв заряду кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2023)*. Тези доповідей на VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції: 22-24 листопада 2023 р., м. Дніпро, 2023. С. 191-192. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2023.pdf>

22. Кукурудзяк М. С. Залежність параметрів напівпровідникових приладів від їх розміщення на підкладці. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023*, 17–20 травня 2023. Харків : НТУ «ХПІ». С. 191-192. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/ea5b83c5-0561-47cb-a4d0-67aacd51c994>

23. Кукурудзяк М. С., Кукурудзяк А. М. Дефектоутворення на поверхні кремнієвих підкладок при термічному напиленні золота. *Сучасні інформаційні та електронні технології: твори XXIV міжнародної науково-практичної конференції «CIET-2023»*, 29-31 травня, 2023 р. Одеса, 2023. С. 101-102. URL: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2023/01.pdf> (Особистий внесок автора: виготовлення та дослідження зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів; Кукурудзяк А. М.: обговорення результатів, написання тез).

24. Кукурудзяк М. С. Кремнієвий р-і-п фотодіод із зниженою кількістю поверхневих структурних дефектів. *Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання – 2023» з міжнародною участю*, Київ, 4-5 квітня 2023 року. Україна. С. 51-52. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12751/1/22.pdf>

25. Kukurudziak M. S. Isolation of responsive elements of coordinate p-i-n photodiodes by p + -layer. *Proceedings of the 51th International School & Conference*

on the Physics of Semiconductors «Jaszowiec 2023»: June 17–23, 2023. Szczyrk, Poland, 2023. P. 264. URL: <https://www.jaszowiec.edu.pl/2023/>

26. Кукурудзяк М. С. Утворення макропористого кремнію металостимульованим травленням за допомогою Cr. *9-та Українська наукова конференція з фізики напівпровідників: матеріали конференції*. – Ужгород: ТОВ "Рік-У", 2023. С. 324-325. URL: <https://drive.google.com/file/d/1M968vAoavH5bL16QUgsM5M9K7VmHaop3/view>

27. Кукурудзяк М. С. Фотодіод з абсорбційним кремнієвим фільтром. *IX Всеукраїнська науково-практична конференція «MEICS-2024»: Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем*, 27-29 листопада, 2024 р. Дніпро, 2024. С. 237-238. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2024.pdf>

Наукові праці які додатково відображають наукові результати дисертації:

28. Kukurudziak M. S., Andreeva O. P., & Lipka V. M. High-resistivity p-type silicon-based p-i-n photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm. *Technology and Design in Electronic Equipment*. 2020. No 5-6. P. 16-19. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Андрєєва О. П.: хімічна обробка пластин; Ліпка В. М.: обговорення результатів).

29. Кукурудзяк М. С., & Добровольський Ю. Г. Кремнієвий р–і–п-фотодіод із підвищеною імпульсною чутливістю. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2021. № 1-2. С. 61-67. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.61> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Добровольський, Ю. Г.: обговорення

результатів).

30. Кукурудзяк М. С. та Кукурудзяк А. М. Утворення дефектів на поверхні Si-підкладок в процесі термічного напилення золота. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2023. № 3–4. С. 47–51.

<http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.47> (Особистий внесок автора: виготовлення та дослідження зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Кукурудзяк А. М.: обговорення результатів).

31. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Features of diffusion doping and boron gettering of silicon p-i-n photodiodes. 2022 *IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022, October. P. 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916420> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: обговорення результатів) (Scopus).

32. Kukurudziak M. S. Degradation of Silicon Resistivity During Thermal Operations in p-i-n Photodiodes Technology. 2023 *IEEE 13th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)*. 2023, September. P. 301-305. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310993> (Scopus).

33. Kukurudziak M. S. Silicon p-i-n Photodiode with Reduced Background Radiation. 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2023, October. P. 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312979> (Scopus).

34. Kukurudziak M. S. P-I-N Photodiode with Optical Concentrator for the Near-IR Region. *Proceedings - IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO*. 2024, May. P. 650-653. <https://doi.org/10.1109/ELNANO63394.2024.10756905> (WoS, Scopus).

35. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Low-voltage Silicon p-i-n Photodiode with Increased Collection Coefficient of Minority Charge Carriers and

Responsivity. 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2024, October. P. 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878036> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Рюхтін В. В.: обговорення результатів). (Scopus).

36. Кукурудзяк М. С. Технологічні причини пробою р-п-переходу кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2022. Т. 27, № 3. С. 268299-1. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.268299>

37. Кукурудзяк М. Проблематика різання підкладок алмазованим диском в технології кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Наукоємні технології*. 2022. Т. 54, № 2. С. 127-137. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.54.16750>

38. Kukurudziak M. Silicon four element p-i-n photodiode with improved characteristics. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 1. P. 92-100. <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.07> (Scopus).

39. Кукурудзяк М. С. Проблеми хіміко-динамічного полірування в технології кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2023. Т. 14, № 1. С. 42-52. <https://doi.org/10.15407/hftp14.01.042> (Scopus).

40. Кукурудзяк М. С. Аналіз спектральної характеристики чутливості дифузійних р-і-п фотодіодів на основі високоомного р-Si. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2023. Т. 28, № 1. С. 275010-1 – 275010-6. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.275010>

41. 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.org/10.15407/hftp14.02.182> (Scopus).

42. Kukurudziak M. Technology of Silicon p-i-n Photodiodes with a Reduced Number of Thermal Operations. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*. 2023. Vol. 1, No. 1. P. 01002-01002. <https://doi.org/10.31861/sisiot2023.1.01002>

43. Kukurudziak M. S., Koziarskyi I. P., Solodkyi M. S., Maistruk E. V.,

Kopach V. V., Semeniuk Y. O., Pavliuk M. M. Photodetectors for x- and γ -ray scintillators. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 2. P. 281-286. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-2-34> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, розрахунки, аналіз результатів, написання статті; Козярьський І. П.: вимірювання фотоелектричних параметрів; Солодкий М. М., Майструк Е. В., Копач В. В., Семенюк Ю. О., Павлюк М. М.: обговорення результатів). (WoS, Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>)

44. Kukurudziak M.S., Koziarskyi D.P., Koziarskyi I.P., Maistruk E.V., Ilashchuck M.I., Kysil D.V. Electrical, Optical, and Structural Properties of Silicon n+-p Structure. *East European Journal of Physics*. 2025. № 3. С 336-342. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-3-32> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, аналіз результатів, написання статті; Козярьський Д. П.: вимірювання спектрів пропускання, розрахунки; Козярьський І. П.: вимірювання електричних параметрів; Майструк Е. В.: обговорення результатів; Ілащук М.І.: вимірювання та розрахунки кінетичних властивостей; Кусіль Д. П.: вимірювання спектрів відбивання). (WoS, Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>)

Патенти на корисну модель:

45. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб виготовлення р-і-п фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149890 Україна: МПК (2021.01) H01L 31/00, № u 202100503; заявл. 08.02.2021; опубл. 15.02.2021, Бюл. №50. (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М., Рюхтін В.В. та Федінчук І.І.: аналіз та обговорення результатів). <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=279707>

46. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб

виготовлення $p-i-n$ фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149108 Україна: МПК (2021.01) H01L 31/00, № у 202101103; заявл. 05.03.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. №42. *(Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М.: обговорення результатів, Шимановський О.Б.: розробка конструкції фотодіода).*

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278625>

47. Кукурудзяк М.С., Шимановський О.Б., Ліпка В.М. Спосіб виготовлення кристала кремнієвого $p-i-n$ фотодіода з мезаструктурою: Пат. 151696 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № у 202107811; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35. *(Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М. та Шимановський О.Б.: обговорення результатів та конструкції кристалу).*

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282779>

48. Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Перепелиця О.О., Сидор О.М., Кукурудзяк М.С. Кремнієвий $p-i-n$ фотодіод із відрізаючим оптичним фільтром: Пат. 151697 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № у 202107818; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35. *(Особистий внесок автора: вимірювання оптичних та фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М. та Рюхтін В.В.: обговорення результатів, Перепелиця О.О. та Сидор О.М.: виготовлення зразків).*

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282775>

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП.....	31
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОПРИЙМАЧІВ НА ОСНОВІ n^+p-p^+ - СТРУКТУР	41
1.1. Принцип роботи фотодіодів на основі високоомних n^+p-p^+ - структур.....	42
1.2. Вибір базового матеріалу структур.....	44
1.3. Утворення n^+ - та p^+ - шарів.....	46
1.4. Дефекти в $p-i-n$ -структурах та деградація електрофізичних характеристик кремнію.....	47
1.5. Проблеми ізолювання активних елементів квадрантних фотодіодів.....	50
Висновки до першого розділу.....	52
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРЕМНІЄВИХ n^+p-p^+ - СТРУКТУР ТА ФОТОПРИЙМАЧІВ НА ЇХ ОСНОВІ.....	53
2.1. Вплив електрофізичних характеристик базового матеріалу на фотоелектричні властивості n^+p-p^+ - структур та фотоприймачів на їх основі.....	53
2.1.1. Виготовлення фоточутливих структур на основі кремнію з різними електрофізичними характеристиками.....	53
2.1.2. Методики вимірювань.....	56
2.1.3. Дослідження $C-V$ характеристик та опору ізоляції між активними елементами структур.....	57
2.1.4. Дослідження темнових струмів та бар'єрної ємності структур.....	59
2.1.5. Дослідження чутливості структур.....	61
2.1.6. Дослідження швидкості росту SiO_2 на поверхні різних типів кремнію.....	64
2.2. Вплив концентрації фосфору в n^+ -шарі на фотоелектричні властивості	

кремнієвих n^+p-p^+ - структур та фотоприймачів на їх основі.....	66
2.2.1. Виготовлення n^+p-p^+ - структур з різною концентрацією фосфору та дослідження легованих шарів.....	66
2.2.2. Дослідження кінетичних властивостей кремнієвих n^+ -шарів.....	72
2.2.3. Дослідження електричних властивостей кремнієвих n^+p -переходів...	73
2.2.4. Вплив концентрації фосфору в n^+ -шарі на темнові струми кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів.....	77
2.2.5. Вплив легування n^+ -шару на чутливість кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів.....	80
2.3. Вплив дифузійного легування та геттерування бором на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+p-p^+ - структур та фотоприймачів на їх основі.....	82
2.3.1. Вплив дифузії бору на темнові струми кремнієвих n^+p-p^+ -структур.....	83
2.3.2. Вплив дифузії бору на чутливість кремнієвих n^+p-p^+ -структур.....	86
2.3.3. Вплив дифузії бору на ємність фоточутливих елементів та кінцеві електрофізичні параметри p -області n^+p-p^+ -структур.....	90
2.3.4. Вплив концентрації бору в p^+ -шарі на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+p-p^+ - структур та фотоприймачів на їх основі.....	94
Висновки до другого розділу.....	97
РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВНІ СТРУКТУРИ КРЕМНІЄВИХ $p-i-n$ ФОТОДІОДІВ.....	100
3.1. Кремнієвий $p-i-n$ фотодіод із відрізаючим світлофільтром та оптичним концентратором.....	100
3.1.1. Матеріали для виготовлення абсорбційних фільтрів для ближньої ІЧ-області.....	100
3.1.2. Виготовлення кремнієвих світлофільтрів.....	102
3.1.3. Дослідження параметрів фотодіодів із світлофільтрами.....	104
3.1.4. Фотодіод із світлофільтром та оптичним концентратором.....	107

3.2. Низьковольтний фотодіод із підвищеним коефіцієнтом збирання носіїв заряду.....	113
3.2.1. Розрахунки коефіцієнта збирання носіїв заряду та чутливості фотодіодів.....	113
3.2.2. Виготовлення та дослідження фотодіодів із підвищеним коефіцієнтом збирання носіїв заряду	118
3.3. Високочутливі кремнієві <i>p-i-n</i> меза-фотодіоди.....	122
3.3.1. Виготовлення меза-фотодіодів.....	122
3.3.2. Дослідження поверхні кристалів меза-фотодіодів.....	129
3.3.3. Дослідження параметрів меза-фотодіодів.....	132
3.4. Чотириквadrантний кремнієвий фотодіод з підвищеним міжквadrантним опором.....	137
3.4.1. Виготовлення фотодіодів із підвищеним міжквadrантним опором...	138
3.4.2. Дослідження параметрів фотодіодів із підвищеним міжквadrантним опором.....	140
Висновки до третього розділу.....	146
ВИСНОВКИ.....	148
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ	173
Додаток 1. Вплив кристалографічних дефектів на фотоелектричні параметри кремнієвих <i>p-i-n</i> фотодіодів	173
Додаток 2. Список публікацій за темою дисертації.....	247
Додаток 3. Відомості про апробацію матеріалів дисертації.....	258
Додаток 4. Впровадження результатів дисертаційної роботи.....	260

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ФД – фотодіод;

ФП – фотоприймач;

ОПЗ – область просторового заряду;

ОК – охоронне кільце;

ФЧЕ – фоточутливий елемент;

ХДП – хіміко-динамічне полірування;

ГРЦ – генераційно-рекомбінаційний центр;

ІШ – інверсійний шар;

АСМ – атомно-силова мікроскопія;

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія;

ІС – інтегральні схеми;

МДН – структура метал-діелектрик-напівпровідник;

ФСС – фосфоро-силікатне скло;

$t_{др}$ – час дрейфу носіїв заряду;

W_i – ширина області просторового заряду;

μ_n – рухливість електронів;

E – напруженість електричного поля;

v_n – це швидкість дрейфу електронів;

$t_{диф}$ – час дифузії носіїв заряду;

D_n – коефіцієнт дифузії електронів;

k – стала Больцмана;

T – температура;

φ_k – контактна різниця потенціалів;

$U_{зм}$ – напруга зміщення;

$R_{зв}$ – опір ізоляції фоточутливого елемента та охоронного кільця;

$\sum R_{зв}$ – опір ізоляції всіх фоточутливих елементів та охоронного кільця;

R_n – опір навантаження;

U_n – спад напруги на резисторі навантаження;
 τ_i – тривалість імпульсу;
 $S_{imp.}$ – імпульсна струмова монохроматична чутливість фотодіода;
 I_m – темновий струм фотодіода;
 $I_m^{ген.}$ – об’ємна генераційна складова темнового струму;
 n_i – власна концентрація носіїв заряду в підкладці;
 e – заряд електрона;
 $A_{ФЧЕ}$ – ефективна площа фоточутливого елемента;
 λ – довжина хвилі;
 τ – час життя носіїв заряду;
 $K_{ф.зв}$ – коефіцієнт фотозв’язку;
 $\varepsilon, \varepsilon_0$ – діелектричні проникності для кремнію і вакууму відповідно;
 I_{OK} – темновий струм охоронного кільця;
 ρ – питомий опір;
 $C_{ФЧЕ}$ – ємність фоточутливого елемента;
 N_A – концентрація акцепторів;
 γ – коефіцієнт збирання носіїв заряду;
 R – коефіцієнт відбивання;
 T – коефіцієнт пропускання;
 Q_E – внутрішній квантовий вихід;
 S_λ – спектральна чутливість;
 S_m – максимум спектральної чутливості;
 x_{n^+-p} – глибина залягання n^+ - p -переходу;
 x_{p^+-p} – глибина залягання p^+ - p -переходу;
 N – показник заломлення;
 d_{SiO_2} – товщина оксидної плівки;
 $n_{(100)}; n_{(111)}; n_{(110)}$ – поверхнева густина атомів кремнію кристалографічних площин (100), (111), (110) відповідно;
 a – період кристалічної ґратки;

N_a – кількість атомів, які повністю містяться в елементарній комірці двовимірної поверхневої решітки;
 S – площа елементарної комірки;
 D – коефіцієнт дифузії;
 t – час;
 N_0 – поверхнева концентрація домішки;
 σ – електропровідність напівпровідника;
 R_s – поверхневий опір;
 $N_{x,t}$ – розподіл концентрації домішки по глибині p - n переходу;
 $erfc(x)$ – додаткова функція помилок;
 Q – доза легування;
 β_φ – температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру;
 j – густина рекомбінаційного струму;
 a_0 – коефіцієнт, значення якого визначається ймовірністю заповнення енергетичних рівнів, з яких відбувається тунелювання електронів;
 b_0 – коефіцієнт, який визначається швидкістю зміни величини струму з напругою;
 I_t – тунельний струм;
 n – коефіцієнт неідеальності;
 RR – коефіцієнт випрямлення;
 T_{n+} – коефіцієнт пропускання n^+ -шару;
 T_{p+} – коефіцієнт пропускання p^+ -шару;
 X – товщина кристалу;
 $S_{\lambda max}$ – теоретично можливе значення спектральної чутливості фотодіода;
 α – коефіцієнт поглинання;
 L_n – дифузійна довжина електронів;
 μ_p – рухливість дірок;
 $\sigma_{ss-n}, \sigma_{ss-p}$ – переріз захоплення дефектом електронів і дірок відповідно;
 E_D – енергетичний рівень генераційно-рекомбінаційного центру;

E_i – енергетичний рівень, що відповідає середині забороненої зони;
 N_D – концентрація генераційно-рекомбінаційних центрів;
 V_n, V_p – середня відносна (відносно центру рекомбінації) швидкість теплового руху електронів і дірок, відповідно;
 d – товщина;
 $U_{zm\ max}$ – напруга напичення фотодіода;
 λ_{max} – довжина хвилі, яка відповідає максимуму спектральної чутливості;
 I_{sc} – струм короткого замикання зовнішнього кола фотоприймача;
 N_ϕ – кількість фотонів;
 $I(x)$ – інтенсивність світла, що пройшло через шар речовини товщиною x ;
 I_0 – інтенсивність світла на вході в речовину;
 T_{Cr} – коефіцієнт пропускання шару хрому;
 γ_I, γ_{II} – коефіцієнт збирання носіїв заряду при одному та подвійному проходженні випромінювання крізь товщу кристала фотодіода відповідно;
 S_M – чутливість фотодіода при одному проходженні випромінювання крізь товщу кристалу фотодіода;
 S_L – струмова статична монохроматична чутливість;
 D^* – детективність;
 $\overline{\sigma_R}, \overline{\sigma_\theta}$ – середнє значення радіальних та кутових розтягуючих напружень, відповідно;
 σ_R, σ_θ – значення радіальних та кутових розтягуючих напружень, відповідно при кімнатній температурі;
 α_{Si} – температурний коефіцієнт термічного розширення кремнію;
 E – модуль Юнга;
 T_0 – кімнатна температура;
 A_{p-n} – площа, p - n -переходу;
 N_{ss} – густина поверхневих станів;
 $R_{\phi_{ЧЕ}-\phi_{ЧЕ}}$ – опір ізоляції між фоточутливими елементами;
 $I_m^{нов.}$ – поверхнева складова темного струму.

ВСТУП

Актуальність теми досліджень. Актуальність дослідження фотоелектричних властивостей кремнієвих високоомних n^+p -структур та $p-i-n$ ФД на їх основі, полягає в широкому застосуванні таких ФП у сучасних технологіях, де важлива висока чутливість, швидкість відгуку та ефективність перетворення світлових сигналів в електричні. Оскільки $p-i-n$ фотоприймачі є основою для багатьох фотонних та оптичних пристроїв, таких як оптичні комунікаційні системи, сенсори і датчики, точне розуміння та вдосконалення їх фотоелектричних властивостей дозволяє значно поліпшити характеристики цих технологій.

Завдяки своїй структурі, що включає p -тип і n -тип напівпровідникових матеріалів, між якими знаходиться високоомний i -шар, $p-i-n$ ФД здатні працювати з високою ефективністю при широкому спектрі хвиль, що робить їх незамінними для різноманітних оптичних і фотонних технологій. Завдяки своїй технологічності та поширеності інтеграція кремнію в $p-i-n$ структуру відкриває можливості для створення високопродуктивних фотоприймачів, що здатні ефективно працювати у широкому спектрі хвиль, зокрема в видимому та інфрачервоному діапазоні, що є важливим для багатьох сучасних технологій.

Кремнієві $p-i-n$ ФД мають низький рівень шуму та високу чутливість, що робить їх ідеальними для використання в телекомунікаціях, де вони використовуються для прийому сигналів у волоконно-оптичних системах, в медицині для створення систем діагностики, таких як оптичні сенсори та фототерапевтичні апарати, а також у науці та техніці для дослідження властивостей матеріалів та фізичних процесів.

Завдяки високій стабільності та сумісності з іншими кремнієвими компонентами, ці фотоприймачі можуть бути інтегровані в комплексні системи, такі як мікросхеми та сенсори, що є важливим для розвитку мікроелектроніки та фотоніки.

Ще однією перевагою кремнієвих $p-i-n$ фотоприймачів є їх здатність до масштабування і використання в інтегрованих фотонних пристроях. Вони дозволяють створювати мініатюрні, але ефективні фотодетектори для різноманітних застосувань, зокрема у сенсорах для медичних приладів, інфрачервоному дистанційному зображенні, а також в автоматизації та робототехніці.

Дослідження фотоелектричних властивостей кремнієвих n^+-p-p^+ -структур та фотоприймачів на їх основі є важливим кроком у розвитку технологій, що забезпечують високоточне вимірювання світлових сигналів і реалізацію новітніх наукових досягнень у сфері оптики та фотоніки. Розробка та виготовлення кремнієвих $p-i-n$ фотоприймачів є надзвичайно актуальним напрямом у науці та техніці, оскільки вони забезпечують баланс між високою продуктивністю, низькими витратами на виробництво та здатністю інтегруватися в існуючі мікроелектронні системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана на ЦКБ «Ритм» (технологічна частина - виготовлення об'єктів дисертаційної роботи, попереднє тестування їх параметрів) та кафедрі електроніки і енергетики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (дослідження оптичних, електричних та фотоелектричних властивостей об'єктів дисертаційної роботи). Вона є складовою частиною науково-дослідних робіт, що виконувались (виконуються) в НН ІФТКН:

«Розробка на основі напівпровідникових кристалів та тонких плівок приладів електроніки та фотовольтаїки» (номер Держреєстрації 0121U1111110)

«Рациональне проектування четвертинних детекторних матеріалів для пристроїв дистанційної роботи в умовах значного радіаційного випромінювання» (номер Держреєстрації: 0125U000832).

«Статичні та кінетичні явища у макро- і нанооб'єктах зі спіновими переходами та металополімерних системах, динаміка квазічастинок у низьковимірних кристалічних структурах» (номер Держреєстрації 0122U001981).

Метою роботи було вдосконалення існуючих та розробка нових конструкцій фотодіодів на основі сучасних фізичних уявлень про фотоелектричні явища та процеси струмопереносу у кремнієвих планарних n^+p -структурах.

Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено такі завдання:

1. встановити вплив характеристик базового матеріалу та концентрації легованих фосфору і бору в n^+ - та p^+ -шарах відповідно на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+p -структур і фотоприймачів на їх основі та з'ясувати оптимальні режими дифузійного легування та геттерування фосфором та бором для отримання мінімальних темнових струмів та максимальної чутливості;
2. розробити неруйнівний метод визначення кінцевого питомого опору та дифузійної довжини неосновних носіїв заряду базового кремнію;
3. обґрунтувати вплив кристалографічних дефектів на фотоелектричні параметри $p-i-n$ фотодіодів та розробити методи зниження густини поверхневих структурних дефектів на поверхні кремнієвих підкладок;
4. з'ясувати методи підвищення коефіцієнта збирання носіїв заряду та чутливості фотодіодів;
5. розробити та виготовити високочутливі кремнієві меза-фотодіоди
6. удосконалити методи ізолювання чутливих елементів квадрантних $p-i-n$ фотодіодів;
7. розробити та виготовити багатоелементні фотоприймачі із підвищеним опором ізоляції між активними елементами.

Об'єкт дослідження – транспортні, фотоелектричні та оптичні процеси у фотодіодних структурах на основі кремнію.

Предмет дослідження – процеси струмопереносу та фотоелектричні явища в кремнієвих планарних n^+p -структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі.

Методи дослідження – скануюча електронна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія, металографічний аналіз, вимірювання спектрів пропускання та відбивання, вимірювання поверхневого опору легованих шарів, вимірювання

вольт-амперних та вольт - фарадних характеристик, вимірювання спектральних характеристик чутливості, вимірювання глибини залягання дифузійного шару, вимірювання товщини оксидних і металевих плівок, вимірювання опору ізоляції між чутливими елементами, вимірювання імпульсної чутливості та чутливості на модульованому потоці, вимірювання коефіцієнта фотоелектричного зв'язку, вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду, вимірювання питомого опору, селективне травлення підкладок.

Наукова новизна одержаних результатів.

В даній роботі **вперше:**

1. Досліджено вплив поверхневого опору (концентрації) легованих в n^+ - та p^+ -шарів фосфором та бором відповідно на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+-p-p^+ - структур і фотоприймачів на їх основі. Встановлено, що значення поверхневих опорів $R_s=2,7-3 \text{ Ом}/\square$ та $R_s=16-20 \text{ Ом}/\square$ n^+ - та p^+ -шарів відповідно є оптимальними. Зменшення концентрації домішки (збільшення R_s) в легованих шарах знижує ступінь геттерування генераційно-рекомбінаційних центрів, що, відповідно, погіршує параметри виробів. Збільшення концентрації домішки призводить до дефектоутворень, внаслідок утворення механічних напружень та їх релаксації, а також призводить до зменшення коефіцієнта пропускання випромінювання робочої довжини хвилі.

2. Досліджено вплив глибини n^+-p -переходу на спектральну характеристику чутливості $p-i-n$ фотодіодів. Встановлено, що збільшення глибини залягання дифузійного шару фосфору зміщує короткохвильовий край спектральної характеристики фотодіода в сторону більших довжин хвиль. При $x_{n^+-p} = 4-4,2 \text{ мкм}$ короткохвильовий край спектральної характеристики сягає $\lambda \approx 400 \text{ нм}$, а при $x_{n^+-p} = 5,8-6 \text{ мкм}$ - $\lambda \approx 700 \text{ нм}$. Це явище можна використовувати для зменшення впливу короткохвильового фонового випромінювання на корисний сигнал фотодіода, та викликане поглинанням короткохвильового випромінювання легованим шаром.

3. Проведено порівняльну характеристику легування фосфором з планарних твердотільних джерел та рідинно-фазного дифузанта PCl_3 в технології

виготовлення *p-i-n* фотодіодів. Встановлено, що легування за допомогою рідинно-фазного дифузанта провокує значне дефектоутворення на поверхні підкладок, що негативно впливає на фотоелектричні характеристики виготовлюваних фотоприймачів. Причиною дефектоутворення є розміщення значної кількості легованих атомів в міжвузлях кристалічної решітки кремнію, які вносять додаткові механічні напруження розширення, та викликають утворення дислокацій, внаслідок релаксації цих напружень.

4. Встановлено явище міграції дислокацій по поверхні Si-SiO₂-структур з інверсійними шарами. Це явище можна використовувати як метод зниження густини структурних дефектів на поверхні чутливих елементів кремнієвих фотоприймачів. При використанні цього методу вдається знизити поверхневу густину дислокацій з $N_{disc} \approx 4-6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ до $N_{disc} \approx 2-4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$.

5. Запропоновано метод підвищення опору ізоляції чутливих елементів і охоронного кільця кремнієвих чотириквadrантних фотодіодів шляхом розриву поверхневих інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂. Метод ґрунтується на травленні оксидної плівки в проміжках між активними елементами, що дозволяє видалити інверсійні шари. Метод дозволяє збільшити опір ізоляції активних елементів з 3-45 кОм до 10-20 МОм.

Також в даній роботі дістало подальшого розвитку розуміння впливу ростових та набутих, поверхневих та об'ємних кристалографічних дефектів на фотоелектричні параметри кремнієвих $n^+ - p - p^+$ - структур та *p-i-n* ФД на їх основі. Встановлено, що дефекти, які перетинають високоомну *i*-область ФП можуть провокують погіршення їх параметрів, однак дефекти, розміщені в легованих n^+ -зонах впливають на деградацію параметрів мінімально. Дислокації, які перетинають області зазорів між активними елементами можуть знижувати опір ізоляції та коефіцієнт фотоелектричного зв'язку останніх.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати досліджень, проведених у рамках цієї дисертаційної роботи мають велике практичне значення для виготовлення надійних високочутливих ФП

на основі високоомних кремнієвих n^+p -структур. Результати дисертації застосовані та впроваджені в Центральному конструкторському бюро «Ритм» при виготовленні таких ФД: ФД-14М, ФД-15М, ФД-15М-01, ФД-29, ФД-255, ФД-31СФ.

1. Впроваджено технологічні режими дифузії фосфору та бору з планарних твердотільних джерел, які дозволяють отримувати ФД з покращеними параметрами: значення темнового струму $I_m \leq 30$ нА та імпульсної чутливості $S_{imp.} \approx 0,48-0,5$ А/Вт при $U_{zm} = -120$ В. (Патент на корисну модель № 149890) [150].

2. Досліджено вплив товщини адгезійного підшару хрому з тилової сторони підкладки на коефіцієнт збирання носіїв заряду та чутливість ФД. Встановлено що товщина адгезійного шару 10-12 нм забезпечує мінімальне поглинання випромінювання ($T=4\%$ при $\lambda=1,05$ мкм) та забезпечує мінімальний спад чутливості без втрат адгезійних властивостей золота. Зменшення товщини шару хрому призводить до зниження його коефіцієнта пропускання.

3. Запропоновано метод зниження густини поверхневих структурних дефектів шляхом проведення операції ХДП в зонах чутливих елементів після термічного окислення. Метод дозволяє ліквідувати структурні дефекти утворені під час окиснення, які є центрами генерації дислокацій під час дифузійних операцій. При використанні методу вдається знизити поверхневу густину дислокацій з $N_{duc.} \approx 4-6 \cdot 10^6$ см⁻² до $N_{duc.} \approx 0,5-2 \cdot 10^2$ см⁻². Проведення ХДП з використанням маскування за допомогою SiO₂ формує структуровану поверхню, яка геттерує ГРЦ в об'ємі кристалу ФД та зменшує коефіцієнт відбивання випромінювання від поверхні ФД. Описане дозволяє отримати ФП із покращеними фотоелектричними властивостями внаслідок зменшення густини структурних дефектів та введення додаткового механізму геттерування структурованою поверхнею.

4. Запропоновано та впроваджено використання кремнієвих адгезійних відрізаючих світлофільтрів, які дозволяють виключити вплив фонового короткохвильового випромінювання із $\lambda \leq 850$ нм на корисний сигнал ФД. Розроблено конструкцію світлофільтра, який забезпечує коефіцієнт пропускання

випромінювання робочої довжини хвилі $T \geq 70\%$ (Патент на корисну модель № 151697) [106].

5. Запропоновано та виготовлено кремнієвий $p-i-n$ ФД з меза-структурою, який дозволяє нівелювати зменшення часу життя неосновних носіїв заряду та питомого опору базового матеріалу за рахунок виключення високотемпературної операції пасивації. Зниження кількості термічних операцій дозволяє отримати ФД із підвищеною чутливістю ($S_{\text{imn.}}=0,53$ А/Вт). Виготовлення ФД за меза-технологією також знижує їх вартість порівняно із виробами, виготовленими за класичною планарною технологією (Патент на корисну модель № 151696) [131].

6. Розроблено ряд методів збільшення опору ізоляції чутливих елементів багатоеlementних ФД, які базуються на розриві інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂ шляхом травлення оксидної плівки чи поверхневого шару кремнію, або утворення областей обмеження каналів витоку ізотипних із матеріалом підкладки (p^+ -типу) в зазорах між чутливими елементами. Запропоновано проводити дифузію бору для утворення p^+ -шарів між активними елементами одночасно з утворенням омічного шару на тилівій стороні підкладки, що виключає потребу введення в технологічний маршрут додаткових термічних операцій та дозволяє знизити міру деградації електрофізичних характеристик кремнію під час термообробок. Запропоновані методи дозволяють виготовляти квадрантні ФД із міжквадрантним опором ≥ 20 МОм (Патент на корисну модель № 149108) [153].

7. Запропоновано неруйнівний метод визначення кінцевого питомого опору базового матеріалу n^+-p-p^+ - структур, який добре корелює із методом визначення на основі ефекту Холла. Метод базується на визначення напруги зворотного зміщення, при якій ширина ОПЗ набуває максимального значення.

Особистий внесок здобувача.

Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Наукові результати, висновки та практичні розробки належать особисто автору. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише ті

положення та ідеї, які є результатом власних досліджень здобувача. Особистий внесок здобувача в основних працях [1-18] полягає в такому: в [1-7, 9, 11, 17] здобувач особисто розробляв методики експериментів, планував і проводив експериментальні дослідження, особисто виготовляв експериментальні зразки, самостійно аналізував і пояснював результати, писав статті; в [8, 10, 13, 12-16, 18] з співавторами проводились деякі вимірювання оптичних та фотоелектричних характеристик та обговорення результатів для їхньої інтерпретації.

Апробація результатів дисертації

Основні результати досліджень, викладених у дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на семінарах кафедри електроніки і енергетики, а також професійної та технологічної освіти і загальної фізики Навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а також на таких всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях :

1. The 15th International Conference on Correlation Optics, «Correlation Optics'17», 13 - 16 September 2021, Chernivtsi, Ukraine (SPIE); (заочна участь)
2. The 3rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 3-7 October 2022, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
3. The 4rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 2-6 October 2023, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
4. The 5rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 7-11 October 2024, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
5. The 13th International Conference on Electronics and Information Technologies «ELIT», 26-28 September 2023, Lviv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
6. The 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology «ELNANO», 13-16 May 2024, Kyiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
7. Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання 2023», 29– 31 травня 2021 р., Київ, Україна; (заочна участь)

8. VII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2022), 23– 25 листопада 2022 р, Дніпро, Україна; *(заочна участь)*

9. VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (НМІТФ), 14-16 травня 2022 р., Кременчук, Україна; *(заочна участь)*

10. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2023), 22– 24 листопада 2023 р, Дніпро, Україна; *(заочна участь)*

11. IX Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2024), 27– 29 листопада 2024 р, Дніпро, Україна; *(заочна участь)*

12. The 51th Jaszowiec International School and Conference on the Physics of Semiconductors «Jaszowiec 2023», 17 – 23 June 2023, Szczyrk, Poland; *(онлайн доповідь)*

13. IX Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН–9», 22-26 травня 2023р. Ужгород, Україна; *(заочна участь)*

14. XXIV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» (CIET-2023), 29-31 травня 2023р. Одеса, Україна; *(заочна участь)*

15. XXXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2023), 17-20 травня 2023р. Харків, Україна. *(онлайн доповідь)*

Публікації. За результатами виконаного дослідження опубліковано 48 наукових праць, зокрема, 18 статей у наукових фахових виданнях, які внесено до міжнародних наукометричних баз даних (з них 4 статті у виданнях іноземних держав), 17 публікацій в інших виданнях, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 4 патенти на корисну модель.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох

розділів з підрозділами, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Обсяг дисертації складає 261 сторінки (з них: 122 сторінка основного тексту). Список використаних джерел містить 156 найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ВИГОТОВЛЕННЯ ФОТОПРИЙМАЧІВ НА ОСНОВІ n^+p - p^+ - СТРУКТУР

При створенні систем автоматичного регулювання і керування технологічними процесами, дослідженні природних ресурсів Землі, в системах астронавігації літальних апаратів, а також в військовій техніці і кіно- фототехніці знаходять широке використання напівпровідникові фотоприймачі [1, 2].

Фотоприймачі – це оптоелектронні прилади для перетворення енергії оптичного випромінювання в електричну. Під дією оптичного випромінювання відбувається зміна електрофізичних параметрів фотоприймача, зумовлене створенням додаткових вільних носіїв заряду в напівпровіднику. Процес створення додаткових носіїв заряду (фотоносіїв) в середині напівпровідника під дією оптичного випромінювання називається внутрішнім фотоефектом чи фотоелектричним ефектом. В фотоприймачах використовуються внутрішні фотоефекти: фотопровідності та фотогальванічний [3].

Фотогальванічний ефект виникає в напівпровідниках з внутрішнім потенціальним бар'єром (з p - n переходом, з переходом метал-напівпровідник, з гетеропереходом), де внутрішнє електричне поле p - n переходу розділяє фотоносії заряду генеровані під дією оптичного випромінювання. Просторово розділені фотоносії різних знаків – дірки і електрони - створюють фото електрорушійну силу. Ефект фотопровідності (на відміну від фотогальванічного) полягає тільки в створенні фотоносіїв; результатом зміни концентрації фотоносіїв в напівпровіднику є його збільшення провідності. Ці ефекти використовуються в практиці конструювання фотоприймачів: фотогальванічний ефект в фотодіодах, фототранзисторах, фототиристорах та інших ФП з p - n переходом, ефект фотопровідності в фоторезисторах [4].

Провідними виробниками фотоприймачів є Excelitas Technologies Corp. (Тайвань), First Sensor AG (Німеччина), Hamamatsu (Японія) та ін. Кращі зразки кремнієвих p - i - n ФД, призначені для детектування ближнього ІЧ-випромінювання, володіють максимумом спектральної характеристики близько $\lambda=1000$ нм та

монохроматичною струмовою чутливістю при $\lambda=1,05$ мкм близько $S_{\lambda}\approx 0.6-0.7$ А/Вт.

1.1. Принцип роботи фотодіодів на основі високоомних n^+-p-p^+ - структур

Широковживаними ФП, що працюють в фотогальванічному режимі є ФД на основі високоомних n^+-p-p^+ - структурою або $p-i-n$ ФД [5]. В ФД з $p-i-n$ структурою i -область розміщена між двома n^+ - та p^+ -областями (Рис. 1.1а) та має питомий опір в 10^6-10^9 разів більше, ніж питомий опір легованих областей. При достатньо високих напругах зворотного зміщення сильне електричне поле розповсюджується на всю i -область. Оскільки ця область може бути зроблена достатньо широкою, така структура створює основу для швидкодіючого та високочутливого ФП. Дірки та електрони, генеровані в високоомній області внаслідок поглинання випромінювання, швидко розділяються електричним полем (Рис. 1.1б). Конструкцією типових $p-i-n$ ФД забезпечується поглинання максимальної кількості випромінювання в i -області, що забезпечує високі значення фоточутливості [6]. Підвищення швидкодії зумовлено тим, що процес дифузії носіїв заряду в звичайній структурі фотодіода, в $p-i-n$ - структурі замінюється дрейфом носіїв через i -область в сильному електричному полі [7]. Час дрейфу електронів $t_{др}$ через i -область шириною W_i (ширина області просторового заряду) з напруженістю E складає [8]:

$$t_{др} = \frac{W_i}{v_n} = \frac{W_i}{\mu_n E} \quad (1)$$

де $v_n=\mu_n E$ це швидкість дрейфу електронів в електричному полі, μ_n це рухливість електронів.

При напруженості електричного поля приблизно $E=2\cdot 10^6$ В/м досягається максимальна швидкість дрейфу носіїв $v=(6-8)\cdot 10^4$ м/с. В цьому випадку варіюючи W_i від 5 до 500 мкм можна отримати $t_{др}\approx 10^{-9}-10^{-11}$ с.

Відношення часу дрейфу електронів через i -область до часу дифузії через базу $p-n$ ФД ($t_{диф}$) можна представити в вигляді:

$$\frac{t_{др}}{t_{диф}} = \frac{W_i/\mu_n E}{W_i^2/2D_n} = \frac{W_i^2/\mu_n U_{зм}}{W_i^2/2D_n} = \frac{2\varphi}{U_{зм}} \quad (2)$$

Оскільки $D_n/\mu_n = kT/q = \varphi$.

де D_n - коефіцієнт дифузії електронів, k – стала Больцмана, T – температура, $U_{зм}$ – напруга зміщення, φ – контактна різниця потенціалів.

Відповідно, починаючи з $U_{зм} = -0,1-0,2$ В $p-i-n$ ФД мають перевагу в швидкодії. Таким чином, ФД з $p-i-n$ -структурою мають наступні основні переваги:

- 1) Поєднання високої чутливості (при $\lambda \approx 0,9$ мкм практично досягнуто теоретичної межі чутливості $S \approx 0,7$ А/Вт) та високої швидкодії;
- 2) Можливість забезпечення високої чутливості в довгохвильовій області спектра при збільшенні ширини i -області.
- 3) Низька бар'єрна ємність.
- 4) Низькі робочі напруги в фотодіодному режимі, що забезпечує електричну сумісність $p-i-n$ фотодіодів з інтегральними мікросхемами.

До недоліків $p-i-n$ структури слід віднести вимогу високої чистоти та структурної досконалості i -області.

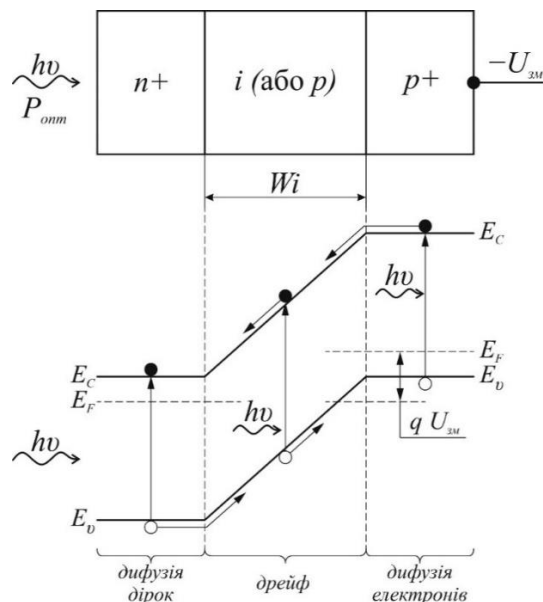


Рис. 1.1. Принцип роботи $p-i-n$ фотодіода: а) схематичний поперечний переріз, б) зональна енергетична діаграма в умовах зворотного зміщення.

1.2. Вибір базового матеріалу структур

Особливу увагу дослідників в останні десятиліття викликають дослідження та виробництво фотопримачів для реєстрації ближнього ІЧ спектрального діапазону випромінювання. Виготовлення досконалих фотодетекторів для даної області довжин хвиль залишається актуальним науково-технічним завданням. Одним із перших питань, які варто вирішити при проектуванні та виробництві фотопримачів є вибір базового напівпровідникового матеріалу. В сьогоденні найчастіше використовують ФП з p - n -переходом на основі сполук A_3B_5 , зокрема GaAs, а також на основі Ge чи Si. Вибір того чи іншого матеріалу залежить в першу чергу від вигляду їх спектральної характеристики чутливості та її максимуму (λ_m). Так, для широкозонного GaAs ($E_g=1,42$ eV), спектральна характеристика зміщується в сторону коротких довжин хвиль, оскільки для створення електронно-діркових пар, а відповідно фотоструму, необхідні фотони з більшою енергією (короткохвильове випромінювання) [9]. Для напівпровідників з малою шириною забороненої зони, наприклад Ge ($E_g=0,66$ eV), спектральна характеристика зміщена у довгохвильову область ($\lambda_m=1,54$ мкм) [10, 11]. У вузькозонних напівпровідниках електронно-діркові пари можуть виникати під дією фотонів з меншою енергією (довгохвильове випромінювання).

Великий вплив на вигляд спектральної характеристики та розміщення максимуму має залежність коефіцієнта поглинання світла від довжини хвилі. Для напівпровідників з різкою залежністю коефіцієнта поглинання від довжини хвилі (Ge) максимум спектральної характеристики для різних типів приладів має місце, як правило, при одній і тій же довжині хвилі незалежно від технології. Для напівпровідників з менш різкою залежністю коефіцієнта поглинання, наприклад Si, максимум спектральної характеристики в залежності від конструкції фотопримача і використовуваної технології може змінюватися в широкому діапазоні від 0,6 мкм аж до краю власного поглинання 1,1 мкм [12].

Порівнюючи можливості матеріалів Si і GaAs, можна побачити що основний

вплив на спектральну характеристику мають відмінності в механізмі поглинання світла. Для GaAs характерний різкий край основної полоси поглинання і слабка залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвиль в інтервалі $\lambda=0,4 - 0,9$ мкм. У зв'язку з цим в ФП на основі GaAs величина фотоструму визначається переважно базою (глибиною залягання *p-n*-переходу) приладу. Тому, змінюючи товщину бази можна змінювати форму спектральної характеристики даних фотодетекторів. В свою чергу для кремнієвих ФП зміщення максимуму спектральної характеристики можна втілювати як зміною товщини бази так і зміною дифузійних довжин не основних носіїв заряду в базі. Зберігаючи сталою товщину бази кремнієвого ФП і змінюючи дифузійну довжину неосновних носіїв заряду або змінюючи напругу зворотного зміщення, можна змінити максимум спектральної кривої як по абсолютному значенню так і по довжині хвилі випромінювання. Описані можливості детектування кремнієвими фотоприймачами довжини хвиль широкого діапазону зумовило його найширше використання для вирішення завдань фотоелектроніки. Окрім вказаного, важливими факторами використання кремнію, як основного матеріалу не лише фотоелектроніки, а й взагалі твердотільної електроніки є його поширеність та висока технологічність [13, 14]. Зокрема, за поширеністю на Землі кремній займає друге місце: близько 27,6 % маси земної кори, біля 17% маси літосфери та біля 7% маси ядра. Зауважимо, що масова частка кремнію у Всесвіті становить менше 0,1% [15].

Вибір базового матеріалу для виготовлення фотоприймачів не обмежується вибором напівпровідника, оскільки існує ще ряд параметрів напівпровідникових злитків чи пластин, які варто враховувати при проектуванні. До таких параметрів відноситься тип провідності, питомий опір (ρ), густина структурних дефектів, час життя неосновних носіїв заряду (τ), кристалографічна орієнтація та ін. [16-18]. Можливість оцінити вимоги параметрів матеріалу, зокрема кремнію, для виготовлення конкретних типів фотодетекторів є важливим та актуальним науково-технічним завданням.

1.3. Утворення n^+ - та p^+ - шарів

ФД з n^+p -структурою у сучасному виробництві виготовляються за дифузійно-планарною технологією [19], визначальною операцією якої є дифузія. Саме дифузією на поверхні кремнієвих пластин формуються фоточутливі елементи (ФЧЕ). При створенні ФЧЕ виникає завдання внесення такої концентрації легуючої домішки, яка б забезпечувала високий рівень фоточутливості при мінімальних значеннях темнових струмів. Адже при легуванні поверхневого n^+ -шару підкладки збільшується його коефіцієнт поглинання, що є негативним явищем, оскільки при виготовленні ФД потрібно забезпечувати максимальне поглинання випромінювання в високоомній p -області підкладки.

Огляд даного питання в наукових джерелах показав, що вплив концентрації легуючої домішки фосфору на параметри $p-i-n$ -ФД не вивчені, а більшість праць присвячено дослідженню кремнієвих сонячних елементів. Так, в [20] розглянуті причини і механізми впливу поверхні на зворотні характеристики $p-n$ структур. Зроблено огляд технологічних методів обробки структур напівпровідникових приладів, у тому числі і методів геттерування, спрямованих на запобігання впливу поверхневих ефектів на електричні параметри приладів. В роботі [21] розглянуто механізми формування темнового струму в $p-i-n$ ФД і принцип дії охоронного кільця. Проаналізовано вплив напруги на охоронному кільці на темновий струм ФЧЕ при різних режимах роботи ОК. Однак детальних даних про вплив легування на характеристики ФД у літературі не відображено.

Якщо зазвичай активні n^+ - області утворюють дифузією домішок елементів V групи (P, As, Sb, Bi) [22, 23], то варіативність утворення омічного p^+ -шару куди ширша: це і епітаксійне вирощування низькоомного шару кремнію [24], і шліфування чи структурування [25], і дифузія акцепторних елементів (атоми III групи B, Al, Ga, In) [26, 27]. Епітаксійне вирощування шару кремнію, шліфування чи структурування тилової сторони підкладки може провокувати зниження коефіцієнта відбивання від Au-дзеркала зі зворотної сторони, яке забезпечує

подвійне проходження випромінювання крізь товщу кристала та збільшення кількості фотогенерованих носіїв заряду [28]. Щодо акцепторних домішок, то широкого використання набула дифузія Бору [29-31]. Власне дифузію бору використовують і як один із методів геттерування кремнієвих підкладок в процесі виготовлення елементів фотоелектроніки [32, 33]. Також в [34] повідомляється про виготовлення високочутливого кремнієвого $p^+ - n - n^+$ -фотодіода, чутливого в діапазоні $\lambda = 200 - 1000$ нм на основі чорного кремнію, де активні області були леговані бором. В [35] описано кремнієві фотодіоди для використання в якості детекторів низькоенергетичних електронів, які були виготовлені з використанням технології чистого бору для формування p^+ -анодної області. В [36] описано технологію УФ лавинного фотодіода на основі кремнієвої $p^+ - in$ структури із нанорозмірним профілем легуванням бору чутливих областей. Зауважимо, що в джерелах переважно описуються випадки виготовлення та дослідження детекторів із фоточутливими областями легованими бором на основі кремнію n -типу, а досліджень впливу дифузії бору в тилкову сторону підкладок p -типу (в якості геттеруючого чи омичного шару), як ізотипної домішки дуже мало, відповідно вплив вказаної операції на параметри фотодетекторів вивчений недостатньо.

1.4. Дефекти в $p-i-n$ -структурах та деградація електрофізичних характеристик кремнію

Електрофізичні параметри кремнію залежать від методів його отримання та подальших технологічних операцій, які використовуються для виготовлення електронних елементів. Основними параметрами Si є питомий опір, час життя, концентрація і рухливість носіїв заряду. Реальні кристали кремнію зазвичай мають структурні дефекти, що утворилися під час росту злитка. Це можуть бути ростові дислокації, точкові дефекти (вакансії, включення), двійники, дефекти упаковки [37-39].

При виготовленні електронних компонентів мікронних і субмікронних

розмірів висуваються найжорсткіші вимоги до структурної досконалості як вихідного напівпровідникового матеріалу, так і використовуваних виробничих операцій і методів виготовлення готових виробів, що мінімізують утворення структурних дефектів. З розвитком електроніки та методів отримання напівпровідникових матеріалів була досягнута можливість вирощування бездислокаційного монокристалічного Si, що виключає можливу наявність вищезгаданих дефектів [40]. Але на відміну від ростових дефектів, існують також технологічно внесені дефекти: дислокації, що утворюються при термічних операціях, окислювальні дефекти пакування, домішки металів тощо [41]. Ці дефекти негативно впливають на параметри базового матеріалу, що необхідно враховувати при моделюванні або розрахунку кінцевих параметрів приладів.

Постійно зростаючі вимоги до надійності параметрів кремнієвих структур вимагають використання не лише нових технологій, але й подальшого експериментального та теоретичного вивчення процесів дефектоутворення. Такі дослідження потрібні, зокрема, для підвищення надійності та стабільності параметрів кремнієвих фотоприймачів [42].

Специфіка дослідження процесів дефектоутворення та їх впливу на параметри кремнієвих $p-i-n$ фотоприймачів полягає в тому, що в $p-i-n$ ФД, на відміну $p-n$ ФД, присутня високоомна i -область, в якій відбуваються процеси рекомбінації-генерації носіїв заряду. З одного боку, наявність i -області призводить до покращення коефіцієнта інжекції в $p-i-n$ -структурі, з іншого боку, наявність підвищеної концентрації дефектів в високоомній області сприяє виникненню додаткових центрів рекомбінації-генерації, внаслідок чого змінюються і погіршуються фотоелектричні параметри. Крім того, необхідність створення неглибокого $p-n$ переходу в n^+-p-p^+ -структурі породжує проблему легування дуже тонкого приповерхневого шару кремнію, який може генерувати значні механічні напруження або високу густину дефектів [43]. Через наявність дефектної структури у вигляді кластерів структурних дефектів або дислокацій, як в i -області, так і в поверхневих n^+ - або p^+ -шарах, в забороненій зоні з'являються глибокі рівні, що

провокують погіршення фотоелектричних параметрів ФП [44]. Відповідно, забезпечення структурної досконалості як високоомної так і низькоомних областей $n^+ - p - p^+$ структур є одним із ключових факторів отримання надійних високочутливих ФД.

Зауважимо, що реальні кристали кремнію зазвичай мають структурні дефекти, що утворилися як під час росту злитка так і під час подальших технологічних операцій. Але крім кристалографічних дефектів, негативний вплив на фотоелектричні властивості кремнієвих структур мають із неконтрольовані домішки, які провокують деградацію електрофізичних характеристик базового матеріалу. При огляді літературних джерел було виявлено, що питанню деградації електрофізичних параметрів напівпровідникових матеріалів присвячено багато робіт. Так, в роботі [45] показано, що газова фаза є потенційним джерелом забруднення кремнію, яке може викликати деградацію часу життя носіїв заряду внаслідок зворотної дифузії сегрегованих металів на поверхні пластин. Крім Fe, значні кількості Co і Ni потрапляють в матеріал, які дифундують вглиб, впливаючи на якість матеріалу.

Результати чітко показують, що в кремній потрапляють забруднення, які походять як з печі, так і з газів-носіїв. У [46] зазначено, що уникнення забруднення кремнію для сонячних елементів під час високотемпературної обробки є ключовим питанням. Тут показано, що взаємодія з газовою фазою є потенційним джерелом забруднення. Термодинамічні розрахунки, виконані для діапазону температур від 373 К до 1873 К і загального тиску 10 кПа, передбачають утворення летких речовин, які є шкідливими для фотоелектричних властивостей. В роботі [47] встановлено, що після високотемпературної обробки (1473°C) трансмутаційно легованих кристалів кремнію n -типу протягом 2 годин зі швидкістю охолодження 15 К/хв, а також протягом 72 годин і з усіма дослідженими швидкостями охолодження (1, 15 і 1000 К/хв) в їхньому об'ємі відбувається генерація глибоких донорних центрів. Встановлено також, що швидкість охолодження після відпалу також суттєво впливає на деградацію параметрів матеріалу. Відомо також [48], що

термічні удари під час термообробки сприяють утворенню дефектів у підкладках і деградації p і n .

Мінімізація впливу описаних факторів на погіршення електрофізичних характеристик кремнію потребує розробки різноманітних фізико-технічних підходів до виготовлення ФП на основі принципів геттерування.

1.5. Проблеми ізолювання активних елементів багатoeлементних фотодіодів

Важливим завданням сучасної фотоелектроніки є визначення координат об'єктів у просторі. Зазвичай в системах визначення координат використовують багатoeлементні координатні фотодіоди. Координатний ФД зазвичай являє собою дво- або чотириелементний фотодіод на одній напівпровідниковій пластині, в якому чутливі елементи розділені проміжками, меншими, ніж розмір світлового зонда [49]. Для забезпечення високої чутливості фотоприймачів використовується високоомний матеріал. Відомо, що при виготовленні багатoeлементних кремнієвих ФД можливе зменшення опору ізоляції ФЧЕ, а у випадку виробництва ФД із охоронним кільцем - зменшення опору ізоляції опору ізоляції між ОК і ФЧЕ [50]. Це може провокувати зростання темнових струмів активних елементів і коефіцієнта фотозв'язку між елементами.

Погіршення опору ізоляції при використанні високоомного p -кремнію є наслідком утворення провідних інверсійних каналів n -типу [51, 52] на межі розділу Si-SiO₂, відповідно, наявність цих каналів сприяє погіршенню параметрів ФД. При огляді літературних джерел виявлено, що більшість робіт присвячено методам ізоляції інтегральних схем (ІС). Так, методи ізоляції елементів ІС дозволяють виготовляти пристрої на провідних і непровідних підкладках. На провідній підкладці ізоляція елементів ІС здійснюється за допомогою p - n -переходу і тонкої діелектричної плівки, а на непровідній - ізоляцією з повітряними проміжками та діелектричними матеріалами [53]. Зокрема, в роботі [54] описано принципи ізоляції

активних елементів ІС ізопланарним та епіпланарним методами.

Одним з нових методів ізоляції є технологія IPOS - ізоляція окисленим пористим кремнієм. У цьому технологічному методі можна виділити два основні процеси. Перший - це селективне анодне розчинення кремнію у фтористоводневій кислоті, при якому в обробленій зоні утворюється пористий кремній. Другий - термічна обробка в окислювальному середовищі, при якій пористий кремній окислюється з високою швидкістю завдяки наявності пор і сильно розвиненої поверхні. В результаті такої селективної обробки утворюються кремнієві ділянки, ізольовані з боків діоксидом кремнію. При цьому, на відміну від ізопланарної технології, в даному випадку виключається необхідність тривалого високотемпературного окислення [55]. Існують також методи ізоляції елементів ІС з використанням витравлених канавок на поверхні підкладок. Зокрема, ізоляція з використанням V-подібних канавок, заповнених полікристалічним кремнієм (VIP-метод, VIP-V-brave isolation polysilicon). Метод заснований на вертикальному анізотропному травленні кремнієвих підкладок з утворенням V-подібних канавок, заповнених полікристалічним кремнієм. V-ATE - технологія (V-ATE - vertical anisotropic etch) є варіантом методу комбінованого ізолювання компонентів, в якому розділювальні доріжки не заповнюються діоксидом кремнію або іншими ізолюючими матеріалами [56].

Щодо багатоелементних ФД, відомо, що часто фотодіодні матриці або власне багатоелементні фотоприймачі виготовляють у вигляді мезаструктур [57, 58]. Класичні планарні структури зазвичай ізолюють плівками оксиду кремнію, сформованими в єдиному технологічному процесі з дифузією акцепторів чи донорів або плівок нітриду кремнію [52, 59]. А, в роботах [60, 61] показано деяке збільшення міжквadrантного опору ізоляції (деградованої в результаті рентгенівського опромінення) після опромінення електронами або гамма-випромінюванням, відповідно. Однак інформації про оптимальні варіанти ізоляції ФЧЕ багатоелементних фотодіодів не знайдено.

Висновки до першого розділу

Фотоприймачі на основі n^+p-p^+ - структур, в яких i -область розміщена між двома n^+ - та p^+ -областями та має питомий опір в 10^6 - 10^9 разів більше, ніж питомий опір легованих областей, являють собою клас $p-i-n$ ФД, які знайшли широке використання в системах астронавігації літальних апаратів, а також в спеціальній техніці і кіно- фототехніці. ФД з $p-i-n$ -структурою мають наступні основні переваги над $p-n$ ФД:

1. Поєднання високої чутливості (при $\lambda \approx 0,9$ мкм практично досягнуто теоретичної межі чутливості $S \approx 0,7$ А/Вт) та високої швидкодії;
2. Можливість забезпечення високої чутливості в довгохвильовій області спектра при збільшенні ширини i -області.
3. Низька бар'єрна ємність.
4. Низькі робочі напруги в фотодіодному режимі, що забезпечує електричну сумісність $p-i-n$ фотодіодів з інтегральними мікросхемами.

До недоліків $p-i-n$ структури слід віднести технологічні складнощі забезпечення високої чистоти та структурної досконалості i -області. Також використання високоомного кремнію може провокувати утворення інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂, що вимагає контролю опору ізоляції активних елементів.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРЕМНІЄВИХ $n^+p\text{-}p^+$ - СТРУКТУР ТА ФОТОПРИЙМАЧІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Поява нових і вдосконалених джерел монохроматичного випромінювання, модульованого частотами в сотні і тисячі мегагерц, а також нових типів фотоелектричних напівпровідникових приладів здатних перетворювати оптичний сигнал в електричний, уможливила реалізацію багатьох завдань опто- та фотоелектроніки.

В останні десятиліття особливу увагу дослідники приділяють розробці, виготовленню та дослідженню фотоприймачів для ближнього інфрачервоного спектрального діапазону на основі високоомних $n^+p\text{-}p^+$ - структур. Виготовлення досконалих фотоприймачів для цієї області довжин хвиль залишається актуальним науково-технічним завданням. Дослідження фізико-технічних аспектів виготовлення фотоприймачів на основі $n^+p\text{-}p^+$ - структур та їх фотоелектричних властивостей є запорукою отримання високочутливих оптичних детекторів.

2.1. Вплив електрофізичних характеристик базового матеріалу на фотоелектричні властивості $n^+p\text{-}p^+$ - структур та фотоприймачів на їх основі

2.1.1. Виготовлення фоточутливих структур на основі кремнію з різними електрофізичними характеристиками

Дослідження проводились на прикладі кремнієвих чотириквadrантних $p\text{-}i\text{-}n$ фоточутливих структур із охоронним кільцем (ОК) (Рис. 2.1), призначених для детектування випромінювання з довжиною хвилі $\lambda=1,05$ мкм. Для порівняння було обрано два різні матеріали з різними електрофізичними параметрами. Перший матеріал - монокристалічний бездислокаційний FZ-Si p -типу з орієнтацією [111], питомим опором $\rho \approx 16\text{-}20$ кОм·см і часом життя неосновних носіїв заряду $\tau \approx 1,1\text{-}1,3$ мс ($\Phi D_{[111]}$). Іншим матеріалом був монокристалічний бездислокаційний FZ-Si p -типу з орієнтацією [100], питомим опором $\rho \approx 45\text{-}55$ кОм·см і часом життя неосновних носіїв заряду $\tau \approx 2,2\text{-}2,4$ мс ($\Phi D_{[100]}$).

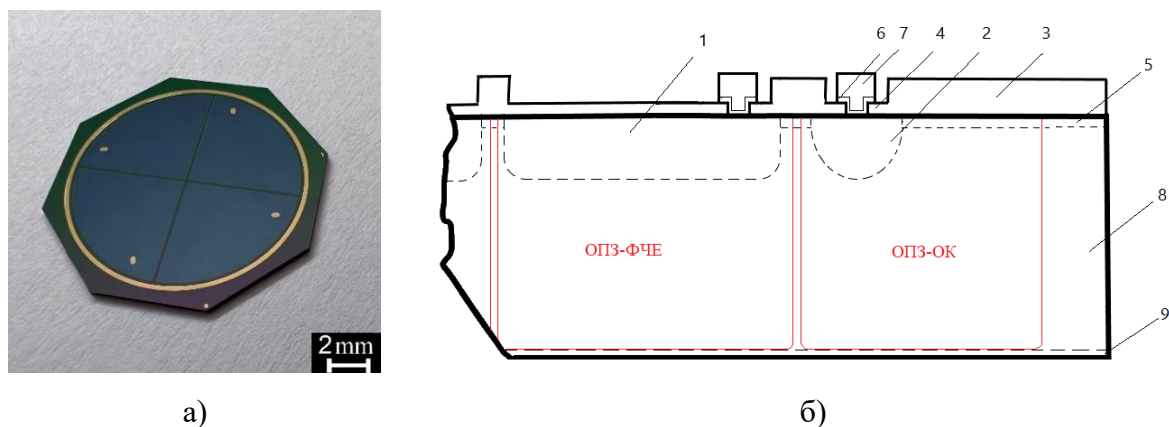


Рис. 2.1. Кристал кремнієвого чотирьохквартанного $p-i-n$ ФД (а) та його схематичний переріз (б): 1 – n^+ -ФЧЕ; 2 – n^+ -ОК; 3 – маскуєчий SiO_2 ; 4 – просвітлюєчий SiO_2 ; 5 – n^+ -інверсійний шар; 6 – підшар хрому; 7 – контактна площадка- Au ; 8 – підкладка $p\text{-Si}$; 9 – омічний $p^+\text{-Si}$.

Прилади були виготовлені за дифузійно-планарною технологією [62] в єдиному технологічному циклі за однакових режимів. Технологічний маршрут виготовлення фоточутливих кристалів складався з комплексу чотирьох термічних: окиснення напівпровідникових підкладок за принципом «сухе-вологе-сухе» (Рис. 2.2а); двостадійної дифузії фосфору в фронтальну сторону підкладки (Рис. 2.2б, в); та дифузії бору в тилу сторону підкладки (Рис. 2.2г), та утворення металізації (Рис. 2.2д). Товщина кінцевих кристалів ФД сягала 390-400 мкм.

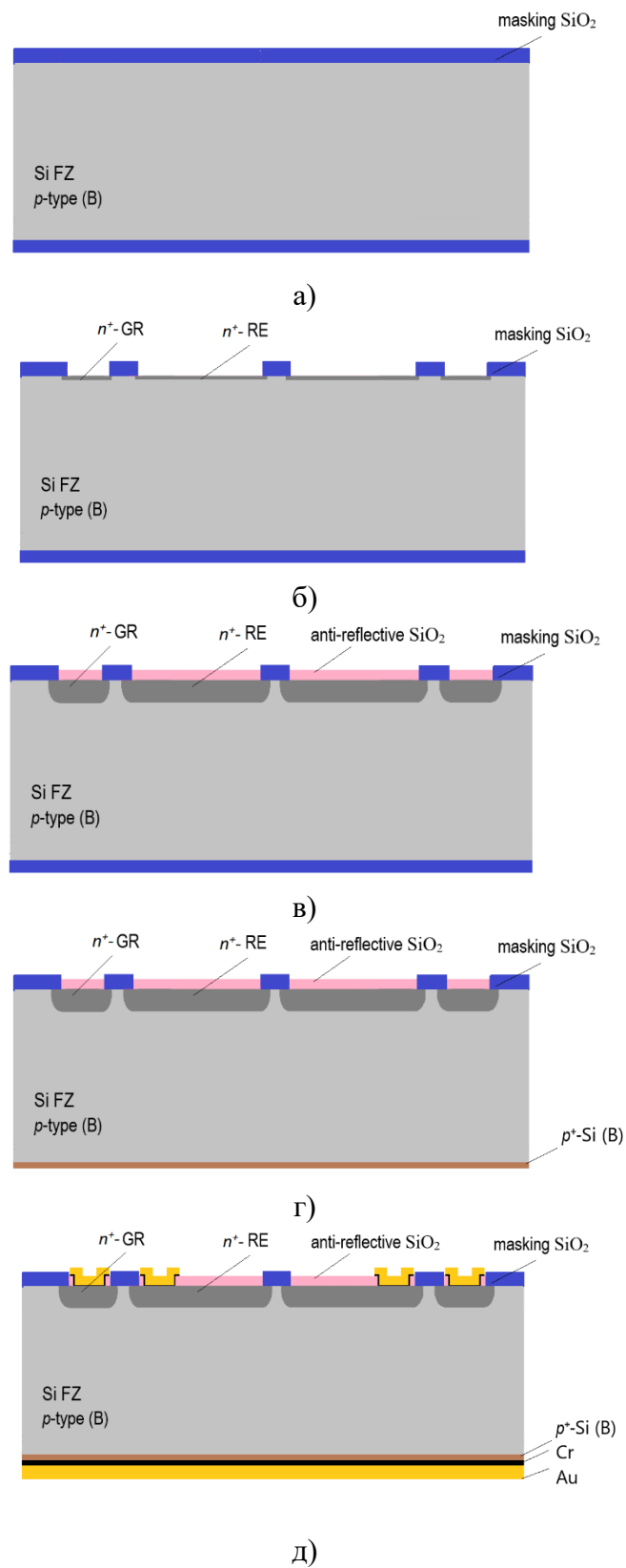


Рис. 2.2. Схематичний переріз кристала ФД після різних технологічних операцій: а) окислення, б) загонка фосфору, в) розгонка фосфору, г) дифузія бору, в) нанесення металізації.

2.1.2. Методики вимірювань

Після окиснення і кожної наступної термічної операції вимірювали високочастотні вольт-фарадні (C - V) характеристики структур метал-оксид-напівпровідник (МДН) при частоті 30 кГц та діаметром зонда 1 мм, для оцінки наявності інверсійних шарів на межі розділу Si-SiO₂, що дозволяло спрогнозувати кінцеві параметри виробів.

Важливим параметром багатоелементних ФП з ОК є опір ізоляції ФЧЕ та ОК ($R_{3\phi}$), зменшення якого призводить до збільшення коефіцієнта фотозв'язку ($K_{\phi.3\phi}$) і темнових струмів [50]. Цей параметр кількісно характеризує наявність інверсійних провідних шарів, але, на відміну від C - V характеристик, вимірювати $R_{3\phi}$ проводиться лише після формування активних елементів або на завершальних етапах виготовлення ФД. Визначення $R_{3\phi}$ проводили згідно еквівалентної електричної схеми, наведеної на Рис. 2.3. (яка фактично є дільником напруги [63]) при напрузі зворотного зміщення $U_{зм}=2$ В і опорі навантаження $R_n=10$ кОм. $R_{3\phi}$ розраховувався згідно формули (2.1).

$$R_{3\phi} = \left(\frac{U_{зм}}{U_n} - 1 \right) R_n \quad (2.1)$$

де U_n – спад напруги на резисторі R_n .

Зауважимо, що на практиці частіше використовують суму опорів ізоляції всіх ФЧЕ та ОК ($\sum R_{3\phi}$) (у випадку багатоелементних чи квадрантних ФД).

Темновий струм (I_m) та вольт-амперні характеристики (ВАХ) ФД вимірювали за допомогою програмно-апаратного комплексу, реалізованого на базі платформи Arduino, цифрового мультиметра Agilent 34410A та програмованого джерела живлення Siglent SPD3303X, керованого персональним комп'ютером за допомогою програмного забезпечення в середовищі LabView.

Моніторинг струмової монохроматичної імпульсної чутливості ($S_{имп.}$) проводився методом порівняння чутливості досліджуваного ФП з еталонним фотодіодом. Вимірювання проводили при освітленні ФД потоком випромінювання потужністю не більше $1 \cdot 10^{-3}$ Вт, при напругах зворотного зміщення $U_{зм}=2-120$ В і тривалості імпульсу $\tau_i=500$ нс. Також отримано спектральні характеристики

чутливості фотодіода ($S(\lambda)$) при різних напругах зміщення. Вимірювання проводили за допомогою автоматизованого спектрального комплексу КСВУ-23.

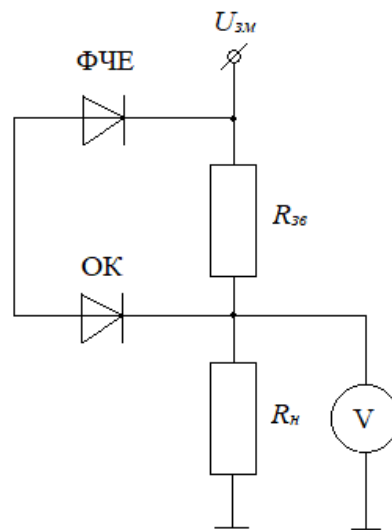


Рис. 2.3. Еквівалентна схема для вимірювання R_{36} .

2.1.3. Дослідження C - V характеристик та опору ізоляції між активними елементами структур

Після термічного окислення та наступних термообробок кремнієві підкладки з меншим питомим опором ($\Phi\text{Д}_{[111]}$) мали класичну C - V характеристику для матеріалу для кремнієвої МДН структури p -типу (Рис. 2.4, крива 1). Що стосується підкладок з більшим питомим опором ($\Phi\text{Д}_{[100]}$), то після першої термообробки спостерігалася незначна інверсія C - V характеристики (Рис. 2.4, крива 3). Після кінцевої термічної операції - дифузії бору спостерігається інверсія C - V характеристики (Рис. 2.4, крива 2).

Інверсія C - V характеристик свідчить про наявність інверсійних шарів на межі поділу Si-SiO_2 (Рис. 2.5). Технологічними причинами появи інверсійних шарів можуть бути неправильна хімічна обробка підкладок, наявність домішок лужних металів у деіонізованій воді, кварцовому посуді або кварцовому реакторі та газах-носіях.

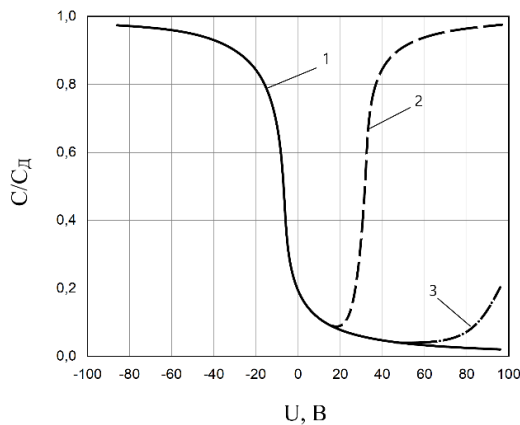


Рис. 2.4. C - V характеристики ФД: 1 - характеристика ФД_[111]; 2 - характеристика ФД_[100] після дифузії бору; 3 - характеристика ФД_[100] після першого термічного окислення.

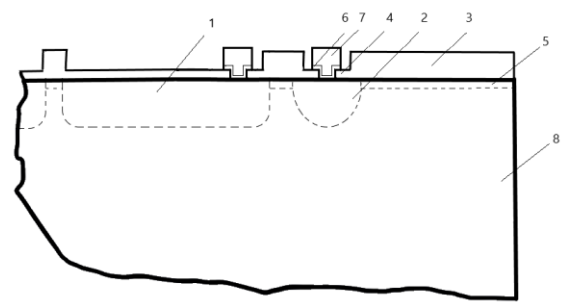


Рис. 2.5. Схематичний розріз частини кристалу ФД інверсійним шаром: 1 - n^+ -ФЧЕ; 2 - n^+ -ОК; 3 - маскувальний SiO_2 ; 4 - просвітлюючий SiO_2 ; 5 – інверсійний n -шар; 6 – адгезійний підшар Cr; 7 - контактна поверхня Au; 8 - підкладка p -Si.

Іншим механізмом утворення провідних інверсійних каналів на межі розділу Si-SiO_2 є перерозподіл домішок в маскуючому оксиді (в тому числі фосфору) та їх дифузія до межі розділу двох фаз під час термічних операцій, відповідно, при збільшенні загальної тривалості термічних операцій можливе легування домішок поверхні кремнію через маскуючий SiO_2 [64]. Тому при формуванні маскувальних покриттів необхідно враховувати не тільки товщину оксиду, який маскує кремній від легування під час власне операції дифузії (загонки), але й товщину, яка буде маскувати під час наступних термічних обробок.

Так, згідно з [65], товщина оксиду кремнію близько 0,3 мкм повністю маскує кремній під час дифузії фосфору тривалістю 30 хвилин при $T = 1323 \text{ K}$, але враховуючи, що за операцією загонки слідує високотемпературна операція розгонки фосфору і дифузія бору, відповідно, для врахування цієї тривалості термічних операцій слід використовувати товщину маскувального покриття

0,6 - 0,7 мкм. Ще одним механізмом формування інверсійних шарів є дифузія бору з *p*-кремнію в SiO₂ під час термообробки внаслідок того, що коефіцієнт сегрегації бору є меншим за одиницю [66]. Відповідно, зі збільшенням тривалості термообробки зростає ступінь збіднення поверхні кремнію бором і спостерігається інверсійний тип поверхневої провідності. Зауважимо, що згідно з [64], інверсійні шари на поверхні кремнію *p*-типу присутні вже при $\rho=1-10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Параметром, який є яскравою кількісною характеристикою наявності провідних інверсійних каналів на межі розділу Si-SiO₂, є R_{36} . Вимірювання опору ізоляції активних елементів показали, що зразки ФД_[111] мають $R_{36}\approx 3,9-5,5 \text{ МОм}$, а зразки ФД_[100] - $R_{36}\approx 0,7-1,1 \text{ МОм}$. Із описаного можна зробити висновок, що кремній з вищим питомим опором більш схильний до утворення інверсійних шарів, оскільки в цьому випадку для зміни поверхневої провідності на протилежну необхідна менша кількість домішки, на відміну від матеріалу з меншим питомим опором.

2.1.4. Дослідження темнових струмів та бар'єрної ємності структур

З темнових ВАХ (Рис. 2.6) можна побачити, що темновий струм ФД_[100] сягав дещо менших значень, ніж I_m ФД_[111] (при напругах вище напруги насичення), оскільки в ФД_[100] початковий час життя неосновних носіїв заряду кремнію вищий, а об'ємна генераційна складова темнового струму ($I_m^{ген.}$), яка фактично визначає темновий струм ФД, обернено пропорційна до τ [37]:

$$I_{т.}^{ген.} = e \frac{n_i}{2\tau} W_i A_{ФЧЕ} \quad (2.2)$$

де n_i - власна концентрація носіїв заряду в підкладці; e - заряд електрона; $A_{ФЧЕ}$ - ефективна площа ФЧЕ; W_i - ширина області просторового заряду (ОПЗ). Варто також відзначити, що крива ВАХ ФД_[100] досягає насичення при $U_{зм}=-10-15 \text{ В}$, на відміну від кривої ВАХ ФД_[111], яка досягає насичення при $U_{зм}=-70-80 \text{ В}$. Це можна пояснити тим, що ОПЗ ФД_[100] розтягується на всю

високоомну товщу підкладки (не враховуючи дифузійної довжини неосновних носіїв заряду) при менших напругах зворотного зміщення, оскільки матеріал ФД_[100] має значно більший питомий опір, а значення W_i обернено пропорційне концентрації акцепторів (2.3) [36] в підкладці (N_A), яка в свою чергу обернено пропорційна до ρ [65]. Відповідно можна вважати, що $W_i \sim \rho$.

$$W_i = \left(\frac{2\epsilon\epsilon_0 (\phi_K - U_{3M})}{eN_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

де ϵ , ϵ_0 - діелектричні проникності для кремнію і вакууму відповідно; ϕ_K - контактна різниця потенціалів.

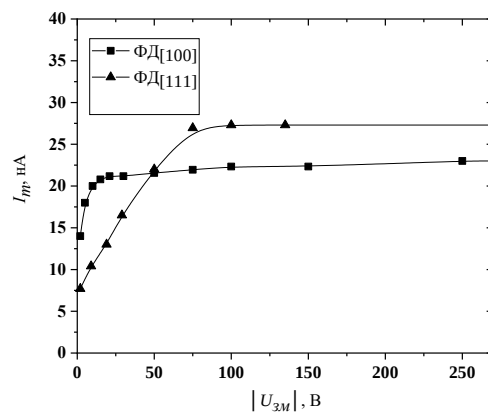


Рис. 2.6. ВАХ ФД_[100] та ФД_[111]

Також досліджено значення темнових струмів захисних кілець (I_{OK}). Виявилося, що темновий струм захисного кільця ФД_[100] значно вищий, ніж у ФД_[111]. При $U_{3M} = -120$ В $I_{OK} = 40-60$ мкА в ФД_[100] і $I_{OK} = 0,5-3$ мкА в ФД_[111]. Збільшення струмів ОК у випадку ФД_[100] спричинене наявністю інверсійних шарів на межі розділу фаз Si-SiO₂ в області периферії кристалу, що провокує зростання темнових струмів при розширенні ОПЗ ОК зі збільшенням напруги зворотного зміщення в сторону периферії. Також зазначимо, що ОПЗ охоронного кільця ФД_[100] при однаковій U_{3M} значно більше, ніж ОПЗ ОК ФД_[111] внаслідок значної різниці питомого опору.

Зауважимо, що бар'єрна ємність ($C_{ФЧЕ}$) ФД_[100] сягала менших значень, ніж в ФД_[111] (Рис. 2.7):

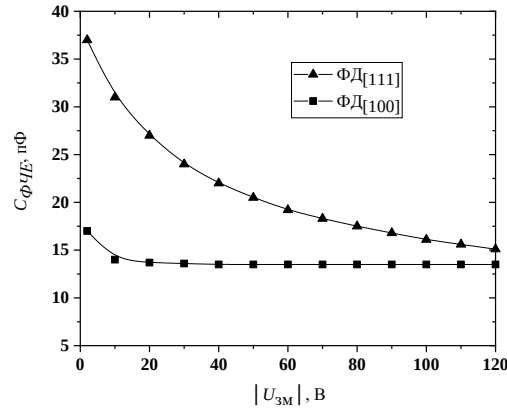


Рис. 2.7. Графік залежності бар'єрної ємності ФД від напруги зворотного зміщення.

Бар'єрна ємність ФД залежить від питомого опору базового матеріалу чи концентрації акцепторів в i -області (2.4) [66]. Відповідно при збільшенні питомого опору кремнію ємність зменшується, а в випадку розширення ОПЗ до максимального значення, подальше збільшення $C_{ФЧЕ}$ при зростанні зворотного зміщення не відбувається, що можна побачити при розгляді кривої $C_{ФЧЕ}(U_{зм})$ ФД_[100].

$$C_{ФЧЕ} = A_{ФЧЕ} \left(\frac{\varepsilon \varepsilon_0 e N_A}{2(\phi_K - U_{зм})} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

2.1.5. Дослідження чутливості структур

Отримано графік $S_{имп}(U_{зм})$ для обох варіантів фотодіодів (Рис. 2.8). З Рис. 2.8 видно, що крива залежності $S_{имп}(U_{зм})$ для ФД_[100] досягає насичення швидше (при $U_{зм} = -7-9 \text{ В}$), ніж крива для ФД_[111] (при $U_{зм} = -70-80 \text{ В}$). Це пов'язано з тим, що в ФД_[100], як згадувалося вище, ОПЗ розтягується до максимальної ширини при менших напругах зворотного зміщення, відповідно, коефіцієнт збирання носіїв заряду (γ), який залежить від W_i , досягає насичення також при менших $U_{зм}$, а чутливість, будучи прямо пропорційною коефіцієнту збирання носіїв заряду, також досягає насичення при менших напругах зміщення [11]:

$$S_{\lambda} = (1 - R) T Q_E \gamma \frac{\lambda}{1.24} \quad (2.5)$$

де R – коефіцієнт відбиття від поверхні ФД, T – коефіцієнт пропускання вхідного вікна чи світлофільтра; Q_E – внутрішній квантовий вихід ФД; γ – коефіцієнт збирання носіїв заряду p - n переходом.

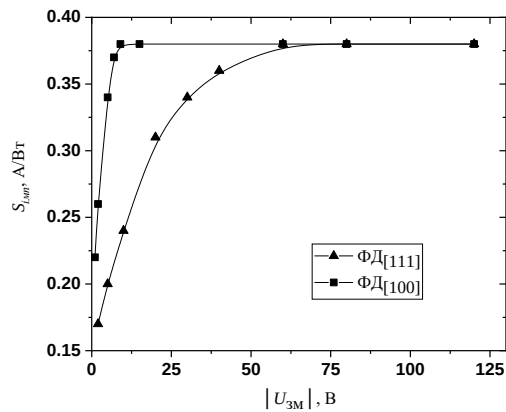
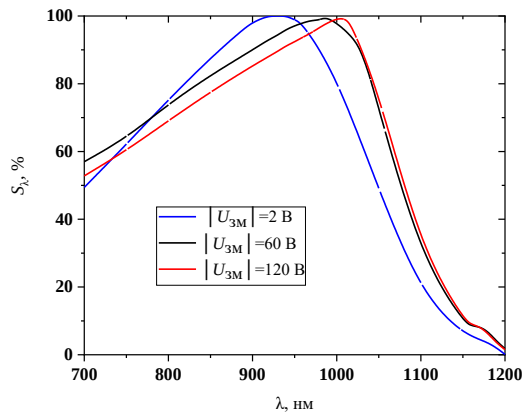


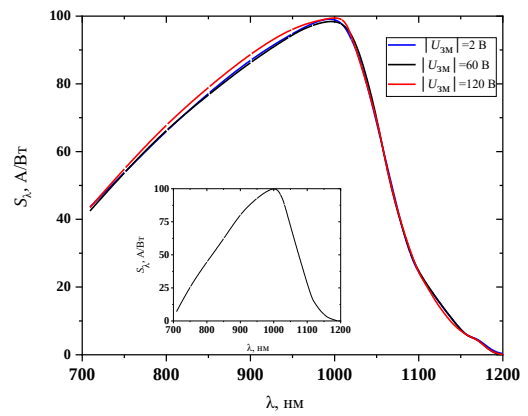
Рис 2.8. Залежність $S_{нм}(U_{зм})$ ФД_[100] та ФД_[111].

Також отримано спектральні характеристики чутливості фотодіодів (Рис. 2.9). З Рис. 2.9а видно, що максимум спектральної характеристики (S_m) ФД_[111] зміщується в бік більших довжин хвиль зі збільшенням модулю напруги зсуву. Це спричинено розширенням ОПЗ зі збільшенням модулю зворотної напруги, і коли W_i досягає насичення, подальшого зсуву максимуму не відбувається. У випадку ФД_[100] спостерігається інша картина (Рис. 2.9б): навіть при низьких напругах зміщення максимум характеристики знаходиться на своєму максимальному значенні довжин хвиль і не зміщується зі збільшенням модулю напруги через велику дифузійну довжину неосновних носіїв заряду і максимальний коефіцієнт збирання носіїв заряду навіть при двох вольтах.

Варто зазначити, що на Рис. 2.9а і 2.9б короткохвильова чутливість відрізняється. Наприклад, при $\lambda = 700 \text{ нм}$ $S_\lambda = 0,5S_m - 0,6S_m$ для ФД_[111], а для ФД_[100] $S_\lambda = 0,4S_m$. Зміну короткохвильової чутливості і зміщення короткохвильового мінімуму спектральної характеристики можна пояснити зміною глибини залягання n^+ - p переходу (x_{n^+-p}).



а)



б)

Рис. 2.9. Спектральні характеристики чутливості фотодіодів: а) ФД_[111]; б) ФД_[100]; вставка на рисунку (б) - спектральна характеристика ФД_[100] з короткохвильовим мінімумом близько $\lambda = 700$ нм.

Дійсно, при вимірюванні x_{n+p} було видно, що в ФД_[111] $x_{n+p} = 4-4,2$ мкм, а в ФД_[100] $x_{n+p} = 5,8-6$ мкм. Відповідно, зі зменшенням глибини залягання n^+ - p переходу, можливість фотогенерації носіїв заряду в ОПЗ короткими довжинами хвиль зростає та зростає короткохвильова чутливість. Випромінювання із $\lambda \leq 400$ нм поглинається в n^+ -шарі, а фотогенеровані в дифузійному шарі носії швидко рекомбінують не досягнувши p - n переходу. Відповідно вигляд спектральної характеристики ФД та короткохвильовий мінімум визначається в т. ч. і глибиною залягання n^+ -шару, оскільки в p - i - n ФД формування фотоструму відбувається внаслідок генерації носіїв заряду в високоомній p -області. А у випадку ФД_[100] більший діапазон довжин хвиль поглинається n^+ -областю через більшу глибину p - n переходу. Зокрема, в деяких зразках типу ФД_[100] спостерігався зсув короткохвильового мінімуму спектральної характеристики до 700 нм (Рис.2.9б-вставка). Зауважимо, що різна глибина дифузійного шару в обох випадках може бути зумовлена різницею в коефіцієнтах дифузії фосфору для різних кристалографічних орієнтацій.

2.1.6. Дослідження швидкості росту SiO_2 на поверхні різних типів кремнію

Під час операції розгонка фосфору на поверхні ФЧЕ вирощується просвітлюючий SiO_2 в атмосфері сухого кисню при $T=1453\text{ K}$, який відповідає умові мінімуму відбивання (2.6) [67]:

$$\frac{\lambda}{4} = Nd_{\text{SiO}_2} \quad (2.6)$$

де N - показник заломлення SiO_2 ; d_{SiO_2} - товщина просвітлюючої плівки.

Для робочої довжини хвилі описаних ФД противідбиваючий оксид повинен мати $d_{\text{SiO}_2} \approx 0,17-0,2$ мкм [68]. При дослідженні товщини вирощеного оксиду в двох досліджуваних варіантах фотодіодів було виявлено, що товщина SiO_2 в ФД_[111] сягає $d_{\text{SiO}_2} \approx 0,183$ мкм, а в ФД_[100] - $d_{\text{SiO}_2} \approx 0,17$ мкм. Імовірно, різна швидкість росту оксидної плівки зумовлена різною поверхневою концентрацією атомів кремнію ($n_{(000)}$) для різних кристалографічних орієнтацій, оскільки, можна припустити, що швидкість росту зростатиме зі збільшенням поверхневої концентрації атомів. Щоб перевірити це, було розраховано поверхневу концентрацію атомів кремнію для різних кристалографічних орієнтацій. Поверхневу концентрацію атомів різних кристалографічних площин кремнію можна візуально оцінити з Рис. 2.10а.

Поверхнева концентрація (кількість атомів на одиницю площі) атомів розраховується за формулою [69]:

$$n_{(000)} = \frac{N_a}{S} \quad (2.7)$$

де N_a - кількість атомів, які повністю містяться в елементарній комірці двовимірної поверхневої решітки; S - площа елементарної комірки.

Розрахуємо значення кількості атомів на одиницю площі для площини (100). Площина (100) в структурі алмазу - це двовимірна квадратна решітка з атомами Si у вузлах. Сторона квадрата (елементарна комірка двовимірної решітки) дорівнює половині діагоналі грані (рис. 2.10б). Елементарна комірка решітки містить один атом, оскільки $1/4$ атомів від кожного з чотирьох атомів

у вершинах квадрата потрапляє в елементарну комірку. Отже, кількість атомів на одиницю площі площини (100) становитиме:

$$n_{(100)} = \frac{1}{(a\sqrt{2}/2)^2} = 6.78 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \quad (2.8)$$

де a - період кристалічної ґратки кремнію.

Для площини (111) двовимірна решітка є гексагональною (структура графену). Елементарною коміркою є ромб з довжиною сторони a (кут 60°), що містить два атоми Si (Рис. 2.10б). Таким чином, кількість атомів на одиницю площі площини (111) становитиме:

$$n_{(111)} = \frac{1}{a^2\sqrt{3}/2} = 7.83 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \quad (2.9)$$

Для наочності також показано поверхневу густину атомів кремнію для площини (110). У випадку площини (110) двовимірна решітка - це прямокутна решітка, що містить два атоми в елементарній комірці (Рис. 2.10б). Елементарна комірка решітки - це прямокутник, більша сторона якого дорівнює постійній решітки, а інша сторона дорівнює половині діагоналі грані елементарного куба структури. Таким чином, кількість атомів на одиницю площі площини (110) становитиме:

$$n_{(110)} = \frac{1}{a^2\sqrt{2}/2} = 9.59 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \quad (2.10)$$

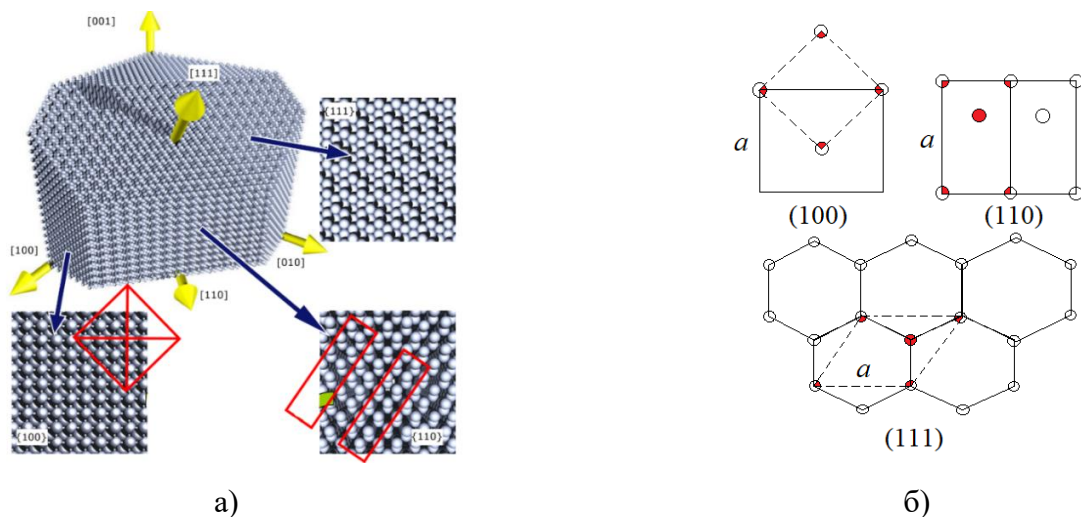


Рис. 2.10. Схематичне зображення густини атомів кремнію, притаманної різним кристалографічним площинам: а) схематичне зображення злитка; б) кількість атомів в елементарних комірках.

Як видно з розрахунків, поверхнева густина атомів кремнію для різних кристалографічних площин різна, відповідно, зі збільшенням густини атомів зростає швидкість росту оксидної плівки. Від товщини вирощеного оксиду залежить коефіцієнт відбивання випромінювання та фоточутливість ФД (2.5).

2.2. Вплив концентрації фосфору в n^+ -шарі на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+-p-p^+ - структур та фотоприймачів на їх основі

2.2.1 Виготовлення n^+-p-p^+ -структур з різною концентрацією фосфору та дослідження легованих шарів

Для досліджень використовувався монокристалічний кремній p -типу, кристалографічної орієнтації [111] та питомим опором $\rho \approx 18$ кОм·см, що відповідає концентрації акцепторів $N_A \approx 7,7 \cdot 10^{11}$ см⁻³. ФД виготовлялись за дифузійно-планарною технологією (Пункт 2.1.1) при використанні двостадійної дифузії фосфору з планарних твердотільних джерел фосфору (Рис. 2.11) для створення ФЧЕ та ОК n^+ -типу провідності. Спочатку проводили загонку – коротку дифузію із необмеженого джерела при $T=1353$ К в атмосфері азоту, отримуючи в підкладці тонкий дифузійний шар. Далі проводили розгонку при $T=1453$ К в атмосфері сухого кисню, при цьому дифузійний шар являвся джерелом з обмеженою кількістю домішки. Після кожної із вказаних операцій проводився контроль поверхневого опору чотиризондовим методом (R_S). Змінюючи час загонки отримували різні значення R_S . Тривалість розгонки завжди була однаковою для вирощування однакової товщини SiO₂ та отримання однакової глибини $p-n$ переходу.

Кремнієві пластини окиснювали в єдиному технологічному процесі, далі серія поділялась на підсерії і проводилась загонка фосфору з різною тривалістю, після чого єдина розгонка та дифузія бору. Вимірювання поверхневого опору проводилось 4-зондовим методом [70]. Значення R_S отриманих зразків наведено в Табл. 2.1.

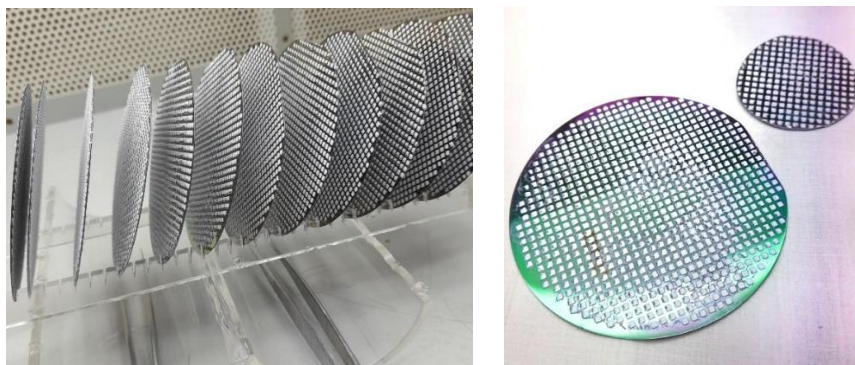


Рис. 2.11. Твердотільні планарні джерела фосфору

Таблиця 2.1

Значення поверхневого опору отриманих ФД при різній тривалості загонки.

t , с – час загонки	R_s , Ом/□ – після загонки	R_s , Ом/□ – після розгонки
300	12,7	8,1
600	8,4	5,0
1200	5,4	3,3
1800	4,1	2,7
2400	3,7	2,4
3000	3,3	2,2
3600	3,1	1,9

Під час загонки фосфору на поверхні підкладок утворюється фосфоросилікатне скло (ФСС). Зауважимо, що різній концентрації фосфору відповідає ФСС різних відтінків внаслідок відмінності в товщині (Табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Оціночна таблиця залежності кольорів ФСС від поверхневого опору

Колір ФСС	R_s , Ом/□
Голубий	3,0-3,2
Синій	3,2-3,5
Синьо-фіолетовий	3,5-3,7
Фіолетовий	3,7-4,2
Фіолетово коричневий	4,2-4,4
Коричневий	4,4-6,0

При проектуванні чи виготовленні ФД існує потреба в визначенні глибини p - n переходу (в даному випадку n^+ - p переходу) та розподілу концентрації домішок ($N_{x,t}$). Ці параметри можна визначити як розрахунковим методом так і експериментальним. Так x_{n+-p} після загонки, згідно [71], можна оцінити за формулою (2.11):

$$x_{n+-p} = 5,4\sqrt{D_1 t_1} \quad (2.11)$$

де D_1 – коефіцієнт дифузії при $T=1353$ К, $D_1=2\cdot 10^{-13}$ см²/с [32]; t_1 – тривалість загонки.

Глибина p - n переходу також була визначена експериментально методом шар-шліфа [72]. Експериментальний та розрахунковий графіки залежності x_{n+-p} від тривалості загонки зображено на Рис. 2.12. Як бачимо з Рис. 2.12 експериментальні значення добре варифікуються із теоретичними з незначним відхиленням.

Поверхневу концентрацію (N_0) внесених домішок можна визначити із формули провідності напівпровідника n -типу [73], виразивши електропровідність через питомий опір:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = en\mu_n \quad (2.12)$$

де σ – електропровідність напівпровідника; ρ – питомий опір; e – заряд електрона; n – концентрація електронів; μ_n – рухливість електронів.

Вважаючи, що всі внесені домішки фосфору іонізовані та $N_0=n$, для поверхневої концентрації отримаємо:

$$N_0 = \frac{1}{e\rho\mu_n} \quad (2.13)$$

Відповідно для визначення N_0 потрібно знати ρ після загонки фосфору, що можна визначити із формули [74]:

$$R_S = \frac{\rho}{x_{n+-p}} \quad (2.14)$$

Результати розрахунку поверхневої концентрації і питомого опору та їх залежності від поверхневого опору наведено на рис. 2.13.

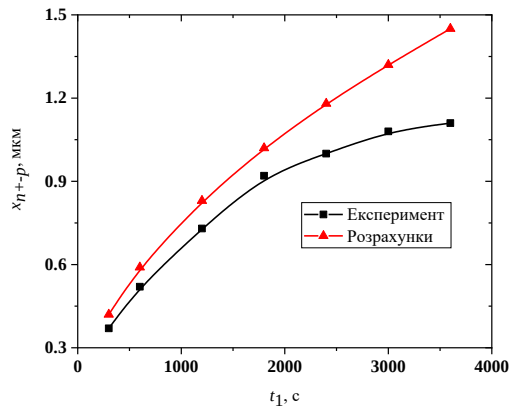


Рис. 2.12. Експериментальний та розрахунковий графіки залежності глибини p^+-p переходу від тривалості загонки.

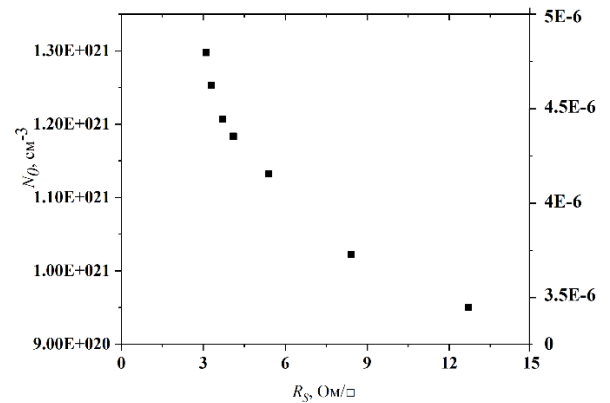


Рис. 2.13. Залежність поверхневої концентрації і питомого опору від поверхневого опору після загонки фосфору.

Знаючи поверхневу концентрацію Фосфору після загонки, можна визначити розподіл концентрації домішки по глибині $p-n$ переходу $N_{x,t}$ за формулою [71]:

$$N_{x,t} = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t_1}} \quad (2.15)$$

де $\operatorname{erfc}(x)$ – додаткова функція помилок.

Проведемо розрахунок для одного варіанту тривалості дифузії, наприклад при $t_1=2400$ с. Результати розрахунку розподілу домішки після загонки зображені на Рис. 2.14.

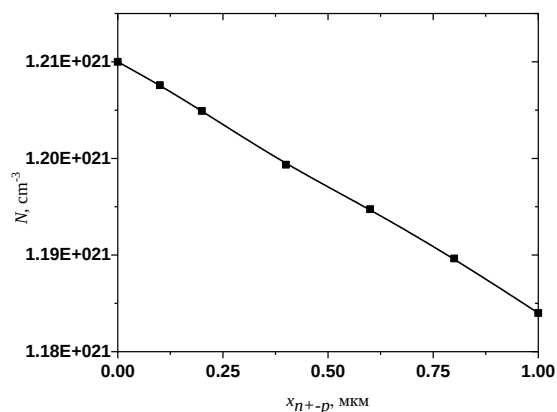


Рис.2.14. Розрахунковий графік розподілу фосфору після загонки тривалістю $t_1=2400$ с.

Куди важливішими параметрами p - n -переходу фотодіодів є кінцева глибина гомопереходу та кінцевий розподіл концентрації домішки в n^+ -шарі. Відмітимо, що після розгонки фосфору проводять ще дифузію бору в тильну сторону кристала при $T=1253$ К. Але при вимірюванні нами x_{n+-p} до і після останньої термічної операції зростання глибини p - n -переходу не спостерігалось, оскільки:

$$D_3 t_3 \ll D_2 t_2 \quad (2.16)$$

де D_2 – коефіцієнт дифузії фосфору при $T=1453$ К, $D_2=10^{-12}$ см²/с [71]; t_2 – тривалість розгонки фосфору, $t_2=5100$ с; D_3 – коефіцієнт дифузії фосфору при $T=1253$ К; t_3 – тривалість дифузії бору.

Відповідно кінцеву x'_{n+-p} в даному випадку формує саме розгонка фосфору. Даний параметр можна оцінити за формулою [71]:

$$x'_{n+-p} = 2\sqrt{D_1 t_1} \cdot \sqrt{\ln \frac{Q}{N_A \sqrt{\pi D_2 t_2}}} \quad (2.17)$$

де Q – доза легування (кількість домішки, яка поступає в кремній під час загонки).

Дозу легування можна визначити з рівняння (2.18) [71]:

$$Q = 2N_0 \left(\frac{D_1 t_1}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

Отримано розрахунковий графік залежності x'_{n+-p} від тривалості загонки згідно (2.17), та для порівняння отримано такий же графік експериментальним шляхом (Рис. 2.15). З рисунку можна побачити погану варифікацію розрахункових даних та експериментальних. Імовірною причиною розбіжності є повільне охолодження пластин після розгонки, що збільшує глибину p - n переходу, а в (2.17) це не враховано, або деякі відхилення коефіцієнтів дифузії фосфору від наведених в літературі внаслідок дифузії в уже легований кремній.

Щодо концентрації внесених домішок, то при збільшенні глибини дифузійного шару концентрація фосфору зменшується. Розподіл концентрації домішки по глибині p - n переходу при двостадійній дифузії можна визначити з

формули [71]:

$$N'_{x,t} = \frac{2N_0}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right) \quad (2.19)$$

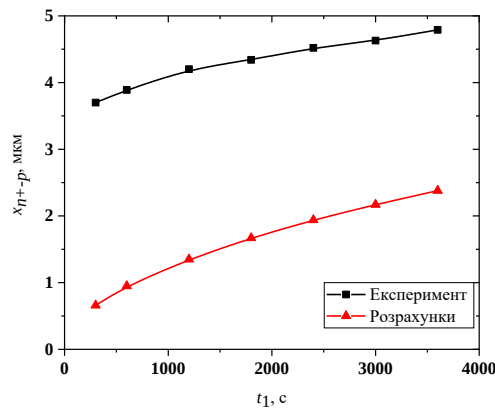


Рис. 2.15. Експериментальний та розрахунковий графіки залежності глибини гомопереходу після розгонки від тривалості загонки.

Варто відмітити, що при розрахунку розподілу концентрації домішки внаслідок відхилень коефіцієнтів дифузії, як вказано вище, виникають деякі труднощі. Тому значення залежність $N'_{x,t}$ отримано експериментальним шляхом.

Для оцінки розподілу домішки по глибині дифузійного шару напівпровідникова підкладка після дифузії фосфору з $R_S \approx 2,4 \text{ Ом}/\square$ пошарово стравлювалась у повільному травнику ($\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3 \text{COOH} = 20 : 1 : 1$) методом хіміко-динамічного полірування (ХДП) [74] та після кожного травлення вимірювався поверхневий опір. Результати експерименту зображено на рис. 2.16.

З рис. 2.16, як і в формулі (2.19) можна побачити експоненційну залежність розподілу фосфору по глибині дифузійного шару. Якщо поверхневий опір складав $R_S = 2,4 \text{ Ом}/\square$ ($N_0 = 4,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), то при $x_{n+p} = 4 \text{ мкм}$ - $R_S \approx 55 \text{ Ом}/\square$ ($N_0 = 7,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$). При скануванні сколу кремнієвої підкладки з n^+ -шаром за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) також можна виявити зміну концентрації домішки по товщині легованого шару (Рис. 2.17).

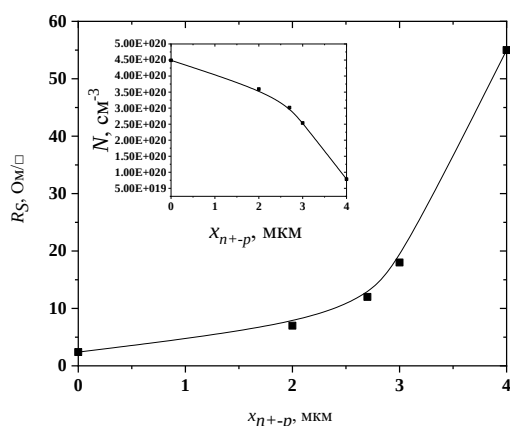
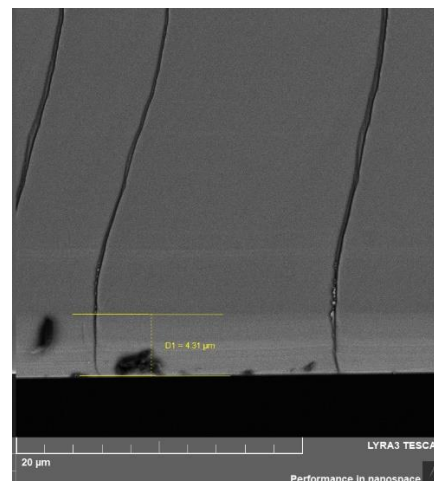


Рис. 2.16. Експериментальні криві розподілу домішки фосфору по глибині дифузійного шару після розгонки: залежність $R_S(x_{n+-p})$ (вставка - залежність



$N(x_{n+-p})$.

Рис. 2.17. СЕМ фото сколу кремнієвої підкладки з n^+ -шаром.

2.2.2. Дослідження кінетичних властивостей кремнієвих n^+ -шарів

Експериментальні дослідження кінетичних явищ у кремнієвих n^+ -шарах товщиною 4-4,5 мкм проводились в інтервалі температур $T = 290-380$ К. Леговані шари утворювались шляхом двостадійної дифузії фосфору, згідно методики наведеної в попередньому розділі ($R_S \approx 2,7$ Ом/□). Дослідження зразків при температурах 290-380 К показали, що коефіцієнт Холла в цьому діапазоні температур практично не міняється (Рис. 2.18). Це свідчить про те, що при цих температурах концентрація носіїв заряду не змінюється (Рис. 2.18 вставка), внаслідок виснаження домішкових рівнів при цих температурах[75]. Концентрація електронів сягала близько $n \approx 1,2 \cdot 10^{20}$ см⁻³, що добре корелює із концентраціями фосфору, визначеними в попередньому розділі.

При збільшенні температури, спостерігається зменшення електропровідності (Рис. 2.19), внаслідок зниження холівської рухливості (Рис.2.19 вставка), оскільки в даному діапазоні температур відбувається розсіювання носіїв заряду на теплових коливаннях кристалічної ґратки.

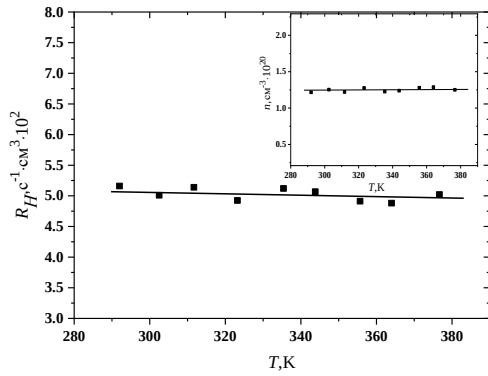


Рис. 2.18. Температурна залежність коефіцієнта Холла та концентрації електронів (вставка) в кремнієвому n^+ -шарі.

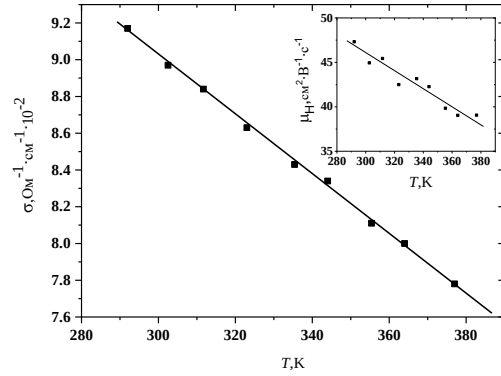


Рис. 2.19. Температурна залежність електропровідності та холівської рухливості (вставка) кремнієвого n^+ -шару.

2.2.3. Дослідження електричних властивостей кремнієвих n^+ - p -переходів

Експериментальні зразки являли собою кремнієві підкладки із n^+ - p -переходом ($R_s \approx 2,7$ Ом/□), утвореним двостадійною дифузією фосфору, площею $28,3$ мм². Із ВАХ n^+ - p -переходу при прямих (Рис. 2.20) та зворотних (Рис. 2.21) зміщеннях видно, що в діапазоні температур $T = 295 - 346$ К, ці структури володіють випрямляючими властивостями. Коефіцієнт випрямлення визначений при $T = 295$ К і напругах $|U_{зм}| = 0,6$ В дорівнює $RR \sim 10^5$.

Висоту потенціального бар'єру $q\phi_k$ оцінено шляхом екстраполяції лінійних ділянок ВАХ в області прямого зміщення напруги. При кімнатній температурі висота потенціального бар'єру дорівнює $q\phi_k \sim 0,6$ еВ та зменшується із температурою (Рис. 2.22).

При підвищенні температури від $T = 295$ К до $T = 346$ К (Рис. 2.22) відбувається лінійне зменшення енергії $q\phi_k$ від $0,6$ еВ до $0,49$ еВ. Ця динаміка змін відбувається в результаті зменшення висоти потенційного бар'єру і описується рівнянням [75]:

$$q\phi_k(T) = q\phi_k(0) - \beta_\phi T \quad (2.20)$$

де β_ϕ – температурний коефіцієнт висоти потенціального бар'єру, а $q\phi_k(0)$ – значення висоти потенціального бар'єра досліджуваної структури при абсолютному нулі температури.

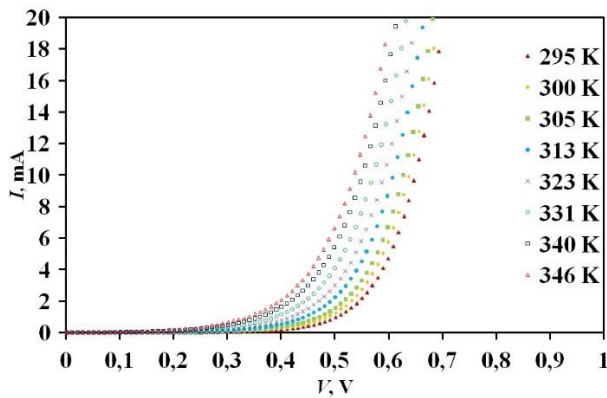


Рис. 2.20. ВАХ n^+ - p -переходу при прямих зміщеннях в діапазоні температур від 297 К до 346 К.

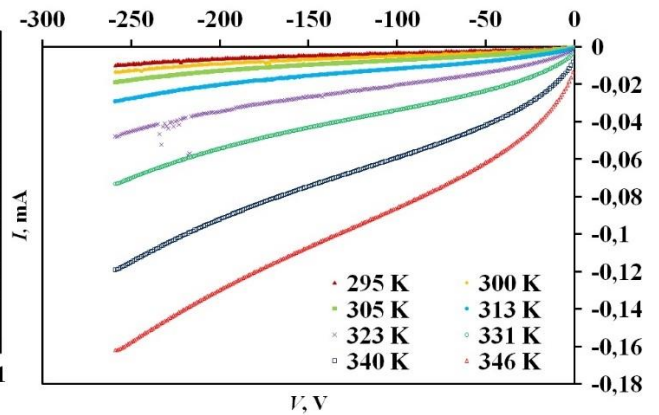


Рис. 2.21. ВАХ n^+ - p -переходу при зворотних зміщеннях в діапазоні температур від 297 К до 346 К.

Використовуючи вираз (2.20) та Рис. 2.22, знаходимо температурний коефіцієнт зміни висоти потенціального бар'єру та його висоту при 0 К, які дорівнюють $d(q\phi_k)/dT = -2,45 \cdot 10^{-3}$ еВ/К і $q\phi_k(0 \text{ К}) = 1,32$ еВ відповідно.

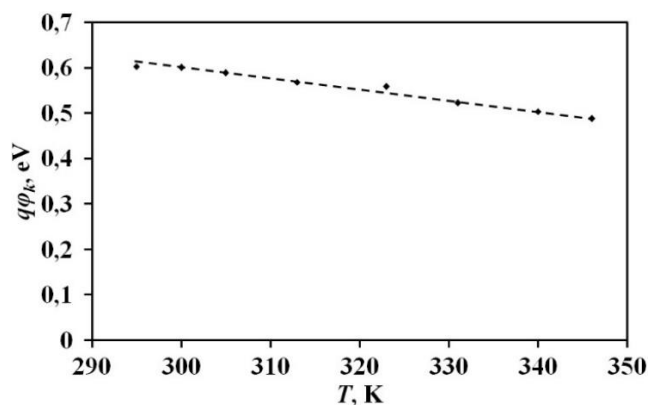


Рис. 2.22. Температурна залежність висоти потенційного бар'єру n^+ - p -переходу.

Для визначення механізму проходження струму через перехід при прямих зміщеннях, ВАХ побудовано в координатах $\ln I = f(U_{зм})$ (Рис. 2.23).

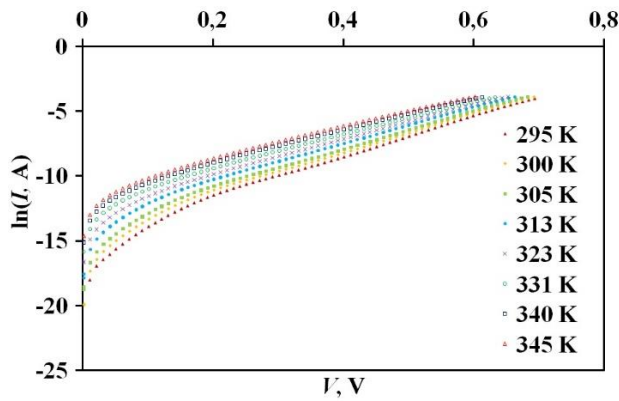
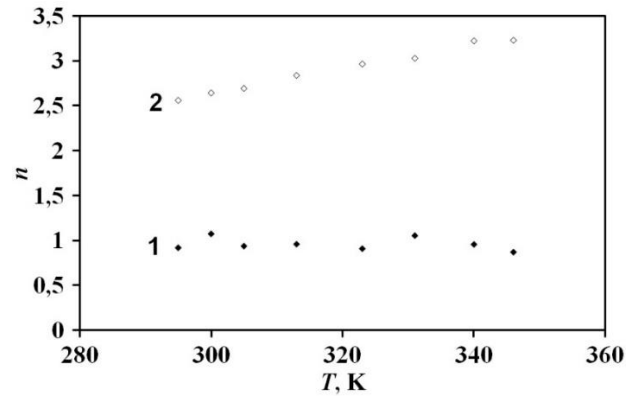


Рис. 2.23. Температурні

залежності $\ln I = f(V)$ n^+ - p -переходу при
прямих зміщеннях.

Рис. 2.24. Температурна



залежність коефіцієнта неідеальності при

прямих зміщеннях: 1 - $3kT/q < V < 0,1$ В;

2 - $0,1 \text{ В} < V < 0,6 \text{ В}$.

На Рис. 2.23 є два прямолінійних відрізки з різними кутами нахилу до осі напруги. Відповідно з тангенсів цих кутів, визначаємо коефіцієнт неідеальності n^+ - p -переходу n (Рис. 2.24).

При малих прямих зміщеннях $3kT/q < U_{зм} < 0,1$ В, нахил до осі напруг лінійних залежностей $\ln I = f(U_{зм})$ характеризується значенням коефіцієнта неідеальності $n \approx 1$ (Рис. 2.24), відповідно, домінуючим механізмом струмопереносу є надбар'єрна емісія. Зі збільшенням прямої напруги $0,1 \text{ В} < U_{зм} < 0,6 \text{ В}$, коефіцієнт неідеальності рівний $n \approx 2,5 - 3$ (Рис. 2.24), що вказує на переважання генераційно-рекомбінаційного механізму струмопереносу при кімнатних температурах та на збільшення вкладу тунельного струму із ростом температури.

Можна допустити, що в деякому наближенні ВАХ структур описується виразом для густини рекомбінаційного струму (j) [37]:

$$j = \frac{qn_i W_i}{\tau} \left(e^{\frac{qU_{зм}}{2kT}} - 1 \right) = \frac{n_i}{\tau} \sqrt{\frac{2q}{N_A} (\phi_k - U_{зм})} \left(e^{\frac{qU_{зм}}{2kT}} - 1 \right)$$

(2.21)

При не великих зворотних напругах ВАХ n^+ - p -переходу добре описуються формулою для генераційного струму (множник перед дужками у

виразі 2.21), що підтверджується лінійним характером залежностей $I = f(\phi_k - U_{зм})^{1/2}$ (Рис. 2.25).

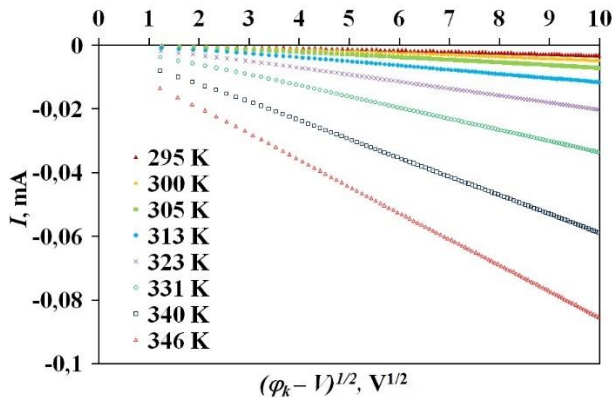


Рис. 2.25. Зворотні гілки вольт-амперних характеристик в координатах $I = f(\phi_k - U_{зм})^{1/2}$ при різних температурах.

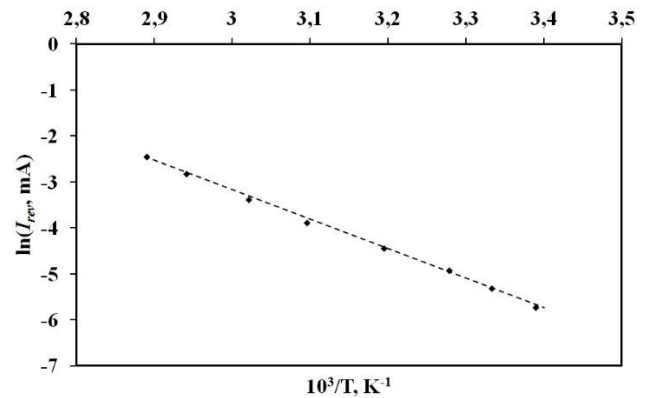


Рис. 2.26. Залежність $\ln I_{rev} = f(10^3/T)$ при зворотних зміщеннях.

Визначена із залежності $\ln I_{rev} = f(10^3/T)$ (Рис. 2.26), отриманий при постійному значенні напруги, глибина залягання донорних енергетичних рівнів, з яких відбувається теплова генерація носіїв заряду становила $\Delta E \approx 0,15$ еВ при $-100 < U_{зм} < 0$ В.

Зворотні гілки ВАХ при температурах $T = 295 - 346$ К описується виразом для тунельного струму (I_t) [37]:

$$I_t = a_0 \exp(-b_0(\phi_k - U_{зм})^{-1/2}) \quad (2.22)$$

де a_0 – параметр, значення якого визначається ймовірністю заповнення енергетичних рівнів, з яких відбувається тунелювання електронів, b_0 – визначається швидкістю зміни величини струму з напругою.

Відповідно до (2.22), зворотні ВАХ в координатах $\ln(I_{rev}) = f(\phi_k - qU_{зм})^{1/2}$ будуть лінійними, що спостерігається на Рис. 2.27.

Значення енергетичного рівня при великих зворотних зміщеннях ($-100 < U_{зм}$), з якого відбувається тунелювання електронів, розраховували з температурної залежності параметра a_0 , яка в координатах $\lg a_0 = f(10^3/T)$

апроксимується прямою лінією (Рис. 2.28). Параметр a_0 визначали екстраполяцією прямолінійних ділянок $\ln(I_{rev}) = f(\phi_k - qU_{зм})^{-1/2}$ до вісі струмів. Встановлена глибина залягання енергетичного рівня становила 0,2 еВ.

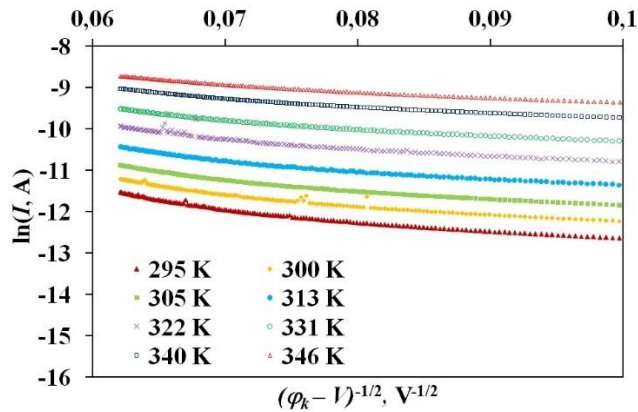
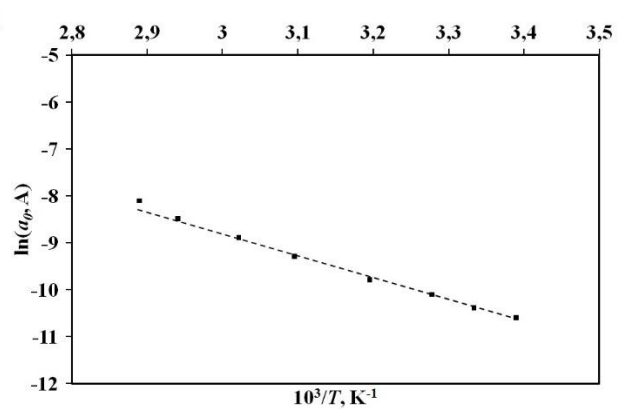


Рис. 2.27. Залежність тунельного струму від зворотного зовнішнього зміщення в температурному інтервалі $T =$



295-346 К.

Рис. 2.28. Залежність $\lg a_0 = f(10^3/T)$ при зворотних зміщеннях.

2.2.4. Вплив концентрації фосфору в n^+ -шарі на темнові струми кремнієвих p - i - n фотодіодів

Результати вимірювання темнових струмів фоточутливих кристалів наведено в Таблиці 2.3. Для відображення чіткої картини, щодо розкиду значень темнових окремих ФЧЕ, наведено I_m характерних зразків із кожної підсерії.

Як видно із Табл. 2.3, зі збільшенням поверхневого опору (зменшенням концентрації) I_m зростають. Також можна побачити, що зразки з $R_s = 1,9 - 2,4$ Ом/□ мають приблизно однаковий рівень I_m , тобто подальше збільшення концентрації фосфору не вносить ніяких змін. Відповідно, збільшувати тривалість дифузії для подальшого зменшення I_m не має змісту. Зменшення темнового струму зі збільшенням концентрації фосфору можна пояснити геттеруванням неконтрольованих домішок (термодонорів внесених під час високотемпературних операцій) і дефектів структури в об'ємі зразків оскільки

ефект геттерування збільшується із зростанням концентрації фосфору. Відомо [76], що для заданої температури існує деяке максимальне значення R_S , підвищення значення якого зробить геттерування неефективним. В даному випадку це значення $R_S = 2,4 \text{ Ом/}\square$.

Варто відмітити, що при збільшенні R_S зростає розкид I_m по абсолютному значенню, але характерна для всіх підсерій ФД розбіжність в відсотковому співвідношенні складала порядку 10-20% відносно середнього.

Щодо темнових струмів ОК, то в даному випадку зростання I_{OK} при зростанні R_S носить значно менший характер. Так, якщо при зміні R_S від 1,9 – 2,4 Ом/□ до 8,1 Ом/□ I_m зросли приблизно в 10-20 разів, то I_{OK} збільшується вдвічі. Це пояснюється тим, що I_{OK} ФД більшою мірою залежить від стану периферії кристалу (зарядових станів на межі розділу Si-SiO₂ чи наявності дефектів в даній області кристалу), а не від степені легування.

Також досліджено ВАХ обернено зміщених ФД з різним поверхневим опором (Рис. 2.29) з яких видно, що при $U_{зм}=60-80 \text{ В}$ темнові струми виходять в насичення. Криві для $R_S=1,9 - 2,4 \text{ Ом/}\square$ фактично співпадають, а крива для $R_S=2,7 \text{ Ом/}\square$ зміщена на одиниці наноампер вгору по осі ординат.

Варто відмітити, що криві для $R_S=1,9 - 2,7 \text{ Ом/}\square$ володіють мінімальним приростом темнових струмів при збільшенні $|U_{зм}|$, що свідчить про структурну досконалість об'єму кристалу та мінімальну кількість генераційно-рекомбінаційних центрів в ОПЗ ФД. Інші криві характеризуються більшим приростом темнового струму при зростанні напруги зміщення.

Також отримано ВАХ охоронних кілець залежно від R_S , навантаження вибраних ФД із кожної підсерії (Рис. 2.30). З рисунку можна побачити, що для ОК відсутнє зростання рівнів I_{OK} при зростанні R_S та відсутня закономірність як у випадку ФЧЕ. Це підтверджує той факт, що темновий струм охоронного кільця ФД більшою мірою залежить від стану периферії кристалу, а не від степені легування.

Таблиця 2.3

Значення темнових струмів фоточутливих кристалів при різному поверхневому опорі n^+ -шару ($U_{зм}=-120$ В).

R_s , Ом/□ – після розгонки	I_m , нА				I_{OK} , мкА
1,9 – 2,4	27	25	27	28	0,54
	30	30	29	29	0,55
	27	31	28	27	0,41
	26	25	25	24	0,32
	32	30	32	30	0,36
2,7	30	30	28	29	0,61
	33	32	29	35	0,53
	36	34	33	31	0,34
	28	35	31	32	0,37
	30	29	31	30	0,47
3,3	54	54	46	94	0,72
	67	36	51	49	0,42
	34	36	42	46	0,65
	77	55	48	38	0,52
	41	66	44	35	0,71
5,0	196	142	147	220	1,27
	129	142	124	114	0,91
	188	171	148	145	0,83
	113	112	137	108	0,65
	165	180	249	195	0,90
8,1	500	476	572	692	1,18
	371	443	388	331	0,73
	465	375	346	405	0,58
	482	401	397	510	0,76
	359	453	440	480	0,72

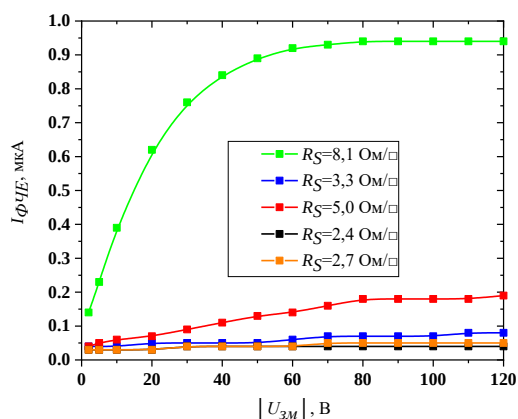


Рис. 2.29. ВАХ ФЧЕ ФД при різному R_S .

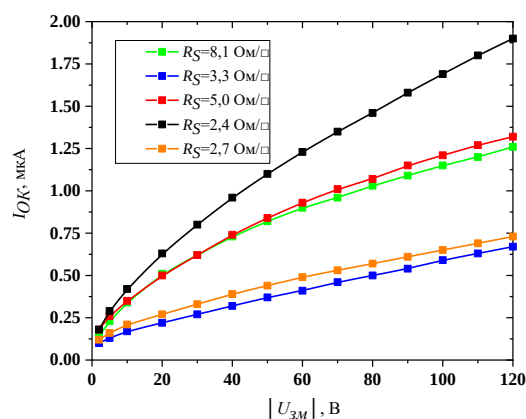


Рис. 2.30. ВАХ ОК ФД при різному R_S .

З Рис. 2.30 видно, що криві вольт-амперних характеристик ОК при збільшенні зміщення не виходять на насичення в діапазоні досліджуваних напруг. Причиною цього є зростання ОПЗ ОК при збільшенні напруги зворотного зміщення в сторону периферії кристалу. Адже ОПЗ ОК обмежене областю просторового заряду ФЧЕ та тильною стороною підкладки. Так, якщо товщина кристалу складає 420-470 мкм, то при $|U_{3M}| = 120 \text{ В}$, згідно (2.3), ширина ОПЗ сягає близько 490 мкм (при $\rho \approx 18 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ без врахування деградації питомого опору). Але в досліджуваному випадку відстань від краю ОК до торців кристалу сягає 750 мкм, відповідно, згідно (2.3), ОПЗ ОК досягне торців кристалу при $U_{3M} \approx -300 \text{ В}$, але в цьому випадку внесок в значення темнових струмів може робити порушена поверхня на торцях кристалу утворена при розділенні пластин на кристали [77, 78].

2.2.5. Вплив легування n^+ -шару на чутливість кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів

Для отримання максимальної фоточутливості $p-i-n$ ФД потрібно щоб падаюче випромінювання поглиналося в високоомній p -області. Для збільшення кількості випромінювання, яке братиме участь у генерації носіїв заряду потрібно забезпечити високе пропускання n^+ -області.

Для вивчення оптичних властивостей n^+ -шару отримано спектри пропускання кремнієвих підкладок однакової товщини легованих фосфором (n^+ - p -структур) із різним R_S (Рис. 2.31). Дослідження спектрів пропускання проводили за допомогою спектрофотометрів NIKOLET 6700 та SF-2000 при кімнатній температурі. Як видно з Рис. 2.31. при збільшенні міри легування підкладок фосфором коефіцієнт пропускання n^+ - p -структур зменшується. З цього можна зробити хибний висновок, що мінімальна концентрація фосфору забезпечує максимальну фоточутливість ФД.

Зауважимо, що зменшення концентрації фосфору знижує міру геттерування підкладок, що призводить до значного погіршення електрофізичних характеристик кремнію та погіршення параметрів фотоприймачів, як це було видно в випадку темнових струмів (Рис. 2.29). Отримано значення імпульсної чутливості ФД залежно від поверхневого опору після дифузії фосфору, також вказано коефіцієнти пропускання n^+ -шарів (T_{n^+}) при $\lambda=1,05$ мкм (Таблиця 2.4).

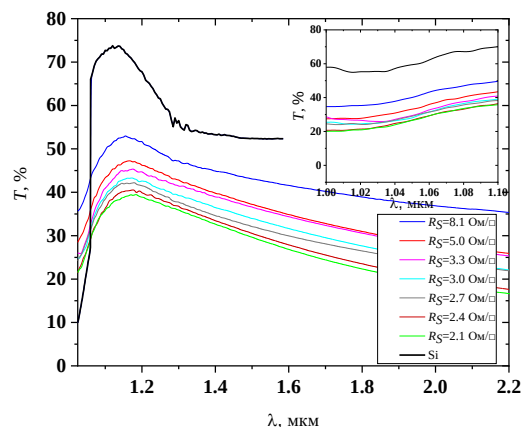


Рис. 2.31. Спектри пропускання n^+ - p -структур з різним R_S після дифузії фосфору.

Як видно з Таблиці 2.4 зі збільшенням концентрації фосфору в n^+ -шарі пропускання цієї області зменшується. При досягненні значення поверхневого опору $R_S=3,3$ Ом/□ коефіцієнт пропускання змінюється мінімально, а при $R_S=2,4$ Ом/□ він більше не зменшується. Але як видно з Таблиці 2.4 чутливість набуває максимальних значень при $R_S=2,7-3,3$ Ом/□.

Таблиця 2.4

Залежність імпульсної чутливості ФД та коефіцієнтів пропускання підкладок з n^+ -шарами (при $\lambda=1,05$ мм) від R_S n^+ -шару після дифузії фосфору.

R_S , Ом/□	T_{n+} , %	S_{imp} , А/Вт ($ U_{зм} =120$ V)
8,1	45	0,42-0,43
5,0	37	0,42-0,44
3,3	34	0,45-0,47
3,0	33	0,46-0,47
2,7	32	0,46-0,47
2,4	31	0,42-0,45
2,1	31	0,38-0,42

При подальшому зниженні R_S фоточутливість зменшується. Зменшення чутливості при $R_S = 2,1-2,4$ Ом/□ зумовлене утворенням структурних дефектів, зокрема дислокацій, внаслідок високої концентрації фосфору, що, в свою чергу, може призвести до зменшення дифузійної довжини неосновних носіїв заряду внаслідок їх рекомбінації на кристалографічних дефектах (за умови, що вони розміщені в області просторового заряду) [37].

2.3. Вплив дифузійного легування та геттерування бором на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+p-p^+ - структур та фотоприймачів на їх основі

В цьому розділі описано дослідження впливу утворення p^+ -шарів дифузією бору на фотоелектричні властивості n^+p-p^+ -структур та ФД на їх основі, зокрема описано вплив обробки поверхні тилової сторони перед дифузією на кінцеві параметри фотоприймачів, досліджено вплив концентрації (поверхневого опору) легованого бору на фотоелектричні параметри вказаних структур та досліджено погіршення електрофізичних характеристик кремнію під час високотемпературних операцій і ефективність геттерування бором ГРЦ.

2.3.1. Вплив дифузії бору на темнові струми кремнієвих n^+p-p^+ -структур

Дослідження проводилось при виготовленні чотириквadrантних фотодіодів з охоронним кільцем на основі монокристалічного кремнію p -типу з питомим опором $\rho=16-17$ кОм·см та кристалографічної орієнтації [111]. В єдиному технологічному циклі отримано три типи структур: n^+p (ФД $_{n+p}$), n^+p-p^+ (без полірування зворотної сторони підкладки) (ФД' $_{n+p-p+}$), та n^+p-p^+ (з поліруванням зворотної сторони підкладки методом ХДП) (ФД $_{n+p-p+}$). Товщина кінцевих кристалів сягала $X=495-500$ мкм [79].

При вимірюванні ВАХ отриманих структур спостерігалися деякі відмінності у значеннях I_m : ФД $_{n+p}$ притаманні найбільші темнові струми, а ФД $_{n+p-p+}$ - найменші (Рис.2.32а). Темновий струм ФД $_{n+p-p+}$ при $|U_{зм}| = 140-160$ В сягав насичення (Рис. 2.32б), що свідчило про розширення ОПЗ на всю товщину кристала, оскільки об'ємна генераційна складова темнового струму прямо пропорційна ширині ОПЗ [37]. Зразки ФД' $_{n+p-p+}$ мали значний розкид темнових струмів по ФЧЕ: у трьох ФЧЕ в діапазоні $|U_{зм}| = 180-200$ В спостерігався пробій $p-n$ переходу, а I_m в одного ФЧЕ в діапазоні $|U_{зм}| = 190-200$ В сягав насичення (Рис. 2.32в). Що стосується ФД $_{n+p}$, то їх ВАХ в діапазоні $|U_{зм}| = 2-230$ В набували лінійного характеру, а при $|U_{зм}| = 230-260$ В спостерігався пробій $p-n$ переходу в усіх ФЧЕ (рис. 2.32г).

Різниця в значеннях темнових струмів свідчить про різну кількість ГРЦ в високоомній p -області кристалів ФД і різний ступінь їх геттерування в процесі виготовлення фотодетекторів. У випадку ФД $_{n+p}$ геттерування полягало в загонці та розгонці фосфору в фронтальну сторону ФД, але цей процес геттерування ефективний лише в області кристалу, що прилягає до n^+ -шару, а тильна сторона і прилеглий до неї об'єм кристалу залишалися насиченими центрами рекомбінації, зокрема, атомами неконтрольованих домішок і кристалографічними дефектами, внесеними або створеними під час високотемпературних термообробок.

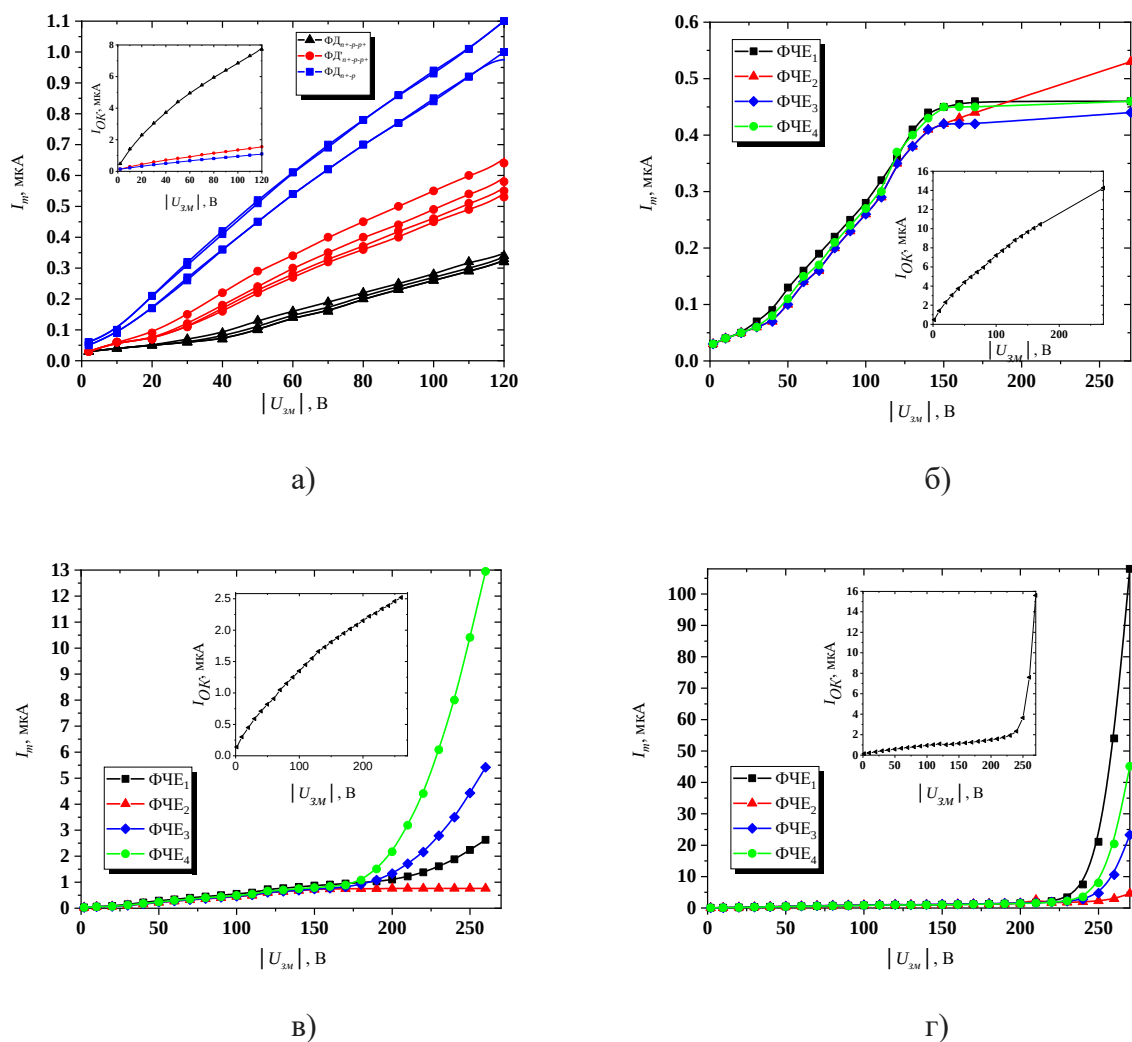


Рис. 2.32. Зворотні темнові ВАХ ФД: а) ВАХ досліджених ФД при $|U_{3M}| = 2-120$ В; б) ФД $_{n+-p-p+}$; в) ФД $'_{n+-p-p+}$; г) ФД $_{n+-p}$; вставки – ВАХ ОК.

ГЦР роблять значний внесок у значення темнових струмів ФД, а при високій напрузі зворотного зміщення (і, відповідно, високій напруженості електричного поля) і при досягненні ОПЗ дефектного тилового боку кристала, останні провокують лавинний пробій [80-82]. Відомо також, що напруга пробою поблизу поверхні нижча, ніж в об'ємі кристала, що також пояснює лавинний пробій при досягненні ОПЗ тилового боку кристала [83]. Ще однією причиною пробою є утворення бар'єру Шоткі при нанесенні металізації на тилу сторону підкладки без омічного шару. Відповідно, при досягненні ОПЗ металізації, напруженість поля сильно зростає внаслідок відсутності градієнта концентрацій, яка обмежує напруженість поля, та провокує пробій.

Аналогічна ситуація стосується і ФД' $n^{+}-p-p^{+}$, (пробій внаслідок наявності дефектів з тильної сторони пластини) хоча в технологічному маршруті виготовлення цих ФД присутня операція геттерування бором тильної сторони, але все ж таки геттерування бором не є настільки ефективним, щоб повністю усунути ГРЦ в області кристалу поблизу тильної сторони структури. Тому з тих же причин, що і в попередньому випадку, можливий пробій $p-n$ переходу, а зниження напруги пробою можливе за рахунок досягнення ОПЗ дефектної тильної сторони ФД при меншій $|U_{зм}|$

Слід зазначити, що термічна операція дифузії бору є також відпалом для більш ефективного геттерування n^{+} -шаром фронтальної сторони підкладки, що дозволяє дифундувати найбільш глибокі неконтрольовані домішки в зону геттеру. Збільшення часу відпалу покращує ефективність усунення ГРЦ. Варто зазначити, що в роботі [27] нами описано метод ефективного додаткового геттерування зворотного боку підкладки шляхом одночасної дифузії фосфору в лицьову і зворотну сторони кристала з наступним травленням зворотного n^{+} -шару перед дифузією бору.

Мінімальний розкид і значення I_m спостерігалися в ФД $n^{+}-p-p^{+}$. Це було досягнуто шляхом травлення методом ХДП шару кремнію зі зворотного боку підкладки, насиченого ГРЦ із подальшою дифузією бору.

Слід зазначити, що темнові струми ОК також мали різні значення і не досягали насичення (Рис. 2.21 вставки). I_{OK} залежать від густини поверхневих станів і наявності інверсійних шарів на межі розділу Si-SiO₂ на периферії кристала, оскільки зі збільшенням напруги зсуву ОПЗ ОК розширюється не тільки в товщу кристала, але і в бік периферії.

Зразки ФД $n^{+}-p-p^{+}$ та ФД' $n^{+}-p-p^{+}$ мали дещо вищі значення I_{OK} , що свідчить про більшу густину поверхневих станів, ніж у ФД $n^{+}-p$. Це також підтверджується вимірюванням опору ізоляції між ОК і ФЧЕ $\sum R_{3\phi}$, оскільки цей параметр характеризує наявність провідних інверсійних каналів на межі поділу Si-SiO₂ між активними елементами: ФД $n^{+}-p-p^{+}$ - $\sum R_{3\phi} = 1,4$ МОм, ФД' $n^{+}-p$

$p^+ - \sum R_{36} = 6,2$ МОм, $\Phi D_{n^+-p} - \sum R_{36} = 8,7$ МОм. Збільшення провідності інверсійних каналів у випадку $\Phi D_{n^+-p-p^+}$ та $\Phi D'_{n^+-p-p^+}$ зумовлене наявністю більшої кількості термічних операцій, на відміну від ΦD_{n^+-p} , оскільки під час початкових термічних операцій в поверхню оксиду кремнію дифундують атоми неконтрольованих домішок (це може бути і фосфор), які при подальших термообробках дифундують до межі розділу оксид-кремній, і при значній сумарній тривалості термообробок можуть викликати погіршення опору ізоляції між активними елементами та збільшення I_{OK} [49, 50, 52, 64-66]. Наявність інверсійних шарів можна також оцінити, вимірюючи CV-характеристик МДН-структур (Рис. 2.33), де криві $\Phi D_{n^+-p-p^+}$ та $\Phi D'_{n^+-p-p^+}$, які мають більшу сумарну тривалість термічних операцій, можуть інвертувати.

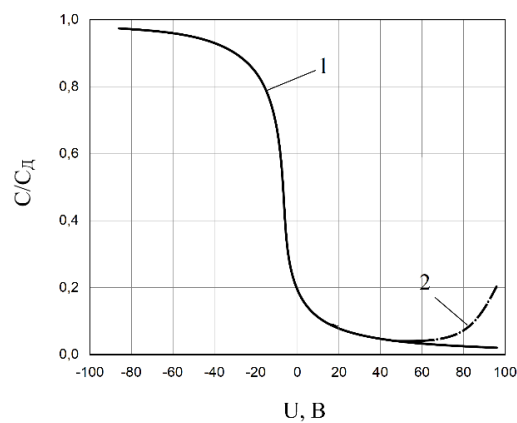


Рис. 2.33. CV-характеристики кремнієвих МДН-структур: 1 - без p^+ -шару; 2 - з p^+ -шаром.

2.3.2. Вплив дифузії бору на чутливість кремнієвих n^+-p-p^+ -структур

При дослідженні імпульсної струмової монохроматичної чутливості було помічено, що імпульсна чутливість $\Phi D_{n^+-p-p^+}$ сягає насичення (Рис. 2.34, Рис. 2.35) приблизно при тій самій напрузі зміщення, що і його темновий струм (Рис. 2.32б) $|U_{zm}| = 150-160$ В. Це пов'язано з тією ж причиною - досягненням максимальної ширини ОПЗ, при якій подальше зростання коефіцієнта збирання носіїв заряду, і, відповідно, чутливості, неможливе (2.5) [11]. Що

стосується $\Phi Д'_{n+-p-p+}$, то чутливість всіх ФЧЕ досягала насичення в околі $|U_{зм}| = 180-200$ В (Рис. 2.32), як і темновий струм ФЧЕ₂, який не демонстрував пробою (Рис. 2.32в). Слід зазначити, що під час вимірювання чутливості всі ФЧЕ $\Phi Д'_{n+-p-p+}$ поводитися типово, хоча деякі ФЧЕ показали пробій при вимірюванні ВАХ. Насичення зразків при різних напругах зворотного зсуву свідчить про розширення ОПЗ на всю товщину кристала при різних напругах зворотного зміщення, і, відповідно, про різницю в кінцевому питомому опорі p -області структур (2.4) [66].

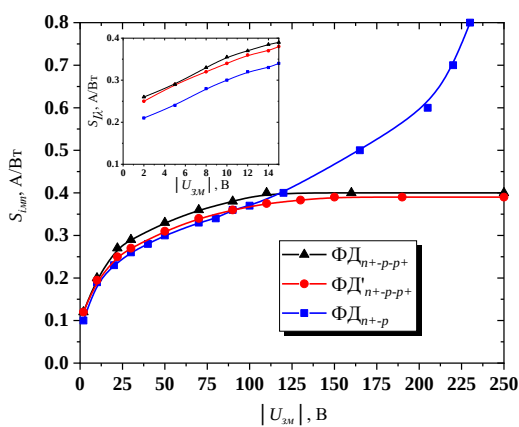


Рис. 2.34. Залежність S_{Imm} ФД від напруги зворотного зміщення (вставка S_L).

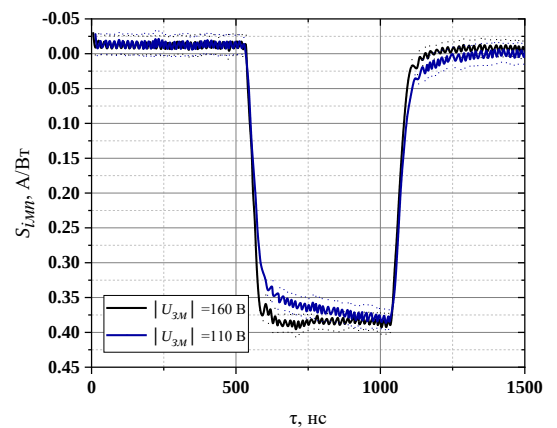


Рис. 2.35. Форма імпульсу вихідного сигналу $\Phi Д_{n+-p-p+}$ в залежності від напруги зворотного зміщення: синя крива $|U_{зм}| = 110$ В, $S_{Imm}=0,4$ А/Вт; чорна крива $|U_{зм}| = 150-160$ В, $S_{Imm}=0,4$ А/Вт.

Інша картина спостерігалася при вимірюванні чутливості n^+-p -структур: при $|U_{зм}| = 120$ В спостерігалася стрибкоподібне зростання чутливості (Рис. 2.34), хоча згідно з Рис. 2,32г пробій $p-n$ переходу цих ФД спостерігався при напрузі -230-260 В. S_{Imm} $\Phi Д_{n+-p}$ не досягала насичення, але швидко зростала зі збільшенням напруги зміщення (Рис. 2.34, 2.36). Чутливість $\Phi Д_{n+-p}$ сягала теоретично можливого значення ($S_{\lambda max}$) (2.23) [11] при $|U_{зм}| \approx 230-250$ В. Таке зростання чутливості зумовлене лавинним пробоем і значним збільшенням кількості нерівноважних носіїв заряду, подібно до лавинного

фотодіода. Зауважимо, що формула (2.23) справедлива для фотоприймачів без підсилювачів, оптичних концентраторів чи лавинних фотодіодів.

$$S_{\lambda max} = \frac{\lambda}{1.24} \quad (2.23)$$

Досліджено також струмову монохроматичну чутливість ($\lambda=1,05$ мкм) на модульованому потоці ($f_{mod}=20$ кГц) ($S_{I\lambda}$) в діапазоні $|U_{зм}| = 2-15$ В. Варто зазначити, що $\Phi Д'_{n+-p-p+}$ та $\Phi Д_{n+-p-p+}$ мали дещо вище $S_{I\lambda}$, ніж $\Phi Д_{n+-p}$ (Рис. 2.34 вставка). Це свідчить про те, що $\Phi Д'_{n+-p-p+}$ та $\Phi Д_{n+-p-p+}$ мають більшу дифузійну довжину неосновних носіїв заряду (L_n) внаслідок ефективнішого геттерування, ніж $\Phi Д_{n+-p}$, а також про те, що при однаковій напрузі зворотного зміщення ОПЗ $\Phi Д$ з більшою чутливістю більша, ніж у $\Phi Д$ з меншою чутливістю внаслідок меншого p -області.

Було також досліджено поведінку світлових ВАХ у видимому діапазоні довжин хвиль. Виявлено, що в $\Phi Д_{n+-p}$ в околі напруг $|U_{зм}| = 120-130$ В спостерігається стрибкоподібне зростання фотоструму при освітленні білим світлодіодом різної освітленості (Рис. 2.37, Рис. 2.38). У цьому ж діапазоні напруг спостерігається зростання фотоструму і чутливості на довжині хвилі $\lambda=1,05$ мкм. Враховуючи описане лавиноподібне зростання фотоструму і чутливості в $\Phi Д_{n+-p}$, не виключено, що така структура фотоприймачів може бути використана для лавинних фотодіодів. Слід зазначити, що стрибкоподібного зростання фотоструму, подібного до пробою, в $\Phi Д'_{n+-p-p+}$ та $\Phi Д_{n+-p-p+}$ не спостерігалось (Рис. 2.39, Рис. 2.40).

При дослідженні світлових ВАХ при освітленні лазерами різної довжини хвилі (Рис. 2.38-2.40) було виявлено, що фотострум при $\lambda=405$ нм практично не відрізняється від темного струму, а при збільшенні довжини хвилі фотострум різко зростає. Це пов'язано з тим, що досліджувані фотодіоди є чутливими в діапазоні $\lambda=400-1200$ нм, з максимумом близько 1000 нм (при $|U_{зм}| \approx 100$ В) (Рис. 2.41), відповідно, при $\lambda=405$ нм чутливість мінімальна.

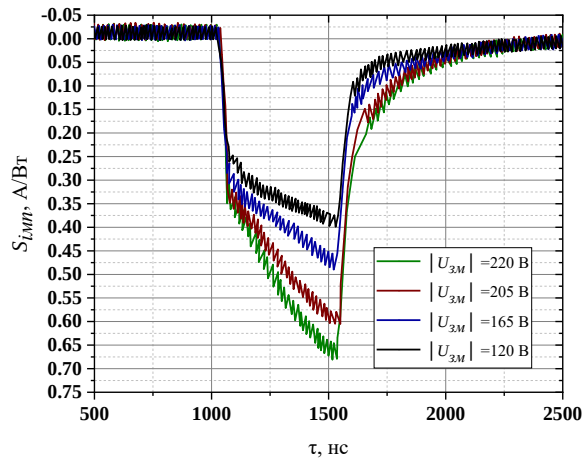


Рис. 2.36. Форма імпульсу вихідного сигналу ΦD_{n+p} в залежності від напруги зворотного зміщення: чорна крива - $|U_{3M}| = 120$ В, $S_{lim}=0,4$ А/Вт; синя крива - $|U_{3M}| = 165$ В, $S_{lim}=0,5$ А/Вт; червона крива - $|U_{3M}| = 205$ В, $S_{lim}=0,6$ А/Вт; зелена крива $|U_{3M}| = 220$ В, $S_{lim}=0,7$ А/Вт.

При дослідженні світлових ВАХ при освітленні лазерами різної довжини хвилі (Рис. 2.38-2.40) було виявлено, що фотострум при $\lambda=405$ нм практично не відрізняється від темнового струму, а при збільшенні довжини хвилі фотострум різко зростає. Це пов'язано з тим, що досліджувані фотодіоди є чутливими в діапазоні $\lambda=400-1200$ нм, з максимумом близько 1000 нм (при $|U_{3M}| \approx 100$ В) (Рис. 2.41), відповідно, при $\lambda=405$ нм чутливість мінімальна.

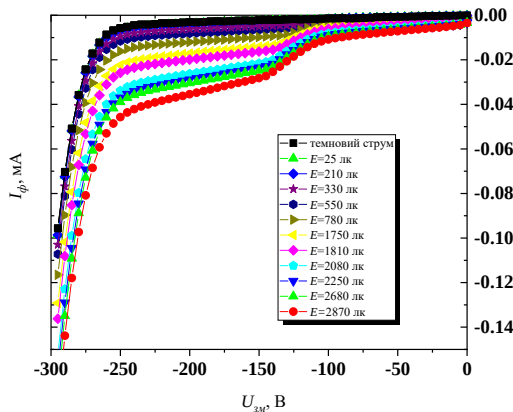


Рис. 2.37. Світлові ВАХ ΦD_{n+p} , освітленого білим світлодіодом різної освітленості.

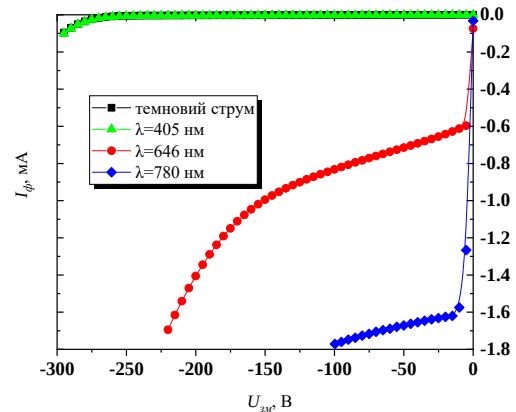


Рис. 2.38. Світлові ВАХ ΦD_{n+p} , освітленого лазерами з різною довжиною хвилі ($P=5$ мВт).

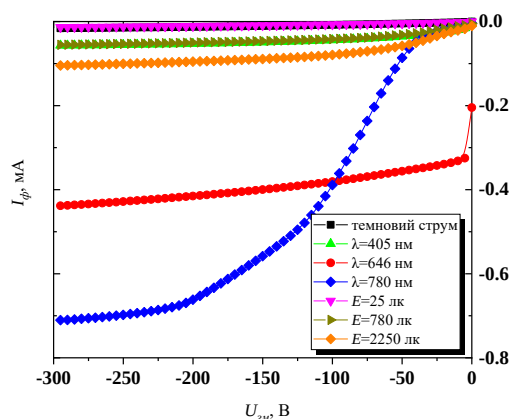


Рис. 2.39. Світлові ВАХ ФД_{n⁺-p-p⁺}, освітлені білим світлодіодом різної освітленості та лазерами з різною довжиною хвилі ($P=5$ мВт).

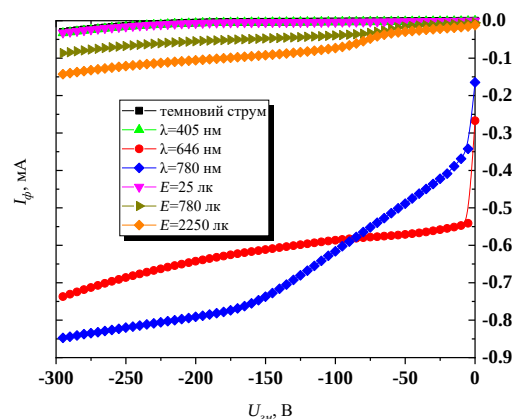


Рис. 2.40. Світлові ВАХ ФД_{n⁺-p-p⁺}, освітлені білим світлодіодом різної освітленості та лазерами з різною довжиною хвилі ($P=5$ мВт).

Слід зазначити, що формування p^+ -шару в ФД чутливих в видимому діапазоні довжин хвиль не впливає на значення коефіцієнта збирання носіїв заряду і чутливість, оскільки в цьому випадку відсутнє відбиття випромінювання від золотого дзеркала на тилловому боці підкладки за рахунок поглинання короткохвильового випромінювання в приповерхневих шарах підкладки.

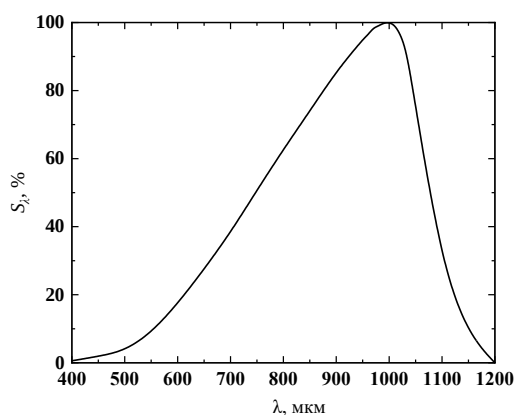


Рис. 2.41. Типова спектральна характеристика досліджуваних ФД.

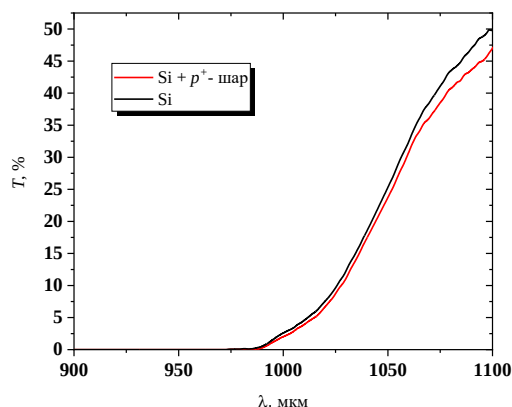


Рис. 2. 42. Спектр пропускання кремнієвої підкладки та підкладки з p^+ -шаром.

При $\lambda = 1,05$ мкм p^+ -шар поглинає близько 2% випромінювання за одне проходження, зі збільшенням λ поглинання p^+ -шару зростає (Рис. 2.42), але описані фотоприймачі не використовуються для детектування довжин хвиль $\lambda \geq 1100$ нм.

2.3.3. Вплив дифузії бору на ємність фоточутливих елементів та кінцеві електрофізичні параметри p -області n^+-p-p^+ -структур

При вимірюванні залежності ємності ФЧЕ від зворотної напруги було виявлено, що $\Phi D_{n^+-p-p^+}$ має найменші значення ємності, а ΦD_{n^+-p} - найбільші (Рис. 2.43). Різниця у значеннях ємності зумовлена різницею у кінцевому p -області (або N_A) n^+-p-p^+ -структур, оскільки $C_{RE} \sim 1/\rho$ і $C_{RE} \sim N_A$ (2.4). Відповідно, вимірювання ємності також вказують на найефективніше геттерування кристалів у випадку $\Phi D_{n^+-p-p^+}$, а найменш ефективне - у випадку ΦD_{n^+-p} .

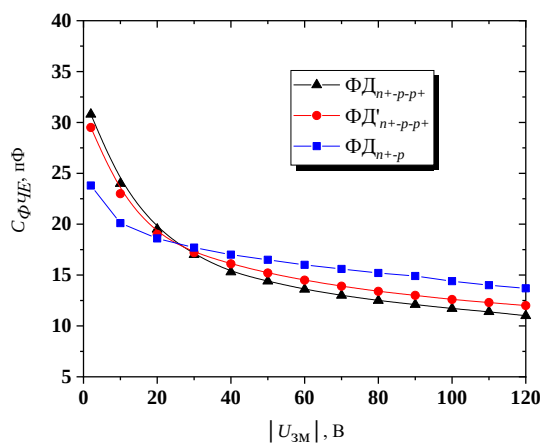


Рис. 2.43. Графік залежності бар'єрної ємності структур від напруги зворотного зміщення.

Зауважимо, що під час високотемпературних операцій можливе погіршення електрофізичних характеристик вихідного кремнію (ρ , τ , L_n) внаслідок утворення ГРЦ шляхом внесення неконтрольованих домішок чи дефектів структури [45-47]. Визначення чи оцінка кінцевих електрофізичних характеристик матеріалу є важливим науково-технічним завданням.

Визначити питомий опір матеріалу можна чотиризондовим методом [31], методом добротності, за допомогою ефекту Холла [84] та ін., але всі ці методи є руйнівними, та потребують спеціальної підготовки зразків. Нами запропоновано неруйнівний метод визначення (оцінки) питомого опору високоомної області $n^+ - p - p^+$ -структур та дифузійної довжини неосновних носіїв заряду, який базується на визначенні напруги зворотного зміщення, при якій чутливість ФД виходить в насичення [85-87]. Знаючи напругу, при якій чутливість ФД досягає насичення, можна визначити кінцевий питомий опір об'єму кристала і оцінити ступінь його деградації після термічних операцій. Слід зазначити, що чутливість фотодіода досягає максимального значення, коли коефіцієнт збирання носіїв заряду досягає максимального значення, тобто коли всі фотогенеровані носії заряду в базі фотодіода розподіляються $p - n$ переходом (2.24) [88].

$$\gamma = 1 - e^{-\alpha(W_i + L_n)} \quad (2.24)$$

де α – коефіцієнт поглинання.

Ця умова забезпечується в двох випадках: коли сума ширини ОПЗ і дифузійної довжини неосновних носіїв заряду сягає товщини p -області кристала ФД (2.25), або коли ширина ОПЗ стає рівною p -області кристалу ФД (2.26):

$$\begin{cases} X = L_n + W_i & (2.25) \end{cases}$$

$$\begin{cases} X = W_i & (2.26) \end{cases}$$

При деякій U_{zm} , виконується умова (2.25) і чутливість ФД виходить в насичення. Однак при подальшому збільшенні напруги зворотного зсуву ОПЗ продовжує розширюватися без зміни абсолютного значення чутливості. При певній напрузі ОПЗ займає всю високоомну область кристала ФД. Визначити напругу зміщення, при якій ОПЗ займає всю високоомну область кристала, можна, розглядаючи форму імпульсу вихідного сигналу ФД (Рис. 2.35). Форма імпульсу, яка відповідає умові (2.25) зображена на Рис. 2.35 (синя крива). Напруга, при якій форма імпульсу набуває правильної прямокутної форми і не змінюється зі збільшенням напруги зворотного зміщення (час

спадання та наростання сигналу не зменшується при збільшенні напруги зворотного зміщення), відповідає напрузі, при якій W_i максимальна ($U_{зм\ max}$) (умова 2.26) (Рис. 2.35 (чорна крива)).

Знаючи товщину кристалу та глибини залягання дифузійних шарів фосфору та бору можна визначити W_i (2.27), який відповідає умові (2.26) [88]:

$$W_i = X - (x_{n+-p} + x_{p+-p}) \quad (2.27)$$

Знаючи W_i , з (2.3), враховуючи, що $U_{зм} = U_{зм\ max}$, можна визначити концентрацію акцепторів у i -області кристала. З рівняння електропровідності напівпровідника p -типу [73], вважаючи, що при кімнатній температурі всі акцептори іонізовані ($p=N_A$), можна визначити ρ (2.28):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = eN_A\mu_p \quad (2.28)$$

Знаючи кінцевий питомий опір кремнію та напругу зміщення, при якій виконується умова (2.25), визначивши W_i при цій напрузі, з (2.25) можна визначити L_n .

Згідно описаної методики визначено L_n та ρ досліджуваних структур (Таблиця 2.5).

Таблиця 2. 5

Значення ρ та L_n ФД

Параметр	ФД _{n+-p-p+}	ФД _{n+-p-p+}	ФД _{n+-p}
ρ , кОм·см	14.7-15.7	11-11.6	8.5-9.5
L_n , мкм	70-80	50-55	-

Примітка: напругу, при якій ОПЗ сягав товщини i -області ФД_{n+-p} обрано напругу пробою $|U_{зм}| = 230$ В.

Дані Таблиці 2.5 показують, що ФД_{n+-p-p+} мають найменший ступінь деградації електрофізичних характеристик кремнію в процесі виготовлення ФД, відповідно, технологічний маршрут з проведенням ХДП пилової сторони

підкладки перед дифузією бору дозволяє отримати найбільш ефективні ФД з найменшими значеннями темнових струмів і ємності, а також найвищою чутливістю серед досліджуваних варіантів структур.

2.3.4. Вплив концентрації бору в p^+ -шарі на фотоелектричні властивості кремнієвих n^+-p-p^+ - структур та фотоприймачів на їх основі

Для встановлення оптимальної концентрації легованого бору (чи поверхневого опору) для найефективнішого геттерування в єдиному технологічному циклі виготовлено експериментальну партію ФД із різною тривалістю дифузії бору. Для досліджень використовувався монокристалічний кремній з $\rho=18-24$ кОм·см та $\tau=1,8-2,2$ мс.

Отримано експериментальну криву залежності N_0 та R_s p^+ -шару від тривалості дифузії (Рис. 2.44). Також отримано експериментальну криву залежності глибини p^+-p - переходу від тривалості дифузії (Рис. 2.45).

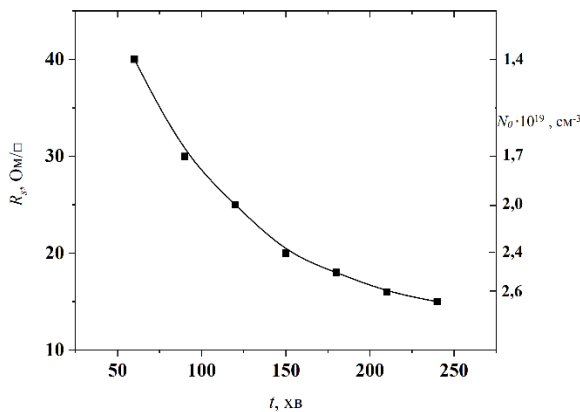


Рис. 2.44. Експериментальна крива залежності R_s та N_0 p^+ -шару від тривалості дифузії при $T=1253$ К.

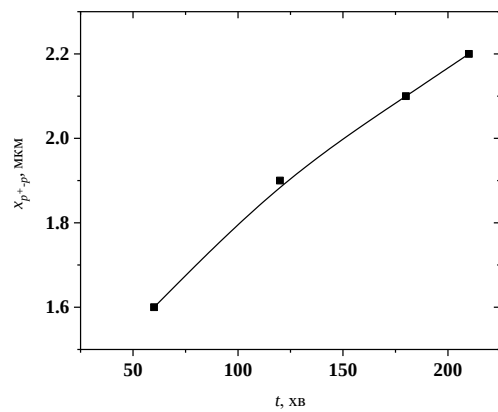


Рис. 2.45. Експериментальна крива залежності x_{p^+-p} від тривалості дифузії при $T=1253$ К.

Отримано значення I_m та S_{imn} ФД при різних R_s (Таблиця 2.6). Вказані параметри зразків до дифузії бору складали $I_m=250-350$ нА та $S_{imn}=0,38-0,4$ А/Вт.

Характерні значення I_m та S_{imn} при різних R_S ($|U_{зм}| = 120$ В)

R_S , Ом/□	I_m , нА				S_{imn} , А/Вт
	ФЧЕ 1	ФЧЕ 2	ФЧЕ 3	ФЧЕ 4	
40	120	160	205	150	0,42-0,43
30	60	70	80	65	0,43-0,45
25	40	55	40	50	0,44-0,47
18	30	25	30	25	0,46-0,5
16	20	20	20	25	0,48-0,5

Примітка.. Вимірювання чутливості проводилось із імітацією відбивання випромінювання від шару золота зі зворотної сторони без підшару хрому

З Табл. 2.6 можна побачити, що при $R_S=40$ Ом/□ параметр S_{imn} зріс на 5-10%, а при $R_S=16-18$ Ом/□ – на 20-30%. Зростання чутливості спричинене відновленням часу життя неосновних носіїв заряду внаслідок геттерування ГРЦ, набутих при попередніх термічних операціях. Відомо [37], що τ_{eff} обернено пропорційний до концентрації ГРЦ (2.26):

$$\tau_{eff} = \frac{\exp\left(\frac{E_D - E_i}{kT}\right)}{\sigma_{ss-n} N_D v_n} + \frac{\exp\left(\frac{E_i - E_D}{kT}\right)}{\sigma_{ss-p} N_D v_p} \quad (2.29)$$

де σ_{ss-n} , σ_{ss-p} – переріз захоплення електронів і дірок відповідно; E_D – енергетичний рівень ГРЦ; E_i – енергетичний рівень, що відповідає середині забороненої зони; k – стала Больцмана; T – температура; N_D – концентрація ГРЦ; v_n , v_p – середня відносна (відносно центру рекомбінації) швидкість теплового руху електронів і дірок, відповідно. .

Параметр I_m значно зменшується після дифузії бору. Так, при $R_S=40$ Ом/□ темновий струм ФЧЕ зменшився приблизно в 2 рази, а при $R_S=16-18$ Ом/□ – в 10 разів. Зниження рівнів темнових струмів відбувається за рахунок зменшення кількості ГРЦ та, відповідно, зниження об'ємної генераційної складової темногового струму (2.2) [37].

Зауважимо, що для отримання максимальної фоточутливості $p-i-n$ ФД

потрібно щоб падаюче випромінювання поглиналося в високоомній p -області. Для забезпечення цієї умови створюють шар Au з адгезійним підшаром Cr хрому зі зворотної сторони кристалу, який виконує роль дзеркала, яке відбиває значну частину випромінювання, що не поглинулося об'ємом кристала фотодіода і дійшло до тильного контакту. Товщина ж кристалу фотодіода, з урахуванням цього чинника, обирається 400 - 500 мкм, оскільки ІЧ випромінювання з довжиною хвилі $\lambda=1000$ нм поглинається в кремнії на глибині близько 1 мм [73]. Використання відбивання оптичного випромінювання тильним контактом дозволяє забезпечити подвійне проходження випромінювання через p -область кристала ФД і збільшити кількість фотогенерованих носіїв заряду [47]. Для збільшення кількості випромінювання, яке братиме участь у генерації носіїв заряду потрібно забезпечити високе пропускання n^+ - та p^+ -областей.

Для вивчення оптичних властивостей p^+ -шару отримано спектри пропускання кремнієвих підкладок однакової товщини легованих бором із різним R_S (Рис. 2.46).

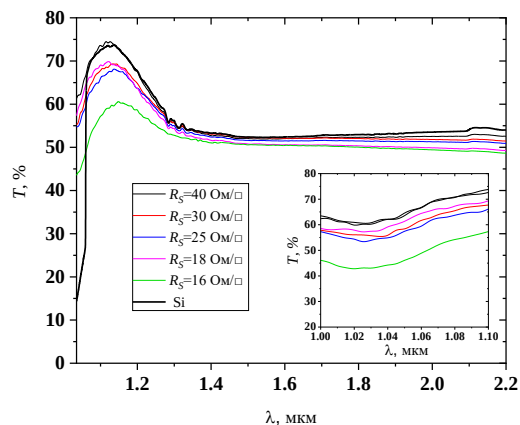


Рис. 2.46. Спектри пропускання кремнієвих підкладок із p^+ -шаром різного R_S .

З Рис. 2.46 видно, що при збільшенні R_S коефіцієнт пропускання зразків зменшується, це відбувається за рахунок збільшення поглинання випромінювання на домішкових атомах в p^+ -шарі, оскільки p -область має однаковий коефіцієнт пропускання для всіх зразків. Підкладка з $R_S=40$ Ом/□

має найвищий коефіцієнт пропускання із досліджуваних структур та фактично повторює спектр пропускання кремнію. Зразок з $R_S=16 \text{ Ом}/\square$ володів найнижчим коефіцієнтом пропускання в усьому досліджуваному діапазоні довжин хвиль. Щодо зразків із $R_S=18-30 \text{ Ом}/\square$, то в діапазоні 1-1,5 мкм криві їх спектральних характеристик відрізняються на одиниці відсотків.

Коефіцієнт пропускання зразків при $\lambda = 1,05 \text{ мкм}$ із $R_S=16 \text{ Ом}/\square$ приблизно на 15% нижчий, ніж зразків із $R_S=18 \text{ Ом}/\square$, та на 20% нижчий ніж зразки із $R_S=40 \text{ Ом}/\square$, але при більшій тривалості дифузії відбувається ефективніше геттерування, відповідно зразки з $R_S=18 \text{ Ом}/\square$ та $R_S=16 \text{ Ом}/\square$ дозволяють отримати співмірні значення фотоелектричних параметрів.

Висновки до другого розділу

В другому розділі досліджено вплив електрофізичних характеристик кремнію на кінцеві параметри ФД, а також вплив легування n^+ - та p^+ -шарів фосфором та бором відповідно на параметри n^+-p-p^+ - фотоструктур. Під час досліджень зроблено наступні висновки:

1. Фотодіоди, виготовлені на основі кремнію з більшим питомим опором, більш схильні до утворення інверсійних каналів на межі розділу оксид-напівпровідник. Це викликано тим, що зміну поверхневого типу провідності підкладки матеріалу з більшим питомим опором спричинює менша кількість неконтрольованих домішок. Зразки з більшим питомим опором базового матеріалу мають менший ізоляційний опір між чутливими елементами, оскільки цей параметр залежить від густини поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂ та наявності інверсійних шарів, які в свою чергу залежать від технології утворення SiO₂.

2. Темновий струм і фоточутливість ФД з вищим питомим опором базового матеріалу сягають насичення при нижчій напрузі зворотного зміщення внаслідок досягнення ОПЗ максимальної ширини при нижчих

напругах.

3. При збільшенні концентрації фосфору (зменшенні поверхневого опору R_S) в n^+ -шарі спостерігається зниження темнових струмів фоточутливих елементів внаслідок збільшення ефективності геттерування генераційно-рекомбінаційних центрів (при $R_S \approx 8,1 \text{ Ом}/\square$ $I_m = 350\text{-}700 \text{ нА}$, при $R_S \approx 1,9\text{-}2,4 \text{ Ом}/\square$ $I_m = 25\text{-}30 \text{ нА}$ ($U_{zm} = -120 \text{ В}$)).

4. Легування бором тилової сторони підкладки фотоприймача значно покращує його параметри. Встановлено що p^+ -шар виконує функцію не лише кращого омичного контакту, а і додаткову функцію геттеру дефектів кристалічної ґратки. Про це свідчить зниження темнових струмів ФД після дифузії бору на порядок. Під час операції дифузії бору n^+ -шар також функціонує як геттер.

5. Хіміко-динамічне полірування тилової сторони підкладок перед дифузією бору зменшує темнові струми фотоприймачів і покращує кінцеві електрофізичні характеристики кремнію, зокрема, питомий опір високоомної області та довжину дифузії неосновних носіїв заряду внаслідок видалення неконтрольованих домішок із товщі кремнію зі зворотної сторони (близько 10-20 мкм), які є рекомбінаційними центрами та можуть дифундувати на більшу глибину під час тривалої останньої термічної операції ($I_m = 300\text{-}350 \text{ нА}$ в ФД з ХДП тилової сторони, $I_m = 550\text{-}650 \text{ нА}$ в ФД без ХДП тилової сторони перед дифузією бору).

6. Фотодіоди, виготовлені без p^+ -шару, характеризуються електричним пробом p - n переходу в діапазоні зворотних напруг 230-260 В, що значно підвищує їх чутливість і фотострум ($S_{imn} \geq 0,7 \text{ А/Вт}$). Такі структури можна рекомендувати для створення лавинних фотодіодів. Причиною пробому є досягнення ОПЗ дефектної тилової сторони підкладки, де, в свою чергу, ці дефекти можуть бути джерелами носіїв заряду, а також досягненням ОПЗ тилової металізації, яка утворює бар'єр Шоткі із кремнієм.

7. Для отримання максимальної фоточутливості p - i - n ФД потрібно щоб

падаюче випромінювання поглиналося в високоомній i -області. Для збільшення кількості випромінювання, яке братиме участь у фотогенерації носіїв заряду потрібно забезпечити високе пропускання n^+ - та p^+ -областей. Оптимальними значеннями поверхневого опору після дифузії фосфору та бору, які забезпечують належний рівень геттерування та високе пропускання n^+ - та p^+ - шарів, є $R_S \approx 2,7-3$ Ом/□, та $R_S \approx 16-18$ Ом/□ відповідно. Такі значення поверхневого опору дозволяють отримувати фотодіоди з покращеними параметрами: значення темного струму $I_m \leq 30$ нА та імпульсної чутливості $S_{imp.} \approx 0,48-0,5$ А/Вт при $U_{zm} = -120$ В.

Розділ 3. ПЕРСПЕКТИВНІ СТРУКТУРИ КРЕМНІЄВИХ $p-i-n$ ФОТОДІОДІВ

3.1. Кремнієвий $p-i-n$ фотодіод із відрізаючим світлофільтром та оптичним концентратором

3.1.1. Матеріали для виготовлення абсорбційних фільтрів для ближньої ІЧ-області

Фотоприймачі для виявлення монохроматичного лазерного випромінювання набувають все більшого поширення. Найпоширенішими детекторами випромінювання є кремнієві $p-i-n$ ФД, які є первинними перетворювачами у фотоприймальних пристроях. Одним із завдань ФД є реєстрація лазерного випромінювання YAG лазера з довжиною хвилі $\lambda=1,05$ мкм. Однією з основних проблем детектування оптичного випромінювання є наявність електричних (шум, створений напівпровідниками або підсилювачем) і оптичних (випромінювання, що генерується фоновими джерелами, такими як освітлювальні прилади, Сонце і т. д.) завад. Виявлення монохроматичного сигналу може призвести до того, що випромінювання із заданою довжиною хвилі буде генерувати значно менший фотострум, ніж фонове випромінювання, що унеможливить отримання корисної інформації [89-91]. Проблема наявності електричних завад усувається шляхом вдосконалення структури кристалів фотодіодів або схемотехнічних рішень. Зокрема, методи отримання фотодіодних кристалів зі зменшеними значеннями темнових струмів наведено в роботах [91-93]. В роботах [91, 94, 95] описано принципи використання та вдосконалення схем автоматичного регулювання підсилення.

Мінімізація впливу завад оптичного походження найчастіше забезпечується застосуванням різних типів оптичних фільтрів, зокрема

інтерференційних смугових фільтрів або абсорбційних відрізаючих фільтрів. Якісні інтерференційні смугові фільтри характеризуються високим (близько 90%) коефіцієнтом пропускання і можуть ізолювати вузькі ділянки спектра (до 15-20 Å) [96, 97]. Недоліком інтерференційних оптичних фільтрів є наявність значного фону за межами смуг пропускання та значна залежність положення цих смуг від кута падіння світла, тобто мала кутова апертура. Такі фільтри дорогі, складні у виготовленні, потребують спеціального обладнання, дорогих матеріалів для створення шарів і програм розрахунку.

Абсорбційні фільтри - найпоширеніший клас оптичних фільтрів, які мають спектральну селективність за рахунок неоднакового поглинання світла в різних діапазонах довжин хвиль випромінювання. Послаблення світла в них відбувається в основному за рахунок поглинання речовиною фільтра. Часткове ослаблення світла також спричинене відбиттям від поверхонь фільтра. Найпоширенішими є скляні поглинаючі світлофільтри, в яких використовуються кольорові скла або плівки. Особливістю таких світлофільтрів є широка смуга пропускання, яка сягає тисяч ангстрем [96]. Прикладом такого фільтра є скло ІКС-7, яке не пропускає оптичне випромінювання з $\lambda \leq 900-950$ нм і має коефіцієнти пропускання шару скла товщиною 1 мм при $\lambda = 1,05$ мкм близько $T \approx 60-65\%$ для скла категорії 5 і $T \approx 80-85\%$ для скла категорії 2 [98]. Вартість такого скла відносно невелика, тому абсорбційні поглинаючі фільтри знаходять застосування завдяки співвідношенню ціна-якість.

Недоліком абсорбційних світлофільтрів є зміна спектральних характеристик під впливом нагрівання, викликана поглинанням світла. Як видно з вищесказаного, пошук оптимальних методів уникнення впливу фонового випромінювання на значення корисного сигналу є актуальною науково-технічною задачею і активно досліджується. Але варто зазначити, що деякі напівпровідникові матеріали також мають здатність поглинати певні ділянки спектра випромінювання. До них відносяться арсенід галію, телурид

кадмію, сульфідів та селенідів цинку.

Що стосується GaAs, то край поглинання цього напівпровідника розташований в області $\lambda \approx 900$ нм, а фільтр товщиною 400 мкм при $\lambda = 1,05$ мкм характеризується $T \approx 50\%$ [99]. Згідно з [100], CdTe пропускає оптичне випромінювання з $\lambda \geq 600-750$ нм, а плівка товщиною близько 700 нм має коефіцієнт пропускання при $\lambda = 1,05$ мкм близько $T \approx 60\%$ і коефіцієнт відбивання $R \approx 15-20\%$. Недоліком фільтрів на основі телуриду кадмію є складність отримання плівок стехіометричного складу через різницю парціальних тисків Cd і Te. Згідно з [101], ZnS пропускає оптичне випромінювання з $\lambda \geq 320-340$ нм, а плівка товщиною близько 10 мкм, осаджена при $T = 373$ К, має коефіцієнт пропускання при $\lambda = 1,05$ мкм близько $T \approx 90\%$. Згідно з [102], ZnSe пропускає оптичне випромінювання з $\lambda \geq 420-430$ нм, а плівка товщиною близько 0,2-0,8 мкм, нанесена при $T = 573$ К, має коефіцієнт пропускання при $\lambda = 1,05$ мкм близько $T \approx 70\%$.

Згідно з даними, наведеними в джерелах, з описаних матеріалів оптимальним напівпровідником для створення оптичного відрізаючого фільтра для $\lambda = 1,05$ нм є GaAs, оскільки його власний край поглинання є найближчим до робочої довжини хвилі. За своїми властивостями фільтр з арсеніду галію подібний до абсорбційного фільтра зі скла ІКС-7, але є значно дорожчим матеріалом.

Проте, кращим напівпровідниковим матеріалом для виготовлення відсічних оптичних фільтрів на $\lambda = 1,05$ нм, ніж GaAs, є кремній, власний край поглинання якого знаходиться в області $\lambda \approx 1000$ нм [103]. Відповідно, в цьому розділі буде описано виготовлення та дослідження відрізаючого абсорбційного кремнієвого фільтра в поєднанні із *p-i-n* ФД.

3.1.2. Виготовлення кремнієвих світлофільтрів

Дослідження проводили на кремнієвих чотириелементних *p-i-n* ФД,

призначених для детектування випромінювання з довжиною хвилі $\lambda=1,05$ мкм. Вихідним матеріалом був монокристалічний бездислокаційний кремній p -типу з орієнтацією [111], питомим опором $\rho \approx 18-22$ кОм·см і часом життя неосновних носіїв заряду $\tau \approx 1,8-2,2$ нс [102, 103].

Кремнієві оптичні фільтри були виготовлені з того ж матеріалу, що і кристали фотодіодів [104]. Зразок фільтра товщиною 500 мкм пропускав випромінювання з $\lambda \geq 1000$ нм, але мав коефіцієнт пропускання близько 30% при $\lambda=1,05$ мкм (Рис. 3.1), тому було вирішено сформувати на пластинах противідбиваюче покриття для зменшення коефіцієнта відбивання від поверхні та дослідити фільтри меншої товщини для збільшення коефіцієнта пропускання. Виготовлено світлофільтри різних товщин, але зразки із товщиною нижче 150-200 мкм володіли низькою механічною міцністю.

Для зменшення товщини фільтрів нижче 200 мкм та для збільшення їх коефіцієнта пропускання без втрат механічної міцності запропоновано стоншувати фільтр лише в зонах, які є проекціями фоточутливих елементів [92, 105], периферію світлофільтра залишати достатньої товщини для забезпечення належної механічної міцності. Це проводилось шляхом травлення кремнію методом ХДП із маскуючим золотим покриттям з підшаром хрому (Рис. 3.2).

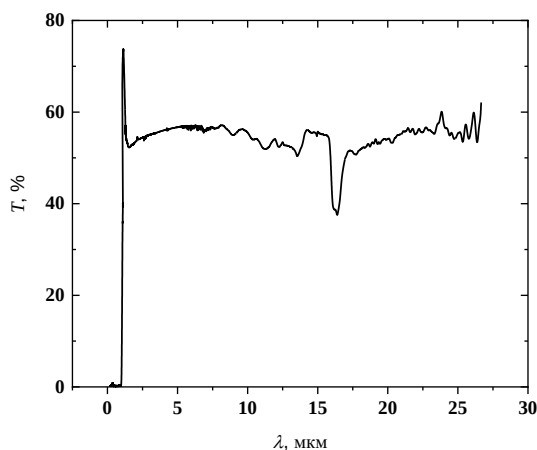
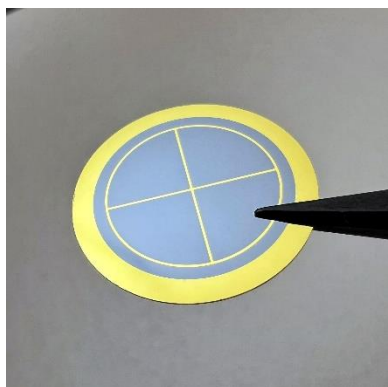


Рис. 3.1. Спектр пропускання кремнієвої пластини 500 мкм без противідбиваючого покриття.



а)



б)

Рис. 3.2. Фільтр із Au-маскуючим покриттям до травлення (а) та світлофільтр із витравленими проекціями ФЧЕ (б).

Отримані фільтри приклеювалися до вхідного вікна фотодіода за допомогою оптичного клею. Було проведено порівняння параметрів ФД без фільтра (Рис. 3.3а) та з фільтром (Рис. 3.3б).



а)



б)

Рис. 3.3. Фотодіоди без світлофільтра (а) та із фільтром з утвореними проекціями ФЧЕ(б).

3.1.3. Дослідження параметрів фотодіодів із світлофільтрами

Спектри відбивання світлофільтра з противідбиваючим покриттям та без нього можна побачити на Рис. 3.4. З цього рисунку можна побачити, що при $\lambda=1,05$ мкм коефіцієнт відбивання світлофільтра без просвітляючого покриття складає близько $R \approx 30-32\%$, а з покриттям $R \approx 10-12\%$ [106, 107].

Також отримано спектри пропускання кремнієвих оптичних фільтрів з

просвітлюючим покриттям в залежності від товщини зразка (Рис. 3.5). Досліджувалися зразки товщиною $d=70$ мкм, $d=170$ мкм, $d=240$ і $d=280$ мкм.

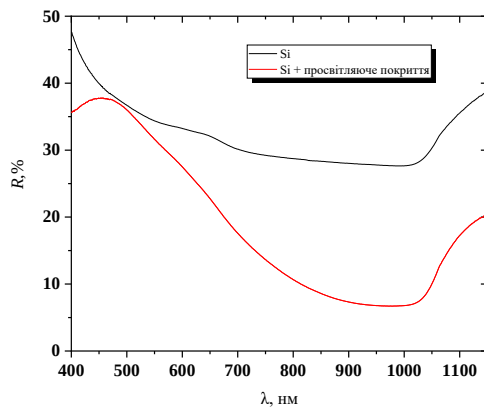


Рис. 3.4. Спектри відбивання світлофільтрів з та без просвітлюючого покриття.

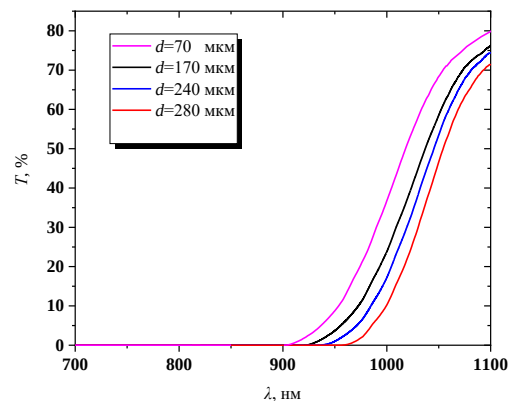


Рис. 3.5. Спектри пропускання світлофільтрів різної товщини.

З Рис. 3.5 видно, що при збільшенні товщини фільтра коефіцієнт його пропускання зменшується через зменшення інтенсивності випромінювання при поширенні в поглинаючому середовищі відповідно до закону Бугера-Ламберта-Бера [108]:

Відомо [101], що випромінювання з $\lambda=1,05$ нм повністю поглинається в кремнії товщиною 1 мм, відповідно, виготовлення фільтра з такою товщиною є недоцільним. Зауважимо, що при зменшенні товщини фільтра (коефіцієнт пропускання збільшується), його край поглинання зміщується в бік коротших довжин хвиль. Так, фільтр з $d=70$ мкм пропускає випромінювання з $\lambda \geq 900-910$ нм, фільтр з $d=170$ мкм пропускає випромінювання з $\lambda \geq 920-930$ нм, а фільтр з $d=280$ мкм - з $\lambda \geq 960-970$ нм (Рис. 3.5).

Досліджено імпульсну монохроматичну чутливість (при $U_{зм}=-120$ В) при $\lambda=1,05$ мкм ФД з фільтрами різної товщини. Чутливість кристалів фотодіодів без фільтра сягала 0,48-0,5 А/Вт. Зауважимо, що близько 8-10 % від значення чутливості зменшує поглинання випромінювання вхідним вікном і клеєм. Також для порівняння було досліджено пропускання фільтрів з

протівідбиваючим покриттям з лише одного боку (T') та чутливість (S'_{imn}) кінцевих ФД з такими фільтрами. Результати вимірювань наведено в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Коефіцієнт пропускання фільтрів різної товщини на робочій довжині хвилі та чутливість ФД з відповідними фільтрами.

d, мкм	70	170	240	280
T, %	75	66	62	57
T', %	61	53	50	46
S_{imn}, А/Вт	0,33-0,35	0,29-0,3	0,26-0,27	0,24-0,25
S'_{imn}, А/Вт	0,26-0,28	0,22-0,23	0,2-0,21	0,18-0,19

З Таблиці 3.1 видно, що формування просвітляючого покриття лише з одного боку фільтра зменшує коефіцієнт пропускання на 11-14%. Також видно, що при використанні фільтра товщиною 170 мкм, з урахуванням поглинання випромінювання на вхідному вікні і клею, можна отримати близько 60% від чутливості фотодіода без фільтра, а при використанні світлофільтра товщиною 70 мкм – 70%. При збільшенні товщини фільтра цей показник зменшується.

Були отримані відносні спектральні характеристики струмової чутливості фотодіодів з фільтрами різної товщини і без фільтра (Рис. 3.6).

З Рис. 3.6 видно, що використовуваний ФД є чутливим до діапазону довжин хвиль 400-1200 нм, відповідно, для ефективного використання ФД для детектування випромінювання з робочою довжиною хвилі вплив фоновго випромінювання має бути зведений до мінімуму або виключений. Запропоновані оптичні фільтри є відрізаючими і поглинають фонове випромінювання з $\lambda \leq 800$ нм. При $\lambda > 1,05$ мкм чутливість ФД різко падає, та при $\lambda > 1200$ нм ФД стає нечутливим. З Рис. 3.6 видно, що при збільшенні товщини фільтра максимум його спектральної характеристики зміщується в

бік більших довжин хвиль. Так, ФД з фільтром $d=70$ мкм має максимум спектральної характеристики при $\lambda_{max}=1025$ нм, $d=170$ мкм - $\lambda_{max}=1040$ нм, при $d=240$ мкм - $\lambda_{max}=1043$ нм, при $d=280$ мкм - $\lambda_{max}=1045$ нм. Зауважимо, що ФД з оптичним фільтром з $d=430$ мкм має максимум спектральної характеристики при $\lambda_{max}=1060$ нм, але має низький коефіцієнт пропускання через значну товщину.

Варто зазначити, що збільшення напруги зворотного зміщення призводить до зміщення максимуму спектральної характеристики ФД в сторону більших довжин хвиль [89-91]. Це відбувається і в випадку використання світлофільтра (Рис. 3.7). При збільшенні $U_{зм}$ короткохвильовий край чутливості та максимум спектральної характеристики зміщується в сторону більших довжин хвиль. Зміщення відбувається до досягнення напруги насичення та виконання умови (2.22).

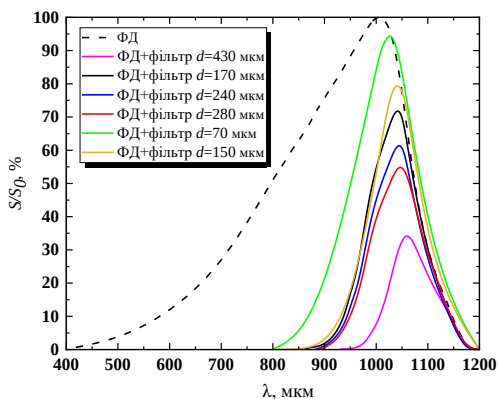
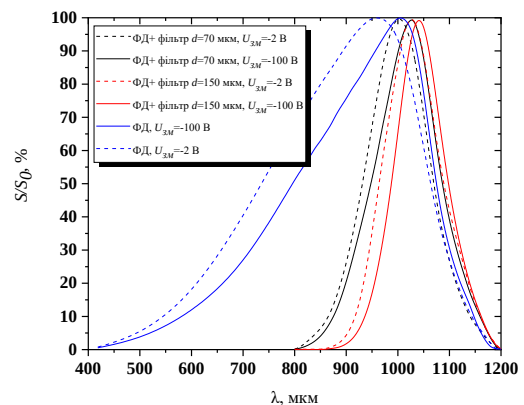


Рис. 3.6. Спектральні характеристики фотодіодів з світлофільтрами різних товщин ($U_{зм}=-120$ В).



характеристики фотодіодів з світлофільтрами $d=70$ мкм та $d=150$ мкм при $U_{зм}=-2$ В та $U_{зм}=-100$ В. Характеристики приведені до 100%

3.1.4. Фотодіод із світлофільтром та оптичним концентратором

Для компенсації поглинутого випромінювання абсорбційними світлофільтрами використовують конструкції ФД з оптичними

концентраторами [109]. Ці пристрої призначені для концентрації світла на активній ділянці фотодіода, тим самим збільшуючи кількість світла, яке може бути перетворене в електричні сигнали [110, 111].

В попередньому розділі наведено розробку абсорбційного відрізаючого фільтра на основі кремнію, який забезпечує робочий діапазон довжин хвиль фотодіода $\lambda = 800-1150$ нм, але поглинає до 30-40% випромінювання. Нами також досліджено можливість використання оптичного концентратора в комбінації з вищезгаданим фільтром і кремнієвим одноелементним *p-i-n* ФД [104]. На ринку ФД з оптичними концентраторами, чутливі в досліджуваному діапазоні довжин хвиль, представлені наступними зразками: серії S6801/S6968 [112] та S6036 [113] (Hamamatsu Photonics, Японія), VTP1232H [114], VTP1112H [115] та VTP1332H [116] (Excelitas Technologies Corp., Канада). Серії S6801/S6968 та S6036 - це *p-i-n* ФД з оптичними концентраторами (S6801 з діапазоном спектральної чутливості $\lambda = 320-1100$ нм, S6968 з $\lambda = 320-1060$ нм, S6036 з $\lambda = 320-1100$ нм) та оптичними концентраторами з фільтрами (S6801-01 з $\lambda = 700-1100$ нм, S6968-01 з $\lambda = 700-1060$ нм, S6036-01 з $\lambda = 760-1100$ нм). VTP1232H і VTP1112H - ФД з оптичними концентраторами і спектральним діапазоном $\lambda = 400-1100$ нм і $\lambda = 400-1150$ нм відповідно. VTP1332H - ФД з оптичним концентратором і вбудованим фільтром видимого діапазону ($\lambda = 725-1150$ нм).

Дослідження проводили на кремнієвих одноелементних *p-i-n* ФД з p^+ -ОК та площею ФЧЕ $A=28.3$ мм² (Рис. 3.8), призначених для детектування випромінювання з довжиною хвилі $\lambda=1,05$ мкм і робочою напругою зміщення $U_{зм}=-10$ В. Використовувався кремнієвий світлофільтр з товщиною $d=170$ мкм та коефіцієнтом пропускання $T=65\%$. Світлофільтр був розміщений між кристалом і оптичним концентратором (Рис. 3.9). Оптичним концентратором була плоско-опукла збиральна лінза з радіусом кривизни $R = 5,265$ мм, фокусною відстанню $F = 11,5$ мм і показником заломлення $n = 1,489$. Відстань між лінзою та чутливим кристалом становила 3 мм. Було виготовлено ФД з

фільтром і лінзою (Рис. 3.10а) та лише з лінзою (Рис. 3.10б).

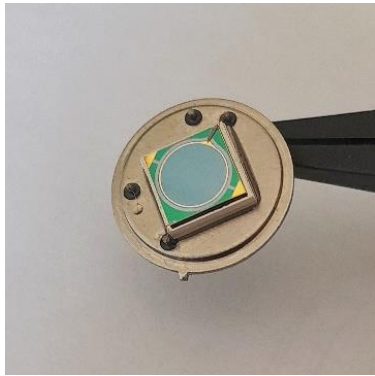


Рис. 3.8. Кристал ФД.

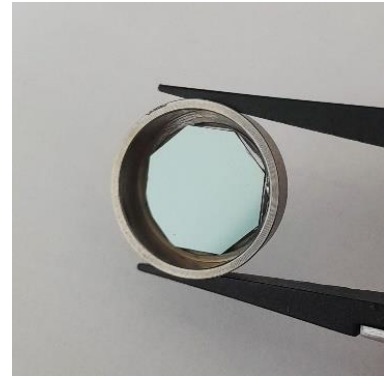


Рис. 3.9. Світлофільтр.



а)



б)

Рис. 3.10. ФД зі світлофільтром та оптичним концентратором (а); ФД з оптичним концентратором (б).

Струмова монохроматична чутливість на модульованому потоці S_L контролювалася для фоточутливого кристала (ФД_С), кристала зі світлофільтром (ФД_Ф), кристала з лінзою (ФД_Л) і кристала зі світлофільтром і лінзою (ФД_{Ф+Л}). Для оцінки максимально можливої напруги зворотного зміщення на фотодіоді або напруги пробою була отримана темнова ВАХ (Рис. 3.11). Як показано на рисунку 3.11, темновий струм ФД зростає зі збільшенням напруги зворотного зміщення. Це спричинено розширенням області просторового заряду по товщині кристала і по поверхні. Але також видно, що міра збільшення темнового струму при $|U_{зм}| < 30$ В менша, ніж при $|U_{зм}| \geq 30$ В. Це можна пояснити тим, що до напруги 30 В розширення ОПЗ ФЧЕ по поверхні обмежується p^+ -ОК а при $|U_{зм}| \geq 30$ В ОПЗ

розширюється на ширину, яка виходить за межі ОК, внаслідок чого за межами ОК ОПЗ виходить на поверхню пластини і провокує більш різке збільшення темнового струму через наявність поверхневих станів та інверсійних шарів [10].

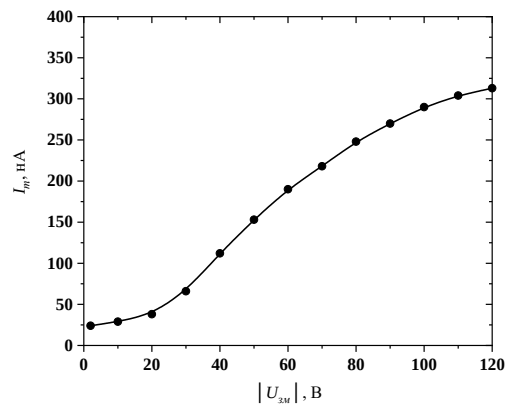


Рис. 3.11. Зворотна темнова ВАХ ФД.

Варто зазначити, що зі збільшенням напруги зміщення поверхневий пробій не відбувається (в досліджуваному діапазоні напруг), що дає можливість використовувати цей ФД при більш високих зворотних напругах. Слід зазначити, що при оцінці напруги пробою аналогів видно, що у VPT1332H пробій може відбутися при $|U_{зм}| \geq 30 \text{ В}$ [116], а у VTP1112H при $|U_{зм}| \geq 50 \text{ В}$ [115]. А в [112, 143] вказано, що ФД серій S6801/S6968 та S6036 мають максимальну робочу напругу $|U_{зм}| = 20 \text{ В}$. Слід також зазначити, що отримані фотодіоди мають темновий струм того ж порядку, що і їх аналоги (при $|U_{зм}| = 10 \text{ В}$).

З рисунку 3.12 видно, що чутливість фотодіода зростає зі збільшенням напруги, і при $|U_{зм}| = 80\text{-}90 \text{ В}$ досягає насичення. Насичення настає в момент розширення ОПЗ на всю товщину кристала, оскільки подальше її розширення не відбувається, і, відповідно, не відбувається збільшення коефіцієнта збору неосновних носіїв заряду, що є визначальним фактором збільшення чутливості [2].

Також було отримано значення чутливості при напрузі $U_{зм} = -10$ для ФД без фільтра та з фільтром, тільки з лінзою, а також з лінзою і фільтром. Вимірювання чутливості проводили у випадку фокусування лазерного випромінювання на поверхні ФД за допомогою збиральної лінзи та у випадку формування монохроматичного паралельного потоку випромінювання (Табл. 3.2).

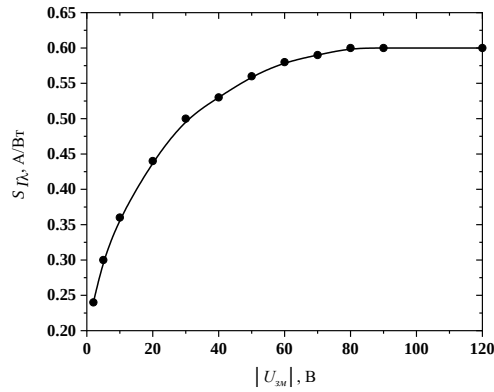


Рис. 3.12. Графік $S_{DL}(U_{зм})$ при $\lambda=1,05$ мкм кристала ФД.

Таблиця 3.2.

Значення S_{DL} фотодіодів різних конфігурацій при $U_{зм}=10$ В

Метод вимірювання	Фокусоване лазерне випромінювання	Паралельний лазерний потік
ФДС	0.36-0.37	0.36-0.37
ФДФ	0.23-0.24	0.23-0.24
ФДЛ	0.64-0,65	0,86-0,90
ФДФ+Л	0.42-0.43	0,56-0,59

Як видно з Таблиці 4.2, використання світлофільтра знижує чутливість ФД на 35%. Слід також зазначити, що результати вимірювань ФДС та ФДФ не відрізняються у зразках без оптичного концентратора. При використанні лінзи чутливість фотодіода збільшується в 1,7 рази при вимірюванні в режимі сфокусованого лазерного променя, і в 2,5 рази при вимірюванні без фокусуючої лінзи на випромінювачі. Різниця між вимірюваннями в цих двох режимах пояснюється тим, що в другому випадку освітлюється більша площа оптичного концентратора. Слід зазначити, що площа чутливого елемента ФД сягала $28,3 \text{ мм}^2$, а при використанні лінзи ефективна площа фотоприймача збільшується до 122 мм^2 .

Використання лінзи дозволяє економити напівпровідниковий матеріал, оскільки дозволяє використовувати кристали малої площі. З Таблиці 3.2 також видно, що використання оптичного концентратора і світлофільтра в одній

конструкції фотоприймача дозволяє нівелювати втрати випромінювання за рахунок поглинання фільтром і збільшити значення чутливості.

Також було отримано спектральну характеристику чутливості кристала фотодіода та фотоприймача зі світлофільтром і лінзою (Рис. 3.13). Для порівняння також наведено спектральні характеристики аналогів, представлених на ринку.

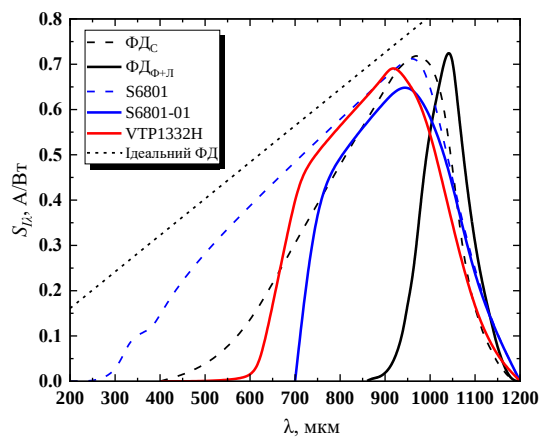


Рис. 3.13. Графік $S_{\lambda}(\lambda)$ ФД_с, ФД_{ф+л} та аналогів.

Для детального аналізу наведено порівняльну таблицю параметрів отриманих фотодіодів та аналогів (Табл. 3.3). Як видно з Рис. 3.13 і Табл. 3.3, ФП з використаними нами фільтром і оптичним концентратором є чутливим в діапазоні $\lambda = 900-1200$ нм з максимумом при $\lambda_{max} = 1040$ нм. Цій довжині хвилі відповідає чутливість $S_{max}=0,73$ А/Вт. Зауважимо, що фільтри наведених аналогів менш селективні і пропускають ширший діапазон довжин хвиль, вони оптимізовані для довжин хвиль $\lambda=920$ нм і $\lambda=970$ нм. Варто зазначити, що фільтри вищезгаданих аналогів не зміщують максимум спектральної характеристики фотодіодів, на відміну від виготовленого нами. Для порівняння на Рис. 3.13 також наведено спектральні характеристики ФД S6801, який є зразком з оптичним концентратором без світлофільтру та ФД_с. З цього рисунка видно, що ФД_с без оптичного концентратора має таку ж чутливість, як і аналог з оптичним концентратором, і має максимум в тому ж діапазоні довжин хвиль. Також відзначимо, що ФД_с має значно менший вплив короткохвильового фонових випромінювання на рівень корисного сигналу, ніж аналог, і є чутливим при $\lambda \geq 400$ нм, на відміну від $\lambda \geq 300$ нм у ФД

S6801. Зсув спектрального мінімуму чутливості свідчить про використання різної глибини p - n переходу чутливих елементів.

Таблиця 3.3.

Порівняльна таблиця параметрів отриманих фотоприймачів та аналогів на ринку

ФД	S6801 [112]	S6801-01 [112]	ФДс	ФДФ+Л	ВТР1332Н [116]
$ U_{зм} $, В	10	10	10	10	10
$ U_{зм\ max} $, В	20	20	-	-	30
λ_{max} , нм	960	960	970	1040	920
S_{max} , А/Вт	0.72	0.68	0.72	0.73	0.7
Спектральний діапазон чутливості, нм	320-1100	700-1100	400-1200	900-1200	725-1100
Напівкут, градуси	± 35	± 35	± 35	± 43	± 20
$I_{т}$, нА	10	10	30	30	25
Діаметр лінзи, мм	14	14	-	11	5
$S_{ФЧЕ}$, пФ	80	80	30	30	-
Ефективна площа ФЧЕ, мм ²	150	150	28,3	122	-

Отримані фотодіоди можуть конкурувати з ФП з оптичними концентраторами і світлофільтрами на світовому ринку і навіть можуть бути кращими серед аналогічних зразків за ємністю, чутливістю, градусом напівкута та іншими показниками.

3.2. Низьковольтний фотодіод з підвищеним коефіцієнтом збирання носіїв заряду

3.2.1. Розрахунки коефіцієнта збирання носіїв заряду та чутливості фотодіодів

У напівпровідникових фотоелектричних пристроях, які перетворюють енергію випромінювання в електричну енергію, необхідно, щоб більша частина падаючого випромінювання поглиналася в об'ємі напівпровідника, оскільки випромінювання, відбите від поверхні або пройдене через напівпровідник, втрачається даремно. Одним з видів взаємодії випромінювання з напівпровідником, який лежить в основі принципу роботи більшості фотоелектричних пристроїв, є генерація носіїв заряду під дією фотонів. Тобто, якщо структура з p - n переходом піддається впливу випромінювання в діапазоні довжин хвиль, що відповідає власному поглинанню в напівпровіднику, то в об'ємі напівпровідника під впливом випромінювання генеруються електронно-діркові пари. Якщо всі електронно-діркові пари, створені випромінюванням, що падає на прилад, будуть розділені полем p - n переходу і утворять струм у зовнішньому ланцюзі, то ефективність перетворення струму буде максимальною. Ефективність випромінювання, що проникає в напівпровідник, характеризується коефіцієнтом збору носіїв заряду, який є відношенням кількості носіїв заряду, розділених полем p - n переходу, до кількості фотонів, що проникають в напівпровідник [117]:

$$\gamma = \frac{I_{sc}}{eN_{\phi}} \quad (3.1)$$

де I_{sc} - струм короткого замикання зовнішнього кола фотоприймача; N_{ϕ} - кількість фотонів.

У цьому випадку припускається, що один фотон створює одну електронно-діркову пару в напівпровіднику, тобто квантовий вихід фотоперетворення дорівнює одиниці. Для ідеального фотоприймача коефіцієнт збирання дорівнює одиниці у всьому діапазоні довжин хвиль, до яких чутливий даний напівпровідник. У реальних пристроях через різні втрати він менший за одиницю; ця різниця викликана також тим, що частина носіїв, створених випромінюванням, рекомбінує між собою або на домішкових центрах ще до того, як досягне p - n переходу [117]. Втрати носіїв за рахунок рекомбінації залежать від структури фотоприймача, геометричних товщин n - і p -областей, розподілу концентрації домішок в n - і p -областях, дифузійних довжин неосновних носіїв заряду тощо [118].

Від коефіцієнта збирання носіїв заряду залежать чутливість і фотострум фотоприймача, як його основні параметри. З розвитком оптоелектроніки та фотоелектроніки зростає потреба у виготовленні фотоприймачів з максимальною чутливістю і, відповідно, з максимальним коефіцієнтом збирання.

Перед виготовленням ФД варто теоретично оцінити його коефіцієнт збирання носіїв заряду та кінцеву чутливість при використанні заданих характеристик топології приладу. Запропоновано методику розрахунку γ p - i - n ФД [119]. Нище наведено методику розрахунку для ФД товщиною $X=500$ мкм, з $x_{n+p} \approx 5$ мкм, $x_{p+-p} \approx 1$ мкм, для детектування випромінювання $\lambda = 1,05$ мкм при $U_{зм} = -2$ В.

Щоб мати можливість визначити коефіцієнт збору носіїв заряду, необхідно визначити, яка інтенсивність випромінювання (в відносних одиницях) поглинається в товщині напівпровідника, що дорівнює сумі ширини області просторового заряду і довжини дифузії неосновних носіїв заряду (L_n), оскільки фотогенеровані носії заряду лише в цих областях будуть розділені електричним полем. Схематичне зображення фотодіода з різними шарами показано на рисунку 3.14.

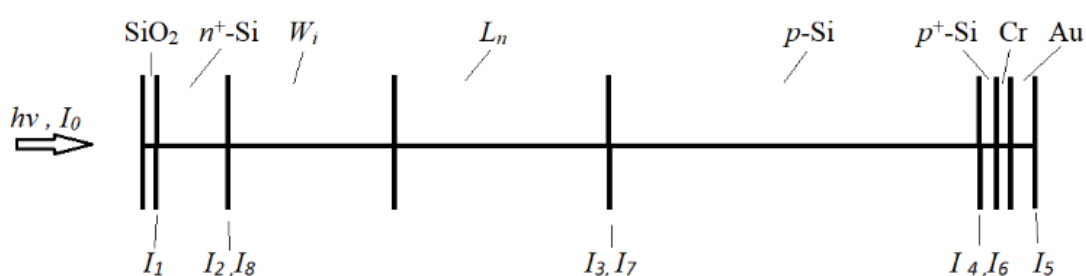


Рис. 3.14. Пошарове схематичне зображення p - i - n фотодіода.

Інтенсивності випромінювання визначаємо за законом Бугера-Ламберта-Бера [108]:

$$I(x) = I_0[1 - R]e^{-\alpha x}, \quad (3.2)$$

де $I(x)$ - інтенсивність світла, що пройшло через шар речовини товщиною x , I_0 - інтенсивність світла на вході в речовину, $R=5\%$ [120]

Спочатку необхідно визначити коефіцієнт пропускання n^+ - і p^+ -шарів (Рис. 2.20, 2.35).

В роботах [27, 46, 121-123] ми встановили, що оптимальними значеннями поверхневого опору n^+ - і p^+ -шарів після дифузії фосфору та бору є $R_S = 2,7 \text{ Ом}/\square$ та $R_S = 18 \text{ Ом}/\square$ відповідно. Наведемо розрахунки коефіцієнта збирання заряду при цих значеннях.

На поверхню ФД потрапляє випромінювання I_0 , інтенсивність якого після проходження через противідбиваюче покриття буде I_1 :

$$I_1 = I_0(1 - R) \quad (3.3)$$

У n^+ -шарі визначення кількості поглинутого випромінювання з використанням експоненціального закону Бугера є складним технічним завданням. Оскільки цей шар легований нерівномірно, ступінь поглинання випромінювання цим шаром визначається експериментально шляхом вимірювання спектра пропускання. З Рис. 2.31 видно, що при $R_S = 2,7 \text{ Ом}/\square$ коефіцієнт пропускання підкладки зменшується на 32% ($T_{n+} \approx 32\%$ при $\lambda=1,05 \text{ мкм}$) відносно коефіцієнта пропускання кремнію ($T_{Si} \approx 64\%$). Тобто 32 % випромінювання додатково поглинається n^+ -шаром. Тому, щоб визначити інтенсивність випромінювання, яке пройде через цей шар, необхідно від інтенсивності, знайденої за законом Бугера, відняти коефіцієнт пропускання n^+ -шару. Відповідно, інтенсивність випромінювання, яке потрапляє в область просторового заряду, дорівнює I_2 :

$$I_2 = 0,68 \cdot I_1 e^{-\alpha \cdot x_{n+-p}} \quad (3.4)$$

Для визначення інтенсивності випромінювання, що поглинається в товщині кристала, яка дорівнює сумі $W_i + L_n$, необхідно знати їх індивідуальні товщини. Вважатимемо $W_i \approx 60 \text{ мкм}$, $L_n \approx 180 \text{ мкм}$. Знаючи ці параметри, можна визначити інтенсивність випромінювання, яке буде поглинатися в цьому шарі:

$$I_3 = I_2 e^{-\alpha(W_i + L_n)} \quad (3.5)$$

Далі необхідно визначити, яка інтенсивність випромінювання буде поглинатися в «неактивній» зоні високоомної області кристалу ФД:

$$I_4 = I_3 e^{-\alpha(x - (W_i + L_n + x_{n+-p} + x_{p+-p}))} \quad (3.6)$$

Далі необхідно визначити, наскільки потік випромінювання буде ослаблений після проходження через p^+ -шар і адгезійний підшар хрому. З Рис. 2.46 видно, що наявність p^+ -шару на поверхні кремнієвої підкладки з $R_s = 18 \text{ Ом}/\square$ зменшує її коефіцієнт пропускання на 4 %. Тому, за аналогією з n^+ -шаром, необхідно від інтенсивності випромінювання, знайденої за законом Бугера, відняти наступні 4%. Також в роботі [28] ми встановили, що плівка хрому товщиною 10 нм поглинає 4% ($T_{Cr} \approx 96\%$) випромінювання робочої довжини хвилі (Рис. 3.15) .

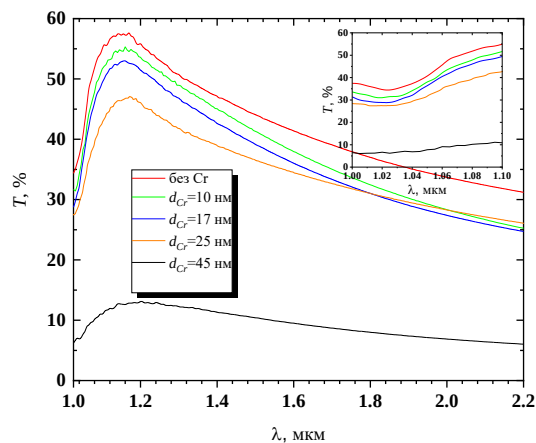


Рис. 3.15. Спектр пропускання кристалів ФД з різною товщиною адгезійного шару хрому.

Відповідно, інтенсивність випромінювання після проходження через ці шари буде такою:

$$I_5 = 0,96 \cdot T_{Cr} I_4 e^{-\alpha \cdot x_{p+-p}} \quad (3.7)$$

Інтенсивність випромінювання після відбиття від шару золота і проходження через адгезійний шар хрому і p^+ -шар набуде значення:

$$I_6 = 0,96 \cdot T_{Cr} R_{Au} I_5 e^{-\alpha \cdot x_{p+-p}} \quad (3.8)$$

де R_{Au} - коефіцієнт відбивання від золота, при $\lambda=1,05 \text{ мкм}$.

Інтенсивність випромінювання після проходження через «неактивну» і-область після відбиття від золота:

$$I_7 = I_6 e^{-\alpha (x - (W_i + L_n + x_{n+-p} + x_{p+-p}))} \quad (3.9)$$

Інтенсивність випромінювання, поглинутого в шарі $W_i + L_n$ після відбиття від золота, сягне:

$$I_8 = I_7 e^{-\alpha(W_i + L_n)} \quad (3.10)$$

Коефіцієнт збору неосновних носіїв заряду визначимо за формулою [89]:

$$\gamma = 1 - e^{-\alpha x} \quad (3.11)$$

Враховуючи зміну інтенсивності випромінювання, ця формула набуде вигляду:

$$\gamma_I = I_3 (1 - e^{-\alpha(W_i + L_n)}) \approx 0,107, \quad (3.12)$$

де γ_I - коефіцієнт збирання носіїв заряду при першому проходженні через товщу кристала.

$$\gamma_{II} = I_8 (1 - e^{-\alpha(W_i + L_n)}) \approx 0,055 \quad (3.13)$$

де γ_{II} - коефіцієнт збирання носіїв заряду при другому проходженні через товщу кристала.

Чутливість визначалася за формулою [11]:

$$S_\lambda = (1 - R) T Q_E \sum \gamma \frac{\lambda}{1.24} \approx 0,13 \text{ А/Вт}, \quad (3.14)$$

Якщо провести розрахунки для чутливості лише при першому проходженні випромінювання крізь товщу кристала, отримаємо $S_{\lambda I} \approx 0,09 \text{ А/Вт}$, з цього можна побачити, що при використанні подвійного проходження випромінювання крізь товщу кристала чутливість росте на 64 %. Також з розрахунків видно, що γ_{II} становить близько 51% від γ_I .

Якщо провести розрахунки при таких же початкових даних, але при $X=300 \text{ мкм}$, то отримаємо $\gamma_I \approx 0,107$, $\gamma_{II} \approx 0,067$, $S_{\lambda I} \approx 0,09 \text{ А/Вт}$, $S_{\lambda} \approx 0,14 \text{ А/Вт}$. Також з розрахунків можна побачити, що коефіцієнт збирання носіїв заряду при другому проходженні випромінювання через напівпровідник збільшується на 20-22% при зменшенні товщини кристала з 500 до 300 мкм. Відповідно, зменшення товщини кристала ФД (зменшення неактивної зони i -області) покращує значення γ і S_λ при використанні низьких напруг зворотного зміщення.

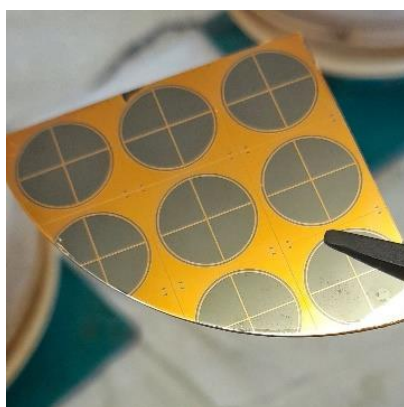
3.2.2. Виготовлення та дослідження фотодіодів з підвищеним коефіцієнтом збирання носіїв заряду

Дослідження проводили на кремнієвих чотириелементних $p-i-n$ ФД із товщиною кристалів $X \approx 500$ (ФД₁) мкм і $X \approx 300$ мкм (ФД₂). Виготовлення ФД₁ проводилося за дифузійно-планарною технологією згідно з технологічним маршрутом, наведеним у Розділі 2.1.1. та вихідними параметрами наведеними в попередньому параграфі.

Однак виготовлення кристалів товщиною 300 мкм суттєво знижувало їхню механічну міцність, тому було вирішено локально потоншити лише проекції чутливих елементів на тильній стороні підкладки, а периферію кристала та межі між активними елементами зробити товщиною 500 мкм у якості ребер міцності [124]. Перед дифузією бору кристал було стоншено методом ХДП з попередньою фотолітографією та захистом фронтальної сторони хімічно стійким лаком.

Однак зазначимо, що фоторезист, який використовувався (AZ4533, Microchemicals [125]), не здатний захистити підкладку від тривалого ХДП в агресивному травильному середовищі. Вирішено напилити Au з адгезійним шаром Cr на зворотний бік підкладки і виконати фотолітографію (Рис. 3.16а) з подальшим травленням кремнію методом ХДП (Рис. 3.16б). Це металеве покриття є чудовим маскувальним покриттям, що дозволило провести кілька етапів травлення загальною тривалістю близько 20 хвилин і товщиною травлення близько 200 мкм. Зображення ФД₂ можна побачити на Рис. 3.17.

Як видно зі зворотних вольт-амперних характеристик досліджуваних фотодіодів (Рис. 3.18), крива ВАХ для ФД₁ не досягає насичення в діапазоні досліджуваних зворотних напруг, а крива ФД₂ досягає насичення при $U_{zm} = -40$ -50 В. Темновий струм ФД визначається його об'ємною генераційною складовою, яка прямо пропорційна ширині ОПЗ (2.2) [37], відповідно, у випадку ФД₂ при вказаній напрузі область просторового заряду поширюється на всю товщину кристалу, і подальшого збільшення темнового струму не відбувається.

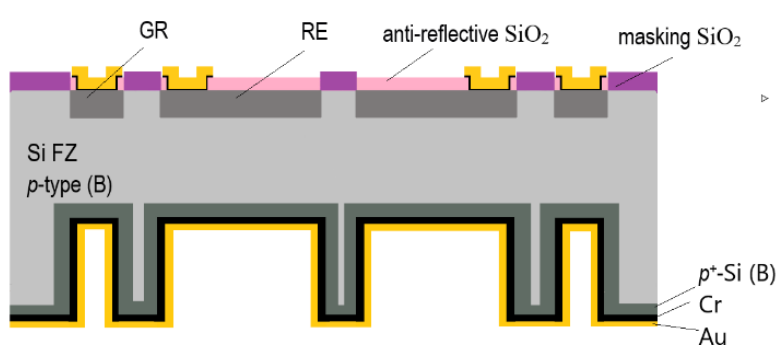


а)

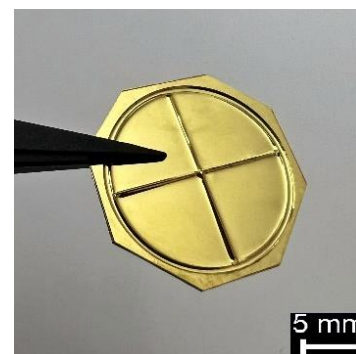


б)

Рис. 3.16. Зображення тилового боку підкладки ФД₂: а) після нанесення Au і фотолітографії; б) після ХДП.



а)



б)

Рис. 3.17. Схематичний переріз (а) та тилова сторона підкладки ФД₂

Щодо залежності ємності від зворотної напруги (Рис. 3.19), то ємність ФД₁ значно менша, ніж у ФД₂. Це пов'язано зі значною різницею в товщині кристалів, оскільки *p-i-n* ФД фактично є плоским конденсатором, де леговані області є електродами конденсатора, а високоомна зона - діелектриком, відповідно, згідно з формулою для плоского конденсатора, ємність обернено пропорційна товщині діелектрика [103].

Також отримані залежності $S_{imn}(U_{zm})$ (Рис. 3.20). Слід зазначити, що для оцінки збільшення чутливості при подвійному проходженні випромінювання через кристал були отримані значення чутливості з Au на зворотному боці кристала і без нього. Слід зазначити, що в розрахунках взагалі не враховується

відбиття випромінювання від зворотного боку, але в реальному випадку відбиття присутнє (зокрема, від металевої основи вимірювального блоку). Відповідно, у випадку ФД₁, згідно з розрахунками, чутливість зростає при подвійному проходженні випромінювання відносно одинарного на 44%, а в реальному випадку на 15%. Для ФД₂ - 55% в розрахунках і 19% в реальному випадку.

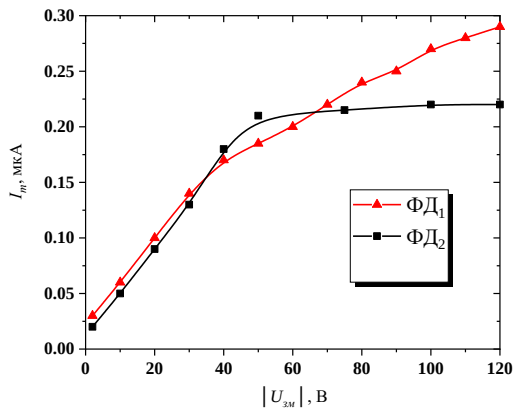


Рис. 3.18. ВАХ ФД₁ та ФД₂.

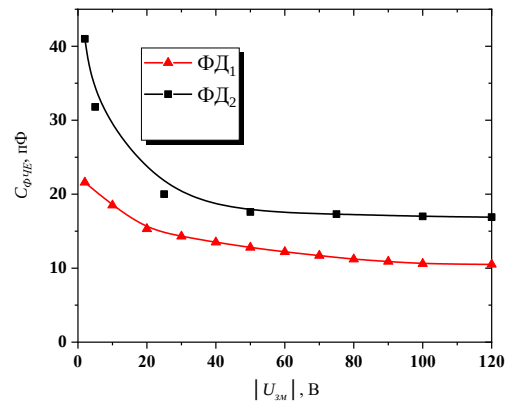


Рис. 3.19. Залежність $C_{ФЧЕ}(U_{зм})$.

Також з Рис. 3.20 видно, що крива чутливості ФД₁ досягає насичення при $U_{зм} \sim 90$ В, а ФД₂ - при $U_{зм} \sim 20$ В. Це зумовлено, як і у випадку темнового струму, розширенням ОПЗ на всю товщину підкладки при різних напругах. Однак варто зазначити, що запропонований ФД₂ має вищу чутливість в діапазоні 0-20 В, ніж серійний ФД₁ (при $U_{зм} = -2$ В чутливість ФД₂ більш ніж на 25 % вища, ніж у ФД₁). Також було виявлено, що чутливість до модульованого потоку при $U_{зм} = -2$ В в ФД₂ ($S_{IL} \approx 0,3-0,31$ А/Вт) також вища, ніж у ФД₁ ($S_{IL} \approx 0,24-0,25$ А/Вт) приблизно на 25%.

Зростання чутливості в описаних випадках зумовлене збільшенням γ_{II} внаслідок зменшення товщини кристала і збільшення інтенсивності випромінювання, що поглинається у високоомній області кристала ФД, відбитого від шару Au на зворотному боці підкладки.

Також визначено детективність зразків (D^*) (Рис. 4.20 (вставка)), згідно формули [126]:

$$D^* = \sqrt{\frac{A_{\Phi\text{ЧЕ}}}{2eI_T}} S_{\text{імп.}} \quad (3.15)$$

Встановлено, що в ФД₂ $D^*=1,5 \cdot 10^{12}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ при $U_{3M}=-2$ В, а в ФД₁ $D^*=9,5 \cdot 10^{11}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. При $U_{3M} \geq -25$ В в ФД₁ детективність стає більшою, ніж в ФД₂, внаслідок збільшення чутливості.

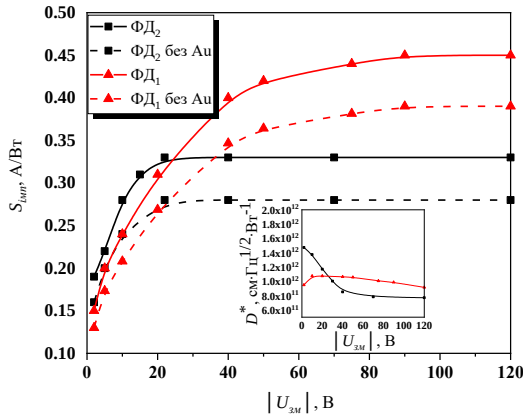
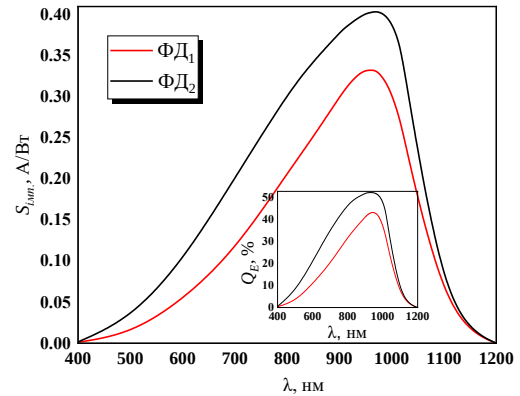


Рис. 3.20. Залежність $S_{\text{імп}}(U_{3M})$ ФД₁ та ФД₂ (вставка $D^*(U_{3M})$).



чутливості та квантової ефективності (вставка) ФД₁ та ФД₂.

Рис. 3.21. Спектральна характеристика

При вимірюванні спектральних характеристик досліджуваних ФД встановлено, що ФД₂ має вищу чутливість та квантову ефективність, ніж ФД₁ у всьому діапазоні чутливих довжин хвиль (Рис. 3.21).

3.3. Високочутливі кремнієві *p-i-n* меза-фотодіоди

3.3.1. Виготовлення меза-фотодіодів

Як відомо [45-48, 127], під час високотемпературних технологічних операцій відбувається погіршення електрофізичних характеристик кремнію, що негативно впливає на кінцеві параметри фотоприймачів. Для мінімізації вказаної деградації варто знижувати температуру дифузійно-окислювальних операцій або знижувати загальну кількість термообробок [128].

Одним методів зниження кількості термічних операцій є виготовлення

ФД з меза-профілем [58, 129, 130]. В такому випадку першою термічною операцією проводиться дифузія фосфору, а чутливі елементи формуються шляхом травлення меза-структури, де утворені канавки меза-профілю є зазорами між активними елементами кристалу фотодіода [58, 131, 132]. В такому випадку відсутня потреба в проведенні першого високотемпературного окислення. ФД з меза-структурою зарекомендували себе як дуже перспективні вироби, тому пошук досконалої топології даних фотоприймачів є актуальним науково-технічним завданням.

Чотириелементні $p-i-n$ ФД з охоронним кільцем виготовлялись на основі кремнію p -типу провідності із $\rho=18-24$ кОм·см та $\tau=1,8-2,2$ мс. Першою термічною операцією при виготовленні фоточутливого кристалу була загонка фосфору для створення ФЧЕ та ОК n^+ -типу провідності (Рис. 3.22а) ($R_s=3,6-3,8$ Ом/□). Ця операція створювала $p-n$ перехід глибиною 0,5-1 мкм. Далі проводилась перша фотолітографія. Важливим було застосування хімічно стійкого фоторезисту, адже саме він являвся маскуючим покриттям при створенні меза-профілю, а не SiO_2 , як зазвичай в планарній технології. Після ФЛГ слідувало травлення канавок профілю методом ХДП в розчині HNO_3 : HF : $\text{CH}_3\text{COOH} = 7:1:3$ (Рис. 3.22б). Глибина меза-профілю сягала $h_{meza}=5,5-6$ мкм.

При виготовленні експериментальних зразків використовувався фоторезист ФП-383 та ФП-25 [133]. Ці покриття не проявили належної хімічної стійкості до травника. Так, ФП-383 відшаровувався в процесі травлення меза-структури, внаслідок чого травилась вся поверхня пластин включно із ФЧЕ. Фоторезист ФП-25 та суміш ФП-25/ФП-383(50/50) володіли кращою адгезією та хімічною стійкістю до травника. Але під час процесу травлення на поверхні кремнієвих пластин утворювались розтравлення (Рис. 3.23).

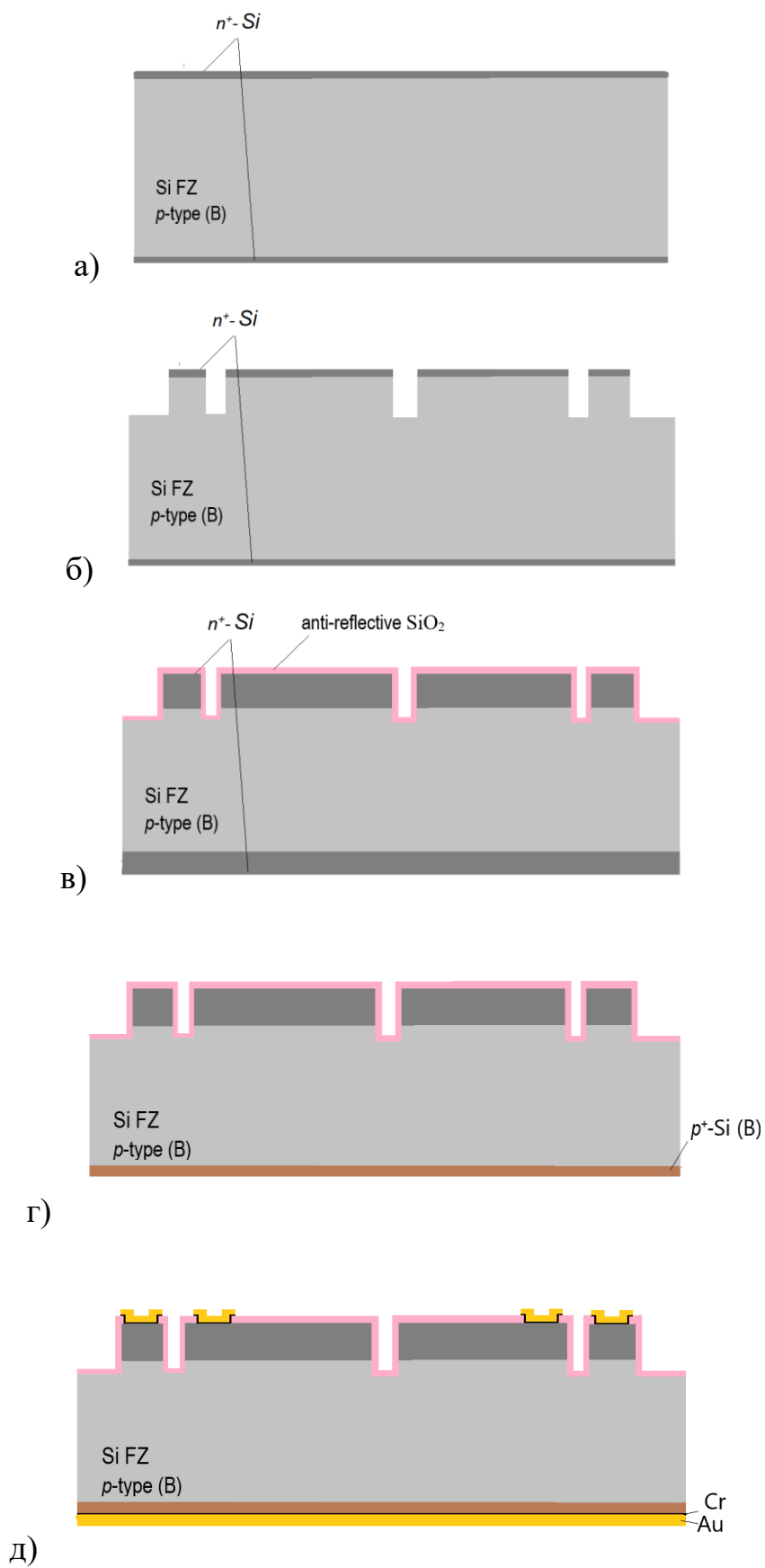
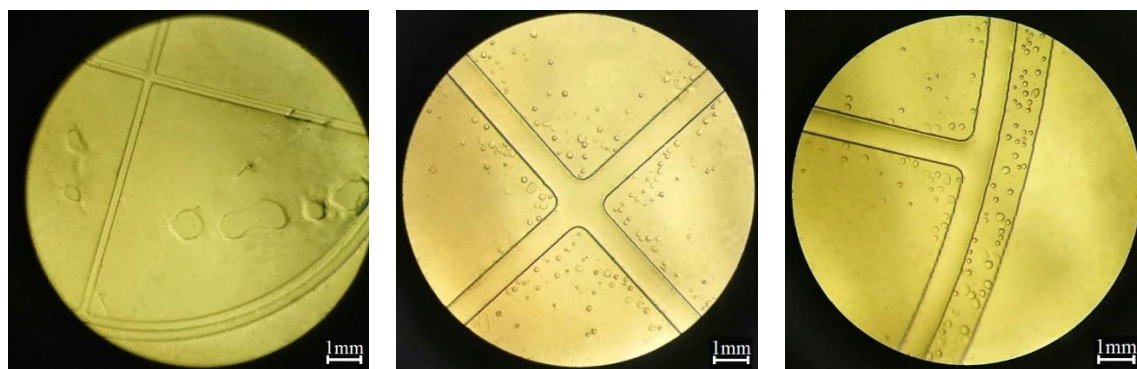


Рис. 3. 22. Схематичний переріз кристалу меза-фотодіода на різних етапах виготовлення:
а) після загонки фосфору; б) після ХДП; в) після розгонки фосфору; г) після дифузії бору;
д) після металізації.



а)

б)

в)

Рис. 3.23. Зображення дефектної поверхні пластин після травлення з використанням різних покриттів: а) суміш ФП-25/ФП-383 (50/50); б, в) ФП-25.

Враховуючи отримані результати, вирішено випробувати інші варіанти маскуючого покриття. В якості них обрано фоторезисти AZ1518 [134] та AZ4533 [135]. Для забезпечення необхідної хімічної стійкості, використовувались наступні режими нанесення та дублення для AZ1518:

- 1) швидкість центрифуги при нанесенні $v=4000$ об/хв, тривалість дублення $t_{\text{дубл}}=30$ хв при температурі $T=120$ °C ;
- 2) нанесення двох шарів із $v=3000$ об/хв та $t_{\text{дубл}}=30$ хв при $T=120$ °C ;
- 3) нанесення двох шарів зі $v=3000$ об/хв., з проміжною сушкою тривалістю 20 хв при температурі 95 °C, $t_{\text{дубл}}=30$ хв при $T=120$ °C.

Випробування фоторезисту проводили на експериментальних пластинах, утворюючи довільну топологію (в даному випадку круг) із забезпеченням вище вказаних режимів ХДП. Жоден із варіантів ФЛГ з використанням даних маскуючих покриттів не задовільнив потреби. Покриття не відшаровувалось, але поверхня кристалу все ж місцями підтравлювалась, утворюючи різного роду «сітки» дефектів, що можна побачити на Рис. 3.24.

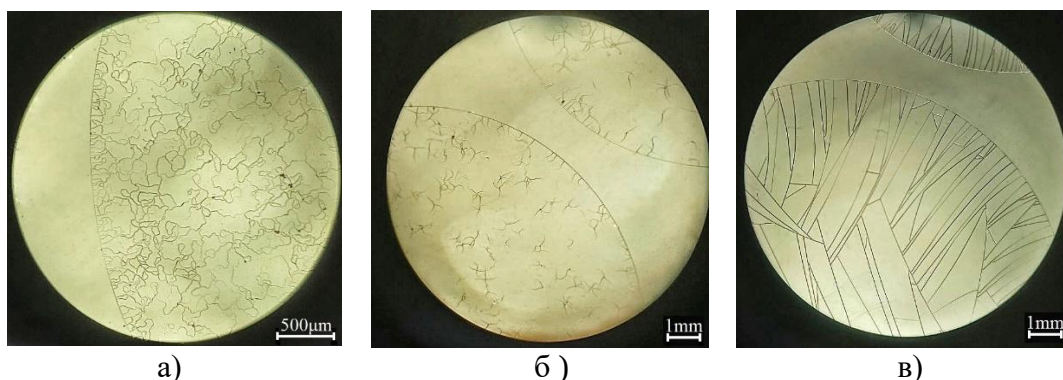


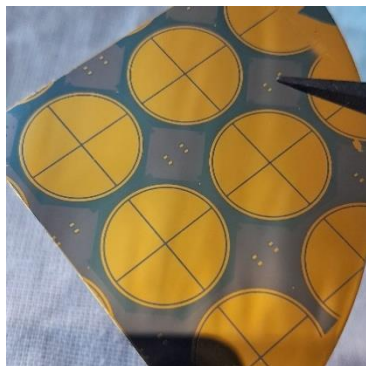
Рис. 3.24. Зображення дефектної поверхні пластин після травлення з використанням фоторезисту AZ1518: а) режим 1; б) режим 2; в) режим 3.

Фоторезист AZ4533 повністю задовільнив вимоги по адгезії та хімічній стійкості ($v=4000$ об/хв, $t_{\text{дубл}}=30$ хв при $T=120$ °C). Експериментальні зразки отримані з використанням даного покриття ($\text{ФД}_{\text{мезаAZ}}$) характеризувались відсутністю дефектів та розтравлень. Але дане покриття володіло кількома недоліками: високою густиною, що викликало проблеми при нанесенні, та значною ринковою вартістю. Також помічено, що при травленні пластин із оксидною плівкою у вказаному травнику, кремній травиться швидше, ніж SiO_2 . Оскільки використовуваний травник містить малу об'ємну частку плавикової кислоти, відповідно, швидкість травлення окисної плівки SiO_2 набагато менша за таку для кремнію: $0,05\text{-}0,06$ мкм/хв проти 4 мкм/хв. Виходячи із сказаного, оксид кремнію вирішено використати як маскуєuche покриття в процесі травлення профілю меза-структури ($\text{ФД}_{\text{мезаSiO}_2}$). Але як сказано вище, ціллю використання меза-технології є зменшення кількості термічних операцій. Тому маскуєчий оксид товщиною близько $0,5$ мкм наносився за допомогою установки Leybold-Heraeus Z-550 методом ВЧ катодного напилення. Фотолітографія проводилась будь-яким ФР. Далі відбувалось травлення меза-профілю. Залишковий оксид кремнію стравлювався в HF для створення такої ж топології кристалів, як і у випадку використання фоторезисту AZ4533 для порівняння та з технологічних міркувань.

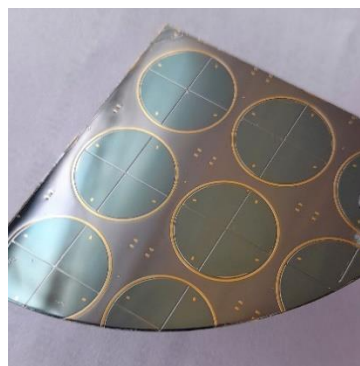
Після ХДП проводилась розгонка фосфору (Рис. 3.22в). Поверхневий

опір ФЧЕ після розгонки складав $R_s=2,3-2,4$ Ом/□. Наступною термічною операцією була дифузія бору в зворотну сторону підкладки (Рис. 3.22г) для створення $p-p^+$ -переходу та забезпечення омичного контакту ($R_s=18-20$ Ом/□). Далі проводилась металізація контактних зон до активних елементів (Рис. 3.22 д) та розділення підкладок на кристали.

Також досліджено можливість виготовлення меза-фотодіодів із використанням золотого маскуючого покриття для травлення меза-профілю [136]. Кристали експериментальних меза-фотодіодів виготовлено за наступною послідовністю технологічних операцій: загонка фосфору з твердотільних планарних джерел фосфору в атмосфері азоту, розгонка фосфору в атмосфері сухого кисню, дифузія бору в тилу сторону підкладки, фотолітографія для створення контактних вікон в просвітляючому оксиді, нанесення шару Au з адгезійним підшаром хрому на лицеву сторону пластини, фотолітографія для відкриття вікон, що відповідають зазорам між чутливими елементами (Рис. 3.25а) із захистом зворотної сторони хімічно стійким лаком, травлення меза-профілю методом ХДП, фотолітографія для утворення Au-контактних зон (Рис. 3.25б), нанесення Au з адгезійним підшаром хрому на зворотну сторону пластини, розділення кристалів методом різання диском з алмазованою ріжучою кромкою. Схематичний переріз кристала запропонованого фотодіода зображено на Рис. 3.26.



а)



б)

Рис. 3.25. Підкладка з кристалами меза-фотодіодів після: а) нанесення маскуючого шару Cr-Au; б) після травлення меза-профілю та фотолітографії для утворення контактів.

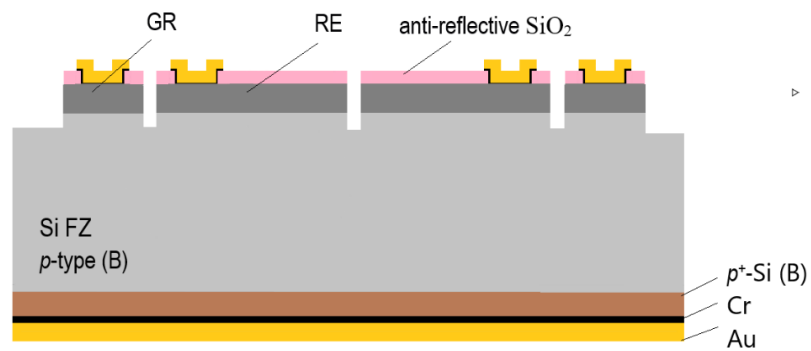


Рис. 3.26. Схематичний переріз кристала запропонованого $\text{FD}_{\text{mezaAu}}$.

Глибина меза-профілю в останньому випадку повинна бути більшою, ніж глибина залягання дифузійного шару фосфору, в досліджуваному випадку глибина профілю сягала близько 10 мкм.

Варто зазначити, що використання «тонкої» плівки золота для тривалого травлення в плавиковій кислоті чи поліруючому травнику може провокувати утворення розтравлень на поверхні ФД, внаслідок проникнення травника крізь пори в маскуючому шарі (Рис. 3.27). Для забезпечення належного маскувального ефекту нами використовувалась товщина золота 500-600 мкм.

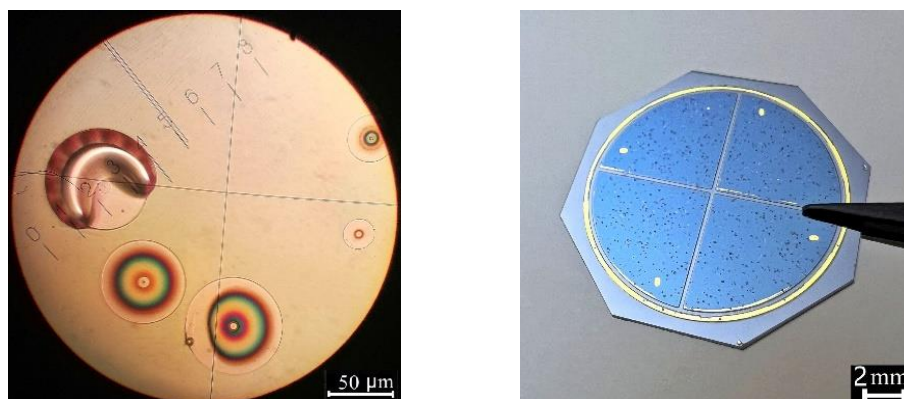


Рис. 3.27. Зображення кристалів меза-фотодіодів з розтравленнями, утвореними під час травлення оксиду чи ХДП.

Зображення кінцевих ФД, виготовлених за допомогою різних маскуючих покриттів наведено на Рис. 3.28.

Параметри експериментальних ФД виготовлених з використанням

маскування фоторезистом, оксидною та золотою плівками під час утворення меза-профілю порівнювались із комерційними зразками ФД_С. ФД_{мезаAu} виготовлявся в окремому технологічному циклі, тому його порівняння наведено окремо.

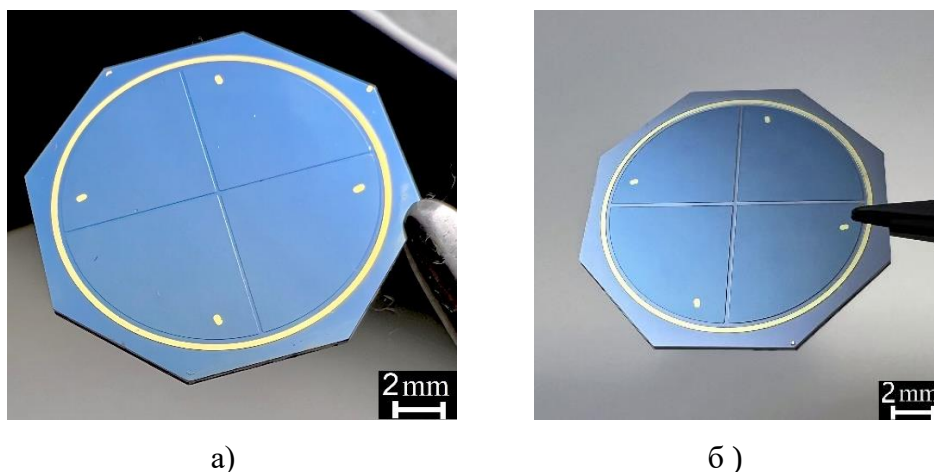


Рис. 3.28. Зображення кристалу квадрантного меза-фотодіода: а) ФД_{мезаAZ} і ФД_{мезаSiO₂}; б) ФД_{мезаAu}.

3.3.2. Дослідження поверхні кристалів меза-фотодіодів.

Досліджено дефектну структуру поверхні запропонованих та серійних ФД після обробки в селективному травнику Сіртля. Попередньо з зразків видаляли золото і хром, оскільки наявність металізації під час селективного травлення може призвести до небажаного структурування [137-140]. Тривалість травлення складала 5 хв. Перед селективним травленням проводились відмивки в суміші Каро та аміачно-перекисному розчині.

На поверхні зразків було виявлено характерні ямки травлення трикутної форми, що свідчило про наявність дислокацій. Кристали володіли різною кількістю набутих структурних дефектів. Так, поверхня ФД_С володіла незначною кількістю дислокаційних ліній із взаємним розміщенням під кутом 60°, що притаманне для орієнтації [111] (Рис. 3.29а). Поверхнева густина дислокацій сягала $N_{duc.}=1,1 \cdot 10^4 - 1,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Поверхня кристалу ФД_{мезаAZ} характеризувалась меншою кількістю

дислокацій. Виявлено поодинокі дислокації та «короткі» дислокаційні лінії (Рис. 3.29б). Поверхнева густина дислокацій сягала $N_{duc}=1\cdot10^3-1,3\cdot10^3\text{ см}^{-2}$. $\Phi\text{Д}_{\text{мезаAu}}$ була притаманна так ж густина поверхневих дефектів.

Поверхня кристалів $\Phi\text{Д}_{\text{мезаSiO}_2}$ була густо всяна окремими дислокаціями більшого розміру, ніж в попередніх двох випадках. Також були присутні лінії дислокацій такого ж типу, як в кристалах $\Phi\text{Д}_\text{С}$ (Рис. 3.29в). Густина окремих дислокацій складала близько $N_{duc.}=0,4\cdot10^4\text{ см}^{-2}$. Густина дислокацій об'єднаних в лінії складала близько $N_{duc.}=3\cdot10^4-3,4\cdot10^4\text{ см}^{-2}$. Окремі дислокації, виявлені після ВЧ катодного напилення, являються дислокаціями невідповідності. Оскільки нанесена окисна плівка не відповідає кристалічній решітці кремнію, на відміну від термічно вирощеної [141, 142].

В меза-технології з використанням маскуючого фоторезисту чи золотого покриття мінімізовано кілька ключових факторів, які сприяють утворенню дислокацій: це точкові дефекти, які утворюються під час термічного окислення, та термомеханічні напруження в пластинах, які з'являються під час кожної термічної операції [143].

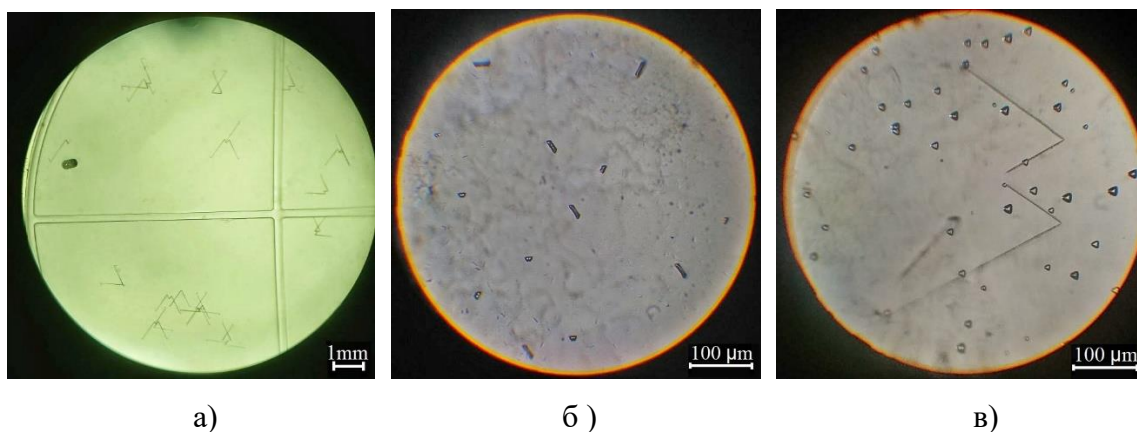


Рис. 3.29. Зображення поверхні $\Phi\text{Д}$ після селективного травлення: а) $\Phi\text{Д}_\text{С}$; б) $\Phi\text{Д}_{\text{мезаAZ}}$, $\Phi\text{Д}_{\text{мезаAu}}$; в) $\Phi\text{Д}_{\text{мезаSiO}_2}$.

Розглянемо детальніше вказані фактори утворення дислокацій. В технології серійних виробів перед дифузією фосфору термічним окисленням вирощується маскуючий шар SiO_2 товщиною близько 0,6-0,7 мкм. Відповідно,

при наявності товстого оксиду, при наступних термічних операціях внаслідок більш ніж семикратної різниці коефіцієнтів термічного розширення Si та SiO₂ виникають приповерхневі механічні напруження в пластинах. Також при загрузці/вигрузці підкладок в/з кварцових реакторів температура швидко зростає/спадає до більш високої/низької, внаслідок чого в пластинах виникають радіальні (σ_R) і кутові (σ_θ) розтягуючі напруження, які можна описати наступними виразами [37, 144, 145]:

$$\overline{\sigma_R} = \frac{\sigma_R}{\alpha_{Si}E(T_0 \pm T)}, \quad \overline{\sigma_\theta} = \frac{\sigma_\theta}{\alpha_{Si}E(T_0 \pm T)} \quad (3.16)$$

де $\overline{\sigma_R}$, $\overline{\sigma_\theta}$ – середнє значення радіальних та кутових розтягуючих напружень, відповідно (розподіл по пластині відрізняється); σ_R , σ_θ – значення радіальних та кутових розтягуючих напружень, відповідно при T_0 ; α_{Si} – температурний коефіцієнт термічного розширення кремнію; E – модуль Юнга; T_0 , T – кімнатна температура та температура термічного процесу відповідно.

В виразах (3.16) знак «-» в знаменнику описує процес охолодження, «+» – нагрівання. Тому, при охолодженні відбувається деформація стиснення, при нагріванні – розширення. Зменшення величини напружень та їх впливу на утворення структурних дефектів досягається повільним охолодженням пластин після термообробок та повільним введенням касети з пластинами в високотемпературну зону печі.

Також під час окислення утворюються надлишкові атоми домішки чи надлишкові міжвузлові атоми кремнію, які конденсуються у вигляді локалізованих кластерів-точкових дефектів в тісно упакованій кристалічній решітці. Відомо [37], що при дифузії фосфору в окислювальній атмосфері, локальна генерація дефектів, таких як дефекти упаковки і дислокації, відбувається в місцях локалізованих порушень поверхні пластини. А враховуючи те, що пластини перед термічними операціями проходять ХДП, яка мінімізує наявність поверхневих дефектів, точкові дефекти утворені при окисленні є основними центрами локалізації дислокацій.

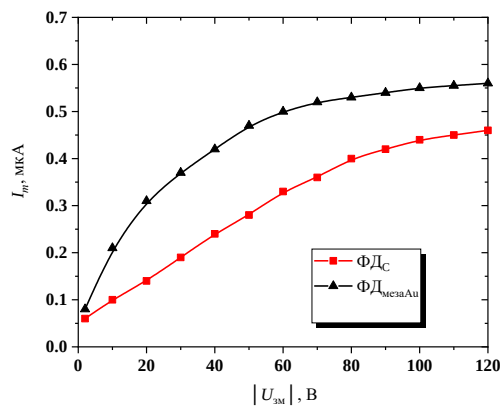
3.3.3. Дослідження параметрів меза-фотодіодів

Параметри ФД, виготовлених за меза-технологією, з трьома варіантами маскуючого покриття порівнювались із виробами, створеними за звичайною планарною технологією (Табл. 3.4), (Рис.3.30).

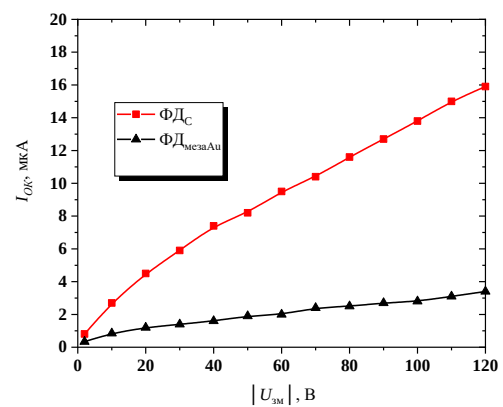
Таблиця 3.4

Типові значення параметрів експериментальних ($\Phi\text{Д}_{\text{мезаSiO}_2}$, $\Phi\text{Д}_{\text{мезаAZ}}$) та серійних фотодіодів при $U_{\text{зм}} = -120$ В.

Параметр	Значення		
	$\Phi\text{Д}_{\text{мезаSiO}_2}$	$\Phi\text{Д}_{\text{мезаAZ}}$	$\Phi\text{Д}_\text{С}$
I_m , нА	780—1560	180—260	80—160
$I_{\text{ОК}}$, мкА	174—260	8,7—26,1	5,2—17,4
$\Sigma R_{\text{зв}}$, МОм	1—0,4	20—6,7	20—6,7
$S_{\text{имп}}$ А/Вт.	0,46—0,53	0,50—0,53	0,45—0,47
$C_{\text{фчЕ}}$, пФ	10—11,5	10—11,5	12—13,5



а)



б)

Рис. 3.30. Зворотні темові ВАХ ФЧЕ (а) та ОК (б) $\Phi\text{Д}_{\text{мезаAu}}$ та $\Phi\text{Д}_\text{С}$.

З Табл. 3.4 та Рис. 3.30 видно що запропоновані зразки володіли дещо вищими значеннями темнового струму в усьому діапазоні зворотніх напруг. Причиною відмінності в значеннях темнових струмів є деяке збільшення

площі чутливих елементів, , внаслідок наявності клину травлення та власне меза-профілю (Рис. 3.31). Вказані фактори збільшують значення темного струму внаслідок наявності на поверхні пластини великої кількості поверхневих станів: порушення періодичності потенціалу ґратки кристалу внаслідок її обриву біля поверхні (рівні Тамма); наявність некомпенсованих валентних зв'язків у поверхневих атомів (рівні Шоклі); викривлення потенціалу ґратки на поверхні, викликане адсорбованими атомами і поверхневими дефектами. Рівні Тамма і Шоклі характеризують ідеальну поверхню. На реальній же поверхні визначальну роль грають поверхневі рівні, викликані поверхневими дефектами. До них можна віднести точкові дефекти, що являють собою атомні порушення в окремих точках ґратки (наприклад, вакансія атомів в вузлах решітки чи міжвузлові атоми), а також лінійні та об'ємні дефекти (дислокацій, пори, включення іншої фази та ін.).

$\Phi D_{\text{мезаSiO}_2}$ володів значно вищими I_m порівняно із серійними зразками внаслідок наявності на поверхні дислокацій збільшеного розміру. Ці дефекти володіють збільшеним перерізом захоплення, що провокує збільшення генераційних струмів [37].

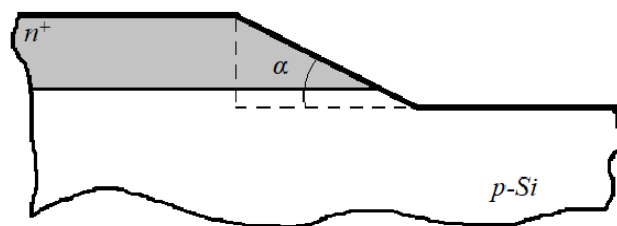


Рис. 3.31. Схематичне зображення профілю травлення меза-структури, де α – кут нахилу при травленні (клин травлення).

Деяка відмінність спостерігалась в значеннях I_{OK} . З точки зору зонної структури напівпровідника наявність поверхневих дефектів чи адсорбованих атомів призводить до утворення в забороненій зоні напівпровідника дозволених енергетичних рівнів, локалізованих на поверхні. На такі рівні

можуть переходити електрони із валентної зони, і навпаки, електрони із поверхневих рівнів можуть переходити в зону провідності, в результаті чого поверхня напівпровідника стає зарядженою, тобто відбувається утворення приповерхневого шару напівпровідника зарядженого протилежно до об'єму т. зв. інверсійного шару. Відповідно зростання темного струму відбувається за рахунок зростання поверхневої генераційної складової яка прямо пропорційна густині поверхневих станів .

Слід зауважити, що в випадку $\Phi D_{\text{мезаAu}}$ утворення меза-профілю було одією із останніх технологічних операцій виготовлення кристалу фотодіода, після якої не проводилось високотемпературних операцій, тому травлену поверхню можна вважати квазі ідеальною. Інформативним методом оцінки наявності поверхневих станів є вимірювання опору ізоляції між фоточутливими елементами, а також вимірювання зворотної темної ВАХ охоронного кільця (Рис. 3.30 б), оскільки визначальним для темного струму охоронного кільця є саме наявність поверхневих станів на периферії кристалу, які роблять внесок в значення поверхневої складової темного струму при розширенні області просторового заряду охоронного кільця в сторону периферії [146].

В $\Phi D_{\text{мезаAu}}$ опір ізоляції всіх чутливих елементів і охоронного кільця сягав близько $\sum R_{36}=3-5$ МОм, а в серійних зрізків виготовлених в єдиному технологічному циклі $\sum R_{36}=0,5-1$ МОм. Також з ВАХ охоронних кілець можна зробити висновок про значно меншу кількість поверхневих станів в $\Phi D_{\text{мезаAu}}$, оскільки вказаний фотодіод володів значно нижчим значенням темного струму охоронного кільця. Причиною збільшення кількості поверхневих станів є наявність більшої кількості високотемпературних операцій, зокрема термічного окислення, під час якого на поверхні кремнію утворюється велика кількість структурних точкових дефектів, зокрема включення міжвузлових атомів кремнію чи їх скупчення внаслідок дифузії кисню, а також висока імовірність дифузії неконтрольованих домішок,

зокрема металів, внаслідок їх наявності в кварцовій оснастці чи неналежній хімічній обробці пластин.

Варто зазначити, що в $\Phi D_{\text{мезаAZ}}$ та $\Phi D_{\text{мезаSiO}_2}$ глибина меза-профілю сягала значень лише на 1 мкм більше, ніж глибина залягання дифузійного шару фосфору. В цьому випадку відмінність в значеннях темнового струму серійних і меза-фотодіодів була мінімальна (до 20 нА). А в випадку $\Phi D_{\text{мезаAu}}$ глибина меза профілю в двічі більша, ніж глибина залягання дифузійного шару, де побачено відмінність в значеннях темнового струму ≥ 100 нА. Відповідно з вказаного можна зробити висновок про залежність темнового струму від глибини меза-профілю, що добре корелює із вказаною вище залежністю темнового струму від кількості поверхневих станів захоплених областю просторового заряду.

Зауважимо, що меза-фотодіоди володіли дещо вищою фоточутливістю (Табл. 3.4, Рис. 3.32), ніж серійні. Це можна пояснити меншою кількістю генераційно-рекомбінаційних центрів та «пасток» в високоомній області фотодіода, на яких можливе розсіювання та рекомбінація фотогенерованих носіїв заряду, оскільки, знову ж, відсутність високотемпературного окислення дозволяє знизити імовірність появи вказаних «пасток». Відмітимо, що меза-фотодіоди володіли дещо вищою детективністю, ніж серійні при $U_{zm} \leq -40$ В, однак детективність обох типів зразків при $U_{zm} \geq -40$ В набувала співмірних значень.

Варто зазначити, що крива чутливості для меза-фотодіода виходить в насичення при менших значеннях зворотніх напруг (Рис. 3.32). Це можна пояснити вищим значенням питомого опору та часу життя неосновних носіїв заряду, міра зменшення яких в меза-фотодіодів менша, ніж в серійних. Так, якщо визначити кінцевий питомий опір високоомної області кремнію та дифузійну довжину неосновних носіїв заряду $\Phi D_{\text{мезаAu}}$ та ΦD_c , згідно методики наведеної в Розділі 2, то побачимо, що деградація електрофізичних характеристик кремнію при використанні меза-технології мінімальна ($\rho \approx 21$ -

22,5 кОм·см, $L_n \approx 140-150$ мкм) на відміну від класичної планарної ($\rho \approx 16-17$ кОм·см, $L_n \approx 90-100$ мкм).

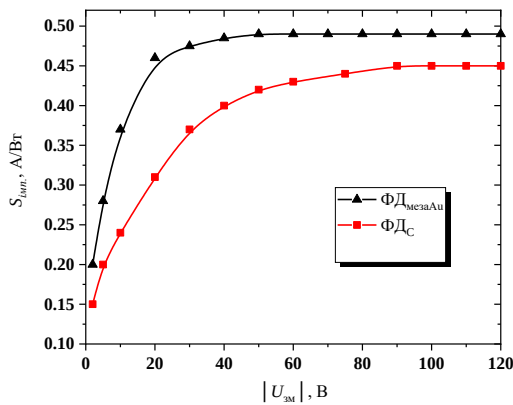


Рис. 3.32. Залежність $S_{imm}(U_{3M})$ серійного та меза-фотодіода.

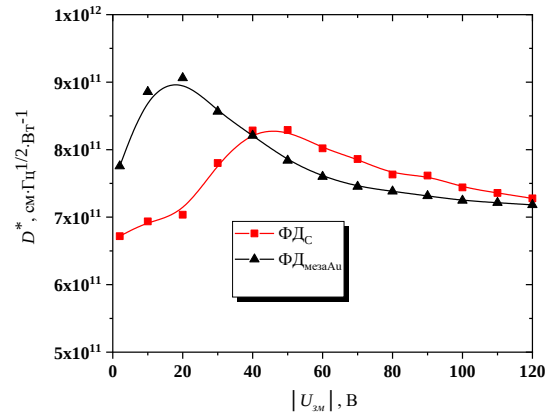


Рис. 3.33. Залежність $D^*(U_{3M})$ серійного та меза-фотодіода.

Крім очевидного здешевшання запропонованих фотодіодів перевагою їх є відсутність потреби контролю вольт-фарадних характеристик виробів в ФД_{мезаAu} після кожної термічної операції. Даний метод є інформативним варіантом оцінки якості виробів на різних етапах виготовлення кристалів фотодіодів, що дозволяє оцінити густину поверхневих станів на межі розділу двох фаз. Відсутність потреби вимірювання $C-V$ характеристик забезпечується травленням меза-профілю між чутливими елементами та стравлюванням периферії кристалу, що повністю видаляє поверхневі інверсійні шари, які могли б робити внесок в поверхневу генераційну складову темного струму, чи погіршувати опір ізоляції між активними елементами. В випадку запропонованих меза-фотодіодів внесок в значення темнових струмів роблять лише рівні Тамма і Шоклі. Єдиним нюансом є відсутність захисного оксиду на поверхні травлених областей, відповідно існує потреба в герметизації виробів без будь-яких затримок, оскільки квазі-ідеальна поверхня після травлення є дуже активною та може окислюватись навіть при кімнатній температурі чи адсорбувати атоми, що негативно впливатиме на густину поверхневих станів.

3.4. Чотириквadrантний кремнієвий фотодіод із підвищеним міжквadrантним опором

При виготовленні квadrантних ФД особлива увага приділяється опору ізоляції між ФЧЕ. У разі виготовлення фотоприймача з ОК, опір ізоляції між ФЧЕ і ОК також має важливе значення. Зменшення опору ізоляції між активними елементами фотоприймача може провокувати перетікання носіїв заряду між елементами (в тому числі збільшення струмів витоку), що призведе до погіршення фотозв'язку, зниження чутливості або навіть до умовного перетворення 4-елементного фотоприймача в одноелементний.

При виготовленні ФД на основі високоомного кремнію *p*-типу помічено значне погіршення міжквadrантного опору при використанні матеріалу з питомим опором $\rho \geq 20$ кОм·см. При вивченні цієї проблеми було встановлено, що причиною погіршення цього параметра є утворення інверсійних шарів на межі розділу Si-SiO₂ внаслідок збільшення питомого опору базового матеріалу, оскільки зі збільшенням ρ кремній потребує меншої концентрації неконтрольованих домішок, щоб змінити провідність на протилежну [49, 68].

Слід зазначити, що в роботах [52, 147, 148] було запропоновано та досліджено метод ізоляції ФЧЕ областями обмеження каналів витоку, ізотипними з матеріалом підкладки, шляхом дифузії бору в проміжки між ФЧЕ і ОК.

Зауважимо, що методи, описані в [49, 52, 147-149], відносяться до технологічних методів запобігання зменшенню міжквadrантного опору, а методи, описані в [60, 61], відносяться до методів збільшення міжквadrантного опору після експлуатації. Однак ми спостерігали значну кількість дефектних зразків по міжквadrантному опору на кінцевих стадіях виготовлення чутливих кристалів. Ця проблема потребує дослідження та створення ефективних методів підвищення міжквadrантного опору на завершальних етапах виготовлення кристалів фотодіодів. Так, нами

запропоновано метод збільшення опору ізоляції чутливих елементів багатоелементних фотодіодів, який базується на розриві інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂ шляхом травлення оксидної плівки чи поверхневого шару кремнію, зазорах між активними елементами елементами [50].

3.4.1. Виготовлення фотодіодів із підвищеним міжквADRантним опором

Серійні ФД виготовлялися згідно технологічного маршруту наведеного в Розділі 2.1.1 та режимів наведених в [150]. Контролювався міжквADRантний опір кристалів фотодіодів, отриманих за серійним технологічним маршрутом. Зразки зі збільшеним опором ізоляції між ОК та ФЧЕ $R_{3\phi}$, чи власне між ФЧЕ ($R_{\text{ФЧЕ-ФЧЕ}}$) і вважалися дефектними, виготовлялися за модифікованим технологічним маршрутом, описаним нижче. Як зазначалося вище, причиною зменшення міжквADRантного опору є наявність інверсійних провідних шарів на межі розділу Si-SiO₂. Відповідно, при видаленні оксидної плівки з поверхні пластини можна видалити інверсійні канали і при повторному вимірюванні буде спостерігатися значне збільшення $R_{3\phi}$ та $R_{\text{ФЧЕ-ФЧЕ}}$. Іноді вдається провести процес повторного окислення, але його доцільно проводити лише на початкових етапах виготовлення виробів, оскільки на кінцевих етапах, коли p - n переходи вже сформовані, додаткові термічні операції неможливі, оскільки це призведе до зміни заданої структури виробу. В даному випадку запропоновано в кристалах фотодіодів, дефектних за міжквADRантним опором, витравлювати маскувальний SiO₂, в проміжках між ФЧЕ та між ФЧЕ і ОК, як це показано на Рис. 3.34. Це досягається шляхом проведення додаткової фотолітографії та травлення у фтористоводневій кислоті. Ширина проміжків між елементами становила 200 мкм, а ширина протравлених ділянок - 60 мкм. Слід зазначити, що травлення оксиду на периферії кристала також

проводилося, оскільки наявність інверсійних шарів на периферії кристала провокує зростання і нестабільність темнових струмів ОК [151-153].

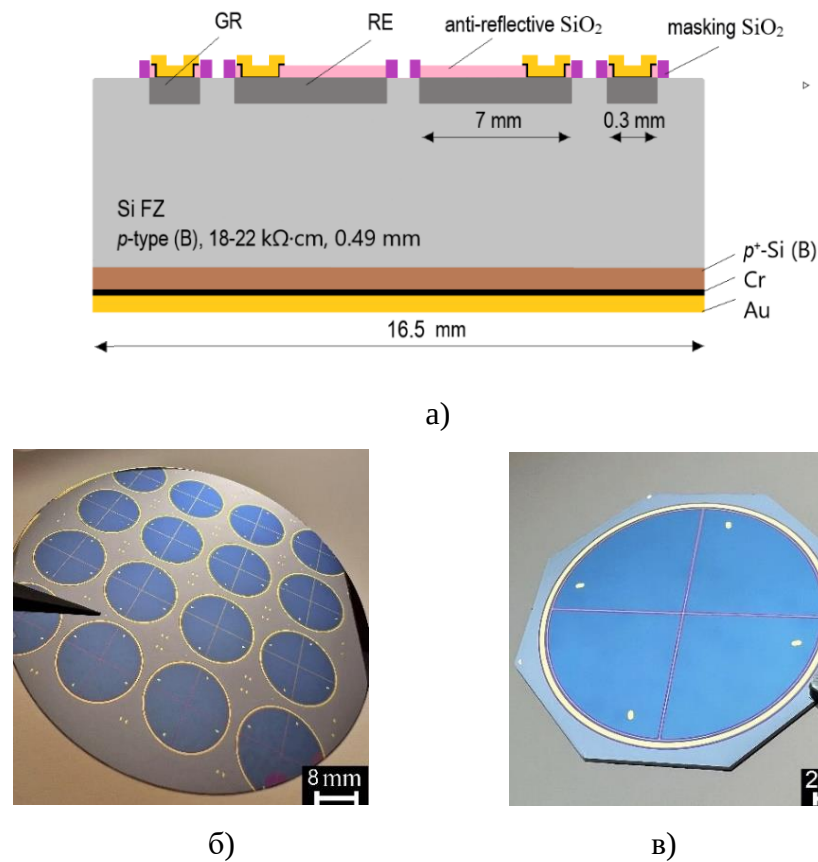


Рис. 3.34 Кристал ФД, з витравленим маскувальним оксидом між ФЧЕ: а) схематичний переріз; б) кристали на підкладці; в) кінцевий кристал.

Слід зазначити, що в випадках, коли після травлення оксидної плівки з дефектних кристалів міжквadrантний опір не зменшувався, крім видалення оксиду в проміжках між активними елементами, запропоновано травити кремній на певну глибину методом ХДП (Рис. 3.35), утворюючи меза-профіль (для маскування активних елементів під час ХДП використовувалось Cr-Au-покриття (Рис. 3.35б)). Таку модифікацію кристалу варто використовувати в випадку, коли неконтрольовані домішки, що утворювали інверсійні шари, дифундували в товщу підкладки і розташовувалися не тільки на межі розділу Si-SiO₂, але і в приповерхневих шарах кремнію.

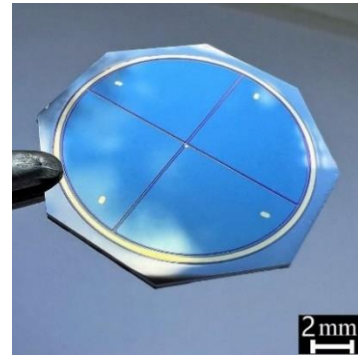
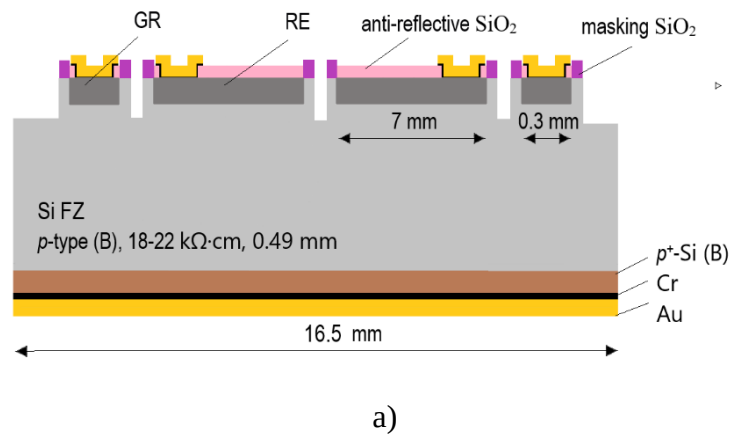


Рис. 3.35. Кристал ФД з меза-профілем в зазорах між ФЧЕ: а) схематичний переріз; б) кристали на підкладці із Cr-Au-маскуючим покриттям перед ХДП; в) кінцевий кристал.

3.4.2. Дослідження параметрів фотодіодів з підвищеним міжквadrантним опором

Досліджено кілька серій ФД з різними значеннями R_{36} та $R_{ФЧЕ-ФЧЕ}$. Отримано типові ВАХ ФД з різним $\sum R_{36}$ (Рис. 3.36). Як видно з Рис. 3.36а, значення темнового струму ОК зростає зі зменшенням $\sum R_{36}$. Однак слід зазначити, що R_{36} та $R_{ФЧЕ-ФЧЕ}$ є кількісною мірою густини поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂ (провідність інверсійних шарів зростає зі збільшенням N_{ss}). Враховуючи, що поверхнева складова темнового струму чутливих елементів фотодіодів прямо пропорційна N_{ss} (3.17), I_{OK} зростає зі збільшенням густини поверхневих станів [37].

$$I_{\text{пов.}} = \frac{eN_{ss}v\sigma_{ss}A_{p-n}}{2} \quad (3.17)$$

де σ_{ss} - площа перерізу захоплення; A_{p-n} - площа, $p-n$ -переходу; v - середня відносна швидкість теплових носіїв заряду.

Як видно з Рис. 3.36а, при $\sum R_{36} \leq 1$ МОм спостерігається значне зростання I_{OK} . У випадку ФЧЕ зростання I_m спостерігається при $\sum R_{36} \leq 50$ кОм (Рис. 4.36б). Відповідно, ФД з $\sum R_{36} \leq 1$ МОм слід модифікувати за запропонованою методикою для збільшення опору ізоляції активних елементів кристалу ФД. Відповідно, із описаного можна зробити висновок, що поверхнева компонента темнового струму є визначальною у випадку ОК, у випадку ФЧЕ вплив густини поверхневих станів на темновий струм значно менший.

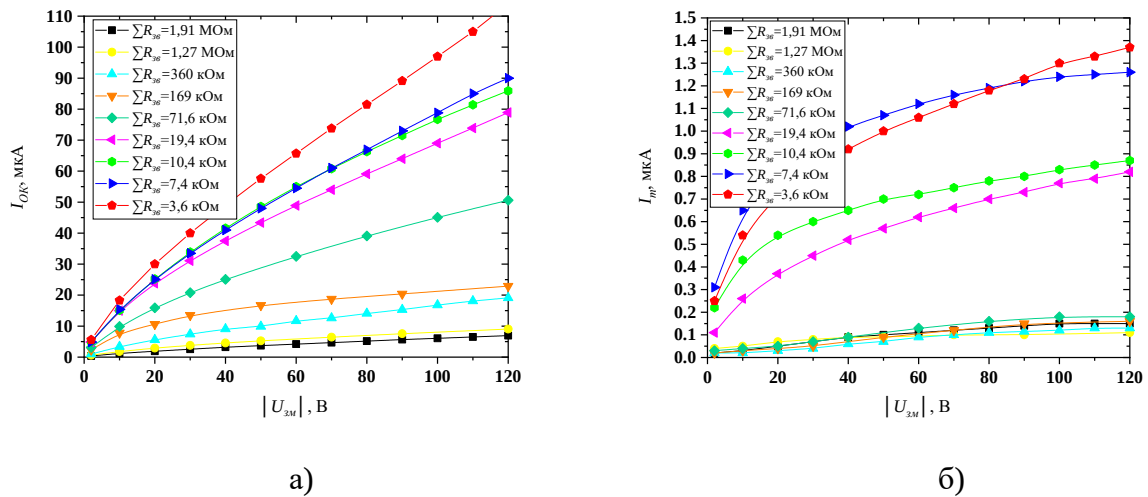


Рис. 3.36. Обернені ВАХ ОК (а) та ФЧЕ (б) ФД з різним $\sum R_{36}$.

Для оцінки ефективності підвищення опору ізоляції методом травлення маскувального оксиду в проміжках між активними елементами фотодіодів була відібрана серія кристалів з високим опором ізоляції ($\sum R_{36} = 45-84$ кОм). Виміряно I_m , I_{OK} та $\sum R_{36}$ ФД до (Табл. 3.5) та після (Табл. 3.6) процесу травлення. Також були отримані зворотні вольт-амперні характеристики ОК і ФЧЕ типового фотодіода до і після травлення (Рис. 3.37).

Як видно з таблиць 3.5 і 3.6 та Рис. 3.37, темнові струми ФЧЕ після травлення зменшилися приблизно вдвічі. Темнові струми ОК при $U_{3M} = -2$ В зменшилися приблизно в 40-60 разів, а при $U_{3M} = -120$ В - приблизно в 200 разів. Після травлення $\sum R_{36}$ збільшився приблизно в 300 разів.

Таблиця 3.5

Значення I_m , I_{OK} та $\sum R_{36}$ ФД до травлення оксиду в зазорах між активними елементами.

I_m , нА								I_{OK} , мкА		$\sum R_{36}$, кОм
ФЧЕ ₁		ФЧЕ ₂		ФЧЕ ₃		ФЧЕ ₄				
$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	
40	200	40	450	50	340	40	180	3	90	75,5
40	210	35	330	35	310	30	180	3,1	51	71,6
50	210	50	260	40	150	40	135	3,5	90	47,1
25	110	25	120	25	100	25	100	1,82	52	84,3
35	70	30	67	35	75	35	65	2,25	63	89,5
30	115	30	125	40	285	40	230	3	79	67,8
35	135	30	105	40	185	47	250	3,24	78	58,3
30	60	30	55	30	60	30	65	2,3	55	78,1
35	95	35	90	35	70	35	70	2,4	52	83,5
55	270	45	190	35	145	40	220	4	78	45,5
60	430	45	165	45	135	60	350	3,7	70	50,1
55	260	45	150	45	160	60	290	3,9	88	52,1

Таблиця 3.6

Значення I_m , I_{OK} та $\sum R_{36}$ ФД після травлення оксиду в зазорах між активними елементами.

$I_m, \text{нА}$								$I_{OK}, \text{мкА}$		$\sum R_{36}, \text{МОм}$
$\Phi \text{ЧЕ}_1$		$\Phi \text{ЧЕ}_2$		$\Phi \text{ЧЕ}_3$		$\Phi \text{ЧЕ}_4$				
$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	$U_{3M}=-2B$	$U_{3M}=-120B$	
15	120	20	265	20	170	15	90	0,1	0,8	16,7
20	100	20	145	20	155	15	90	0,06	0,45	22,2
20	90	20	100	15	85	15	65	0,06	0,42	8,3
10	40	10	40	10	40	10	40	0,05	0,4	28,6
15	40	15	45	15	45	15	45	0,05	0,28	22,2
15	40	15	75	20	165	20	135	0,06	0,28	19
2	75	15	60	20	115	20	130	0,05	0,3	17
15	40	15	40	15	40	15	220	0,05	0,4	23,5
20	70	15	65	15	45	15	60	0,05	0,4	22
15	125	15	85	10	80	15	125	0,05	0,35	25
25	260	20	100	20	85	25	220	0,05	0,41	16
20	145	20	85	20	85	20	155	0,05	0,4	17,4

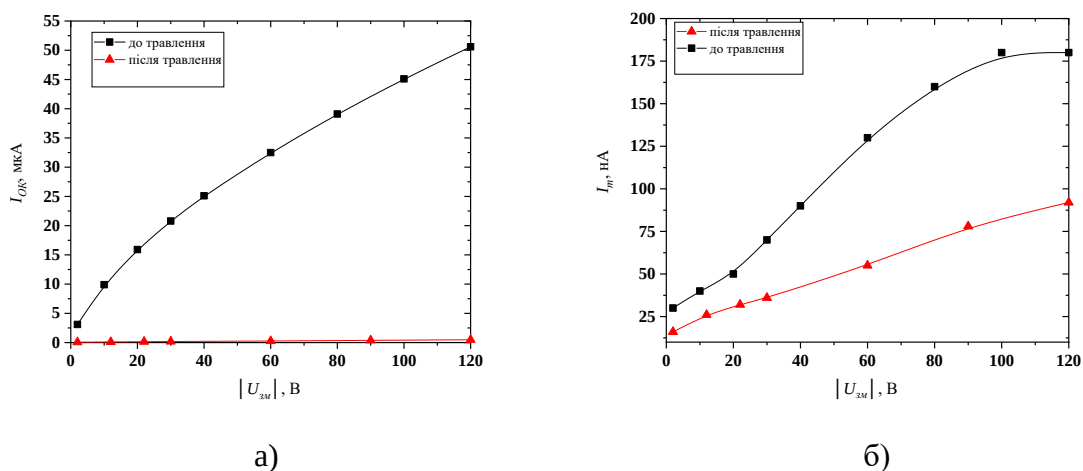


Рис. 3.37. Зворотні ВАХ ОК (а) і ФЧЕ (б) ФД №2 (ФЧЕ4) до і після травлення.

Слід зазначити, що операцію травлення оксидної плівки в проміжок між активними елементами фотодіода слід проводити після операції металізації, фактично перед операціями складання і герметизації, оскільки в процесі хімічної обробки і металізації на поверхні відкритих кремнієвих ділянок можуть утворитися провідні інверсійні шари, внаслідок окиснення на повітрі, що призведе до деякого незначного зниження опору ізоляції між елементами [154, 155]. Додаткове нанесення оксидних плівок нетермічними методами (наприклад, Si_3N_4 шляхом катодного високочастотного магнетронного розпилення) також може запобігти повторному утворенню провідних каналів.

Травлення SiO_2 в проміжках між активними елементами ФД з $\sum R_{зв} \leq 20$ кОм не призвело до покращення описаних вище параметрів. Це свідчило про дифузію неконтрольованих домішок в товщу кремнію і формування провідних поверхневих каналів не тільки на межі розділу Si- SiO_2 , але і в приповерхневій зоні Si. У цьому випадку, крім травлення оксиду, травлення поверхні кремнію проводилося і в зазорах між активними елементами (Рис. 4.35). При травленні канавок глибиною 4-4,2 мкм $\sum R_{зв} \approx 300-500$ кОм. А при збільшенні глибини меза-профілю до 10 мкм опір збільшився до $\sum R_{зв} \approx 10-20$ МОм. Темнові струми таких ФД були близькими до наведених у Табл. 3.6.

Також, як видно з Табл. 3.7, ФД зі зниженим $\sum R_{зв}$ також мали знижені

значення $R_{\text{ФЧЕ-ФЧЕ}}$ і підвищені $K_{\text{ф.зв.}}$, які покращувались після модифікації кристалів запропонованими методами (Табл. 3.8) (вказані параметри вимірювались згідно методики наведених в [50]).

Слід зазначити, що наявність дислокаційних сіток, які перетинають проміжки між ФЧЕ і ОК (Додаток 1), також може спровокувати зниження опору ізоляції між активними елементами, але в цьому випадку механізм зростання провідності не пов'язаний з наявністю інверсійних шарів. У цьому випадку підвищити опір ізоляції запропонованими методами неможливо, тому для зменшення ймовірності зниження опору ізоляції за рахунок дислокаційних механізмів варто використовувати технологічні прийоми зменшення густини дислокацій на поверхні або в об'ємі виробів [156], про що детальніше описано в Додатку 1.

При розриві поверхневих інверсійних каналів між активними елементами запропонованими методами, окрім значного збільшення опору ізоляції, спостерігається його рівномірність, що видно з Табл. 3.8

Таблиця 3.7

Значення $R_{\PhiЧЕ-\PhiЧЕ}$ і $K_{\Phi. 36}$. ФД з різним $\sum R_{36}$ до операції травлення.

$R_{\PhiЧЕ-\PhiЧЕ}, \text{кОм}$					$K_{\Phi. 36}, \%$				
$\sum R_{36} \approx 3,6 \text{ кОм}$					$\sum R_{36} \approx 3,6 \text{ кОм}$				
	$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$		$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$
$\PhiЧЕ_1$		145	162	89	$\PhiЧЕ_1$		12	8	14
$\PhiЧЕ_2$	137		66	95	$\PhiЧЕ_2$	14		16	14
$\PhiЧЕ_3$	100	37		12	$\PhiЧЕ_3$	6	18		36
$\PhiЧЕ_4$	50	80	12		$\PhiЧЕ_4$	14	6	36	
$\sum R_{36} \approx 7,4 \text{ кОм}$					$\sum R_{36} \approx 7,4 \text{ кОм}$				
	$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$		$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$
$\PhiЧЕ_1$		90	192	119	$\PhiЧЕ_1$		8	4	7
$\PhiЧЕ_2$	68		37	74	$\PhiЧЕ_2$	10		14	6
$\PhiЧЕ_3$	137	31		15	$\PhiЧЕ_3$	6	16		34
$\PhiЧЕ_4$	87	72	18		$\PhiЧЕ_4$	13	7	30	
$\sum R_{36} \approx 10,4 \text{ кОм}$					$\sum R_{36} \approx 10,4 \text{ кОм}$				
	$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$		$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$
$\PhiЧЕ_1$		34	307	64	$\PhiЧЕ_1$		16	4	10
$\PhiЧЕ_2$	37		105	253	$\PhiЧЕ_2$	14		8	4
$\PhiЧЕ_3$	354	133		205	$\PhiЧЕ_3$	4	5		4
$\PhiЧЕ_4$	85	284	196		$\PhiЧЕ_4$	8	4	4	
$\sum R_{36} \approx 19,4 \text{ кОм}$					$\sum R_{36} \approx 19,4 \text{ кОм}$				
	$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$		$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$
$\PhiЧЕ_1$		110	731	688	$\PhiЧЕ_1$		6	3	8
$\PhiЧЕ_2$	127		321	578	$\PhiЧЕ_2$	6		4	2
$\PhiЧЕ_3$	704	237		201	$\PhiЧЕ_3$	2	4		4
$\PhiЧЕ_4$	73	596	182		$\PhiЧЕ_4$	8	2	5	
$\sum R_{36} \approx 45,5 \text{ кОм}$					$\sum R_{36} \approx 45,5 \text{ кОм}$				
	$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$		$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$
$\PhiЧЕ_1$		370	2210	340	$\PhiЧЕ_1$		4	2	4
$\PhiЧЕ_2$	370		250	2200	$\PhiЧЕ_2$	4		4	2
$\PhiЧЕ_3$	2490	240		270	$\PhiЧЕ_3$	2	4		4
$\PhiЧЕ_4$	350	2210	270		$\PhiЧЕ_4$	4	2	4	

Таблиця 3.8

Типові значення $R_{\PhiЧЕ-\PhiЧЕ}$ і $K_{\Phi. 36}$. ФД після операції травлення.

$R_{\PhiЧЕ-\PhiЧЕ}, \text{МОм}$					$K_{\Phi. 36}, \%$				
$\sum R_{36} \approx 22,2 \text{ МОм}$					$\sum R_{36} \approx 22,2 \text{ МОм}$				
	$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$		$\PhiЧЕ_1$	$\PhiЧЕ_2$	$\PhiЧЕ_3$	$\PhiЧЕ_4$
$\PhiЧЕ_1$		58,8	54,1	55,5	$\PhiЧЕ_1$		≤ 2	≤ 2	≤ 2
$\PhiЧЕ_2$	66,7		51,3	58,8	$\PhiЧЕ_2$	≤ 2		≤ 2	≤ 2
$\PhiЧЕ_3$	64,5	62,5		50	$\PhiЧЕ_3$	≤ 2	≤ 2		≤ 2
$\PhiЧЕ_4$	58,8	50	48,9		$\PhiЧЕ_4$	≤ 2	≤ 2	≤ 2	

Висновки до третього розділу

1. Виготовлено та досліджено кремнієві фотодіоди для ближньої ІЧ області зі зменшеним впливом короткохвильового фонового випромінювання на рівень корисного сигналу. Мінімізація шумів оптичного походження була реалізована за допомогою запропонованого абсорбційного кремнієвого світлофільтра. При формуванні противідбиваючого покриття на поверхні фільтра можна отримати коефіцієнт відбиття 5-7 відсотків. При збільшенні товщини фільтра коефіцієнт пропускання зменшується через зменшення інтенсивності випромінювання при поширенні в поглинаючому середовищі. При зменшенні товщини фільтра (збільшенні коефіцієнта пропускання) його край поглинання зміщується в бік коротших довжин хвиль. При збільшенні товщини фільтра максимум його спектральної характеристики зміщується в бік більших довжин хвиль. Фільтр товщиною $d=70$ мкм пропускає випромінювання із $\lambda \geq 800-820$ нм, а при $d=430$ мкм - $\lambda \geq 940-960$ нм. Використання оптичних концентраторів дозволяє нівелювати втрати інтенсивності випромінювання при використанні світлофільтрів.

2. Отримано фотодіоди зі збільшеним коефіцієнтом збирання неосновних носіїв заряду та підвищеною чутливістю. Встановлено, що зменшення товщини кристала з 500 мкм до 300 мкм дозволяє підвищити чутливість ФД на 25% при зворотній напрузі $U_{zm} = -2$ В. Зменшення товщини кристала негативно впливає на його механічну міцність, але це нівелюється утворенням ребер жорсткості на зворотному боці кристала. ФД зі зменшеною товщиною підкладки мають менші темнові струми, але дещо поступаються за ємністю чутливих елементів.

3. Виготовлено та досліджено кремнієві *p-i-n* меза-фотодіоди. Запропоновано використовувати метод ХДП із маскувальним шаром золота з адгезійним шаром хрому для утворення меза-профілю. Технологія меза-

фотодіодів дозволяє виключити перше високотемпературне окислення з технологічного циклу, що сприяє зниженню густини поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂ і зменшує ступінь деградації електрофізичних характеристик кремнію. Виключення операції першого термічного окислення в меза-фотодіодах дозволяє отримати зразки із чутливістю $S_{imn.}=0,5-0,53$ А/Вт порівняно із $S_{imn.}=0,45-0,48$ А/Вт в серійних.

4. Запропоновано метод підвищення опору ізоляції ФЧЕ і ОК кремнієвих чотириквadrантних ФД шляхом розриву інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂. Метод ґрунтується на травленні оксидної плівки в проміжках між активними елементами, що дозволяє видалити інверсійні шари. У разі відсутності збільшення опору ізоляції після цих маніпуляцій пропонується формувати меза-профіль шляхом травлення кремнію в проміжках між активними елементами на глибину до 10 мкм. При застосуванні запропонованих методів до ФД з низьким опором ізоляції отримано такі результати: темнові струми ФЧЕ зменшилися приблизно вдвічі; темнові струми ОК при $U_{zm}=-2$ В зменшилися приблизно в 40-60 разів, а при $U_{zm}=-120$ В зменшилися приблизно в 200 разів; $\sum R_{3\phi}$ збільшився приблизно в 300 разів після процесу травлення. Метод також зменшує коефіцієнт фотозв'язку.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено фотоелектричні властивості кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структур, та фізико-технічні особливості виготовлення на їх основі високочутливих фотоприймачів - $p-i-n$ фотодіодів для детектування електромагнітного випромінювання видимої та ближньої ІЧ області спектру. Під час досліджень отримано наступні результати та зроблено висновки:

1. Фотодіоди, виготовлені на основі кремнію з більшим питомим опором, більш схильні до утворення інверсійних каналів на межі розділу оксид-напівпровідник. Це викликано тим, що зміну поверхневого типу провідності підкладки матеріалу з більшим питомим опором спричинює менша кількість неконтрольованих домішок. Зразки з більшим питомим опором базового матеріалу мають менший ізоляційний опір між чутливими елементами, оскільки цей параметр залежить від густини поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂ та наявності інверсійних шарів, які в свою чергу залежать від технології утворення SiO₂.

2. При збільшенні концентрації фосфору (зменшенні поверхневого опору R_S) в n^+ -шарі спостерігається зниження темнових струмів фоточутливих елементів внаслідок збільшення ефективності геттерування генераційно-рекомбінаційних центрів (при $R_S \approx 8,1$ Ом/□ $I_m = 350-700$ нА, при $R_S \approx 1,9-2,4$ Ом/□ $I_m = 25-30$ нА ($U_{zm} = -120$ В)).

3. Легування бором тилового сторони підкладки фотоприймача значно покращує його параметри. Встановлено, що p^+ -шар виконує функцію не лише кращого омичного контакту, а і додаткову функцію геттеру дефектів кристалічної ґратки. Про це свідчить зниження темнових струмів фотодіодів після дифузії бору на порядок. Під час операції дифузії бору n^+ -шар також функціонує як геттер. Хіміко-динамічне полірування тилової сторони

підкладок перед дифузією бору зменшує темнові струми фотоприймачів і покращує кінцеві електрофізичні характеристики кремнію, зокрема, питомий опір i -області та довжину дифузії неосновних носіїв заряду внаслідок видалення неконтрольованих домішок із товщі кремнію зі зворотної сторони (близько 10-20 мкм), які є рекомбінаційними центрами та можуть дифундувати на більшу глибину під час тривалої останньої термічної операції ($I_m=300-350$ нА в ФД з хіміко-динамічним поліруванням тилової сторони, $I_m=550-650$ нА в ФД без хіміко-динамічного полірування тилової сторони перед дифузією бору).

4. Фотодіоди, виготовлені без p^+ -шару, характеризуються електричним пробоем p - n переходу в діапазоні зворотних напруг 230-260 В, що значно підвищує їх чутливість і фотострум ($S_{imn} \geq 0,7$ А/Вт). Такі структури можна рекомендувати для створення лавинних фотодіодів. Причиною пробоем є досягнення областю просторового заряду дефектної тилової сторони підкладки, де в свою чергу ці дефекти можуть бути джерелами носіїв заряду.

5. Для отримання максимальної фоточутливості p - i - n фотодіодів потрібно, щоб падаюче випромінювання поглиналося в високоомній i -області. Для збільшення кількості випромінювання, яке братиме участь у фотогенерації носіїв заряду потрібно забезпечити високе пропускання n^+ - та p^+ -областей. Оптимальними значеннями поверхневого опору після дифузії фосфору та бору, які забезпечують належний рівень геттерування та високе пропускання n^+ - та p^+ - шарів є $R_s \approx 2,7-3$ Ом/□, та $R_s \approx 16-18$ Ом/□ відповідно. Такі значення поверхневого опору дозволяють отримувати фотодіоди з покращеними параметрами: значення темнового струму $I_m \leq 30$ нА та імпульсної чутливості $S_{imn} \approx 0,48-0,5$ А/Вт при $U_{zm} = -120$ В.

6. Виготовлено та досліджено кремнієві фотодіоди для ближньої ІЧ області зі зменшеним впливом короткохвильового фонового випромінювання на рівень корисного сигналу. Мінімізація шумів оптичного походження була

реалізована за допомогою запропонованого абсорбційного кремнієвого світлофільтра. При формуванні противідбиваючого покриття на поверхні фільтра можна отримати коефіцієнт відбиття 5-7 %. При збільшенні товщини фільтра коефіцієнт пропускання зменшується через зменшення інтенсивності випромінювання при поширенні в поглинаючому середовищі. При зменшенні товщини фільтра (збільшенні коефіцієнта пропускання) його край поглинання зміщується в бік коротших довжин хвиль. При збільшенні товщини фільтра максимум його спектральної характеристики зміщується в бік більших довжин хвиль. Фільтр товщиною $d=70$ мкм пропускає випромінювання із $\lambda \geq 800-820$ нм, а при $d=430$ мкм - $\lambda \geq 940-960$ нм. Використання оптичних концентраторів дозволяє нівелювати втрати інтенсивності випромінювання при використанні світлофільтрів.

7. Отримано фотодіоди зі збільшеним коефіцієнтом збирання неосновних носіїв заряду та підвищеною чутливістю. Встановлено, що зменшення товщини кристала з 500 мкм до 300 мкм дозволяє підвищити чутливість ФД на 25% при зворотній напрузі $U_{zm} = -2$ В. Зменшення товщини кристала негативно впливає на його механічну міцність, але це нівелюється утворенням ребер жорсткості на тилівій стороні кристала. Фотодіоди зі зменшеною товщиною підкладки мають менші темнові струми, але дещо поступаються за ємністю чутливих елементів.

8. Виготовлено та досліджено кремнієві *p-i-n* меза-фотодіоди. Запропоновано використовувати для метод хіміко-динамічного полірування із маскувальним шаром золота з адгезійним шаром хрому для утворення меза-профілю. Технологія меза-фотодіодів дозволяє виключити перше високотемпературне окислення з технологічного циклу, що сприяє зниженню густини поверхневих станів на межі розділу Si-SiO₂ і мінімізує погіршення електрофізичних характеристик кремнію. Виключення операції першого термічного окислення в меза-фотодіодах дозволяє отримати зразки із

чутливістю $S_{imn.}=0,5-0,53$ А/Вт порівняно із $S_{imn.}=0,45-0,48$ А/Вт в серійних.

9. Запропоновано метод підвищення опору ізоляції фоточутливих елементів і охоронного кільця кремнієвих чотириквadrантних фотодіодів шляхом розриву інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO₂. Метод ґрунтується на травленні оксидної плівки в проміжках між активними елементами, що дозволяє видалити інверсійні шари. У разі відсутності збільшення опору ізоляції після цих маніпуляцій пропонується формувати меза-профіль шляхом травлення кремнію в проміжках між активними елементами на глибину до 10 мкм. При застосуванні запропонованих методів до фотодіодів з низьким опором ізоляції отримано такі результати: темнові струми фоточутливих елементів зменшилися приблизно вдвічі; темнові струми охоронних кілець при $U_{зм}=-2$ В зменшилися приблизно в 40-60 разів, а при $U_{зм}=-120$ В зменшилися приблизно в 200 разів; $\sum R_{зг}$ збільшився приблизно в 300 разів після процесу травлення. Метод також зменшує коефіцієнт фотозв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Irkha V., & Markolenko P. Analysis of photodetectors used in sensor networks. *Modern engineering and innovative technologies*. 2023. Vol. 30, No. 01. P. 30-37. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-30-00-02>
2. Bakhadyrkhanov M. K., Isamov S. B., Kenzhaev Z. T., Melebaev D., Zikrillayev K. F. & Ikhtiyarova G. A. Silicon photovoltaic cells with deep p–n-junction. *Applied Solar Energy*. 2020. No. 56. P. 13-17. <https://doi.org/10.3103/S0003701X2001003X>
3. Spagnolo G. S., Postiglione A., & De Angelis I. Simple equipment for teaching internal photoelectric effect. *Physics Education*. 2020. Vol. 55, No. 5, P. 055011. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab97bf>
4. Smythe R. J., & Smythe R. J. Light, Optics, and Photoelectric Effects. *Arduino Measurements in Science: Advanced Techniques and Data Projects*. 2022. P. 171-265. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6781-3_4
5. Wei Z., Yu J., Zuo M., & Nie P. Experimental study of millisecond pulse laser ablation biased silicon-based PIN photodiodes. *Journal of Applied Physics*. 2024. Vol. 135, No. 11. <https://doi.org/10.1063/5.0187696>
6. Laube S. M., Gasser C., Schneider-Hornstein K., & Zimmermann H. Highly-Sensitive Integrating Optical Receiver With Large PIN Photodiode. *IEEE Photonics Journal*. 2024. Vol. 16, No. 6. P. 1-9. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2024.3487302>
7. Rawat A., & Islam M. S. High-speed PiN photodiode design space exploration to break the speed-efficiency trade-off. In *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXXII*. 2024, March. Vol. 12880, P. 194-200). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3003413>
8. Kukurudziak M. S., Koziarskyi I. P., Solodkyi M. S., Mastruk E. V., Kopach V. V., Semeniuk Y. O., Pavliuk M. M. Photodetectors for x- and γ -ray

scintillators. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 2. P. 281-286.
<https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-2-34>

9. Helmers H., Lopez E., Höhn O., Lackner D., Schön J., Schauerte M., ... & Bett A. W. 68.9% efficient GaAs-based photonic power conversion enabled by photon recycling and optical resonance. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*. 2021. Vol. 15, No. 7. P. 2100113. <https://doi.org/10.1002/pssr.202100113>

10. Liu H., Pasanen T. P., Fung T. H., Isometsä J., Haarahiltunen A., Hesse S., ... & Savin H. Near-infrared germanium PIN-photodiodes with > 1 A/W responsivity. *Light: Science & Applications*. 2025. Vol. 14, No. 1. P 9. <https://doi.org/10.1038/s41377-024-01670-4>

11. Федоренко А. В. Спектральна фоточутливість дифузійних Ge p–i–n-фотодіодів. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2020. № 3–4. С. 17–23. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2020.3-4.17>

12. Westerveld W. J., Mahmud-Ul-Hasan M., Shnaiderman R., Ntziachristos V., Rottenberg X., Severi S., & Rochus V. Sensitive, small, broadband and scalable optomechanical ultrasound sensor in silicon photonics. *Nature Photonics*. 2021. Vol. 15, No. 5. P. 341-345. <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00776-0>

13. Muller, A., Ghosh, M., Sonnenschein, R., and Woditsch, P. Silicon for photovoltaic applications. *Materials Science and Engineering: B*. 2006. Vol. 134, No. 2-3. P. 257. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.06.054>

14. Ballif C., Haug F. J., Boccard M., Verlinden P. J., & Hahn . Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*. 2022. Vol. 7, No. 8. P. 597-616. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>

15. Pan X., Li S., Li Y., Guo P., Zhao X., & Cai Y. Resource, characteristic, purification and application of quartz: a review. *Minerals Engineering*,. 2022. Vol. 183. Article ID 107600. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107600>

16. Hilleringmann U. Silicon Wafer Production. In *Silicon Semiconductor Technology: Processing and Integration of Microelectronic Devices*. 2023. P. 5-20. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-41041-4_2
17. Son B., Lin Y., Lee K. H., Chen Q., & Tan C. S. Dark current analysis of germanium-on-insulator vertical pin photodetectors with varying threading dislocation density. *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 127, No. 20. <https://doi.org/10.1063/5.0005112>
18. Kukurudziak M. S. Formation of dislocations during phosphorus doping in the technology of silicon p-i-n photodiodes and their influence on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 04015-1 – 04015-6. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.14(4).04015)
19. Kukurudziak M. S., Andreeva O. P., & Lipka V. M. High-resistivity p-type silicon-based pin photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm. *Technology and Design in Electronic Equipment*. 2020. No 5-6. P. 16-19. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16>
20. Marozas B. T., Hughes W. D., Du X., Sidor D. E., Savich G. R., & Wicks G. W. Surface dark current mechanisms in III-V infrared photodetectors. *Optical Materials Express*. 2018. Vol. 8, No. 6. P. 1419-1424. <https://doi.org/10.1364/OME.8.001419>
21. Jonak-Auer I., Roger F., & Synooka O. Optimized integrated PIN photodiodes with improved backend layers. *Sensors & Transducers*. 2019. Vol. 237, No. 9/10. P. 67-74.
22. Sher M. J., & Hemme E. G. Hyperdoped silicon materials: from basic materials properties to sub-bandgap infrared photodetectors. *Semiconductor Science and Technology*. 2023. Vol. 38, No. 3. Article ID 033001. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/acb16b>
23. Kukurudziak M. S. Diffusion of phosphorus in technology for

manufacturing silicon p-i-n photodiodes. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2022. Vol. 25, No. 4. P. 385-393. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.04.385>

24. Maeda R., Ueno K., & Fujioka H. Pulsed sputtering selective epitaxial formation of highly degenerate n-type GaN ohmic contacts for GaN HEMT applications. *Applied Physics Express*. 2024. Vol. 17, No. 1. Article ID 011006. <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ad16ae>

25. Vinod P. N. Specific contact resistance of the porous silicon and silver metal Ohmic contact structure. *Semiconductor science and technology*. 2005. Vol. 20, No. 9. P. 966. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/9/014>

26. Tuck B. *Atomic diffusion in III-V semiconductors*. CRC Press. 2021. 236 p.

27. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Features of diffusion doping and boron gettering of silicon p-i-n photodiodes. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022, October. P. 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916420>

28. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021, December. Vol. 12126. P. 511-518. <https://doi.org/10.1117/12.2616170>

29. Yan D., Cuevas A., Wan Y., & Bullock . Passivating contacts for silicon solar cells based on boron-diffused recrystallized amorphous silicon and thin dielectric interlayers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. No. 152. P. 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.033>

30. De Salvador D., Napolitani E., Bisognin G., Pesce M., Carnera A., Bruno E., ... & Mirabella S. Boron diffusion in extrinsically doped crystalline silicon. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*. 2010. Vol.

81, No. 4. Article ID 045209. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.045209>

31. Mirabella S., De Salvador D., Napolitani E., Bruno E., & Priolo F. Mechanisms of boron diffusion in silicon and germanium. *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113, No. 3. <https://doi.org/10.1063/1.4763353>

32. Liu A., Phang S. P., & Macdonald D. Gettering in silicon photovoltaics: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2022. No. 234. Article ID 111447. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111447>

33. Zhang Q., Zhou Z., Shen Y., Rao W., Xiao S., Wu, X., ... & Wang Z. The preparation of polysilicon films on highly boron doped silicon substrates and their effects on Cu out-diffusion. *RSC advances*. 2024. No. 8. P. 5207-5215. <https://doi.org/10.1039/D3RA08772G>

34. Setälä O. E., Chen K., Pasanen T. P., Liu X., Radfar B., Vähänissi V., & Savin H. Boron-implanted black silicon photodiode with close-to-ideal responsivity from 200 to 1000 nm. *ACS photonics*. 2023. Nol. 6. P. 1735-1741. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.2c01984>

35. Šakić A., Nanver L. K., Scholtes T. L., Heerkens C. T. H., Knežević T., Van Veen G., ... & Vogelsang P. Boron-layer silicon photodiodes for high-efficiency low-energy electron detection. *Solid-state electronics*. 2011. No. 65. P. 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.sse.2011.06.042>

36. Xia Z., Zang K., Liu D., Zhou M., Kim T. J., Zhang H., ... & Ma Z. High-sensitivity silicon ultraviolet p⁺-in avalanche photodiode using ultra-shallow boron gradient doping. *Applied Physics Letters*. 2017. Vol. 111, No. 8. Art. ID 081109. <https://doi.org/10.1063/1.4985591>

37. Ravi K.V. Imperfections and impurities in semiconductor silicon. New York: Wiley, 1981. 459 p.

38. Xiang C., Bowers S. M., Bjorlin A., Blum R., & Bowers J. E. Perspective on the future of silicon photonics and electronics. *Applied Physics Letters*. 2021. Vol. 118, No. 22. <https://doi.org/10.1063/5.0050117>

39. Zhang P., Duan J., Chen G., Li, J., & Wang W. Production of polycrystalline silicon from silane pyrolysis: A review of fines formation. *Solar Energy*. 2018. No. 174. P 44-53. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.12.031>
40. Xu H. Characterization of n-type mono-crystalline silicon ingots produced by continuous Czochralski (Cz) Technology. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 77. P. 658-664. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.095>
41. Vasilév Y. B., Verezub N. A., Mezhenyi M. V., Prosolovich V. S., Prostomolotov, A. I., & Reznik, V. Y. Features of defect formation under the thermal treatment of dislocation-free single-crystal large-diameter silicon wafers with the specified distribution of oxygen-containing gettering centers in the bulk. *Russian microelectronics*. 2013. No. 42. P. 467-476. <https://doi.org/10.1134/S1063739713080155>
42. Arnberg L., Di Sabatino M., & Ovrelid E. J. State-of-the-art growth of silicon for PV applications. *Journal of crystal growth*. 2012. No. 360. P. 56-60. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2012.03.024>
43. Ghandiparsi S., Elrefaie A. F., Mayet A. S., Landolsi T., Bartolo-Perez C., Cansizoglu H., ... & Islam M. S. High-speed high-efficiency photon-trapping broadband silicon PIN photodiodes for short-reach optical interconnects in data centers. *Journal of Lightwave Technology*. 2019. Vol. 37, No. 23, P. 5748-5755. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2937906>
44. Lim S. Q., Lew C. K., Chow P. K., Warrender J. M., Williams J. S., & Johnson B. C. Process-induced defects in Au-hyperdoped Si photodiodes. *Journal of Applied Physics*. 2019. Vol. 126, No. 22. <https://doi.org/10.1063/1.5128146>
45. Kranert C. Trempa M. Reimann C. Friedrich J. Metal contamination of silicon from the furnace atmosphere after crystallization. *Journal of Crystal Growth*. 2021, Vol. 559. P. 126026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2021.126026>.
46. Meteleva-Fischer Y. V. Böttger A. J. Sloof W. G. Kraaijveld B. Gas-Phase Interactions as Sources of Contamination in Solar Silicon. *Metallurgical and*

Materials Transactions E. 2014. Vol. 1. P. 174–179. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40553-014-0017-6>.

47. Gaidar G. P. Influence of different thermal treatment regimes on the hall parameters and the lifetime of charge carriers of transmutation doped silicon crystals. *Journal of Physical Studies*. 2018. Vol. 22, No. 4. P. 4601–4601. DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.22.4601>.

48. Yoo W. S. Fukada T. Yokoyama I. Kang K. Takahashi N. Thermal behavior of large-diameter silicon wafers during high-temperature rapid thermal processing in single wafer furnace. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2002. Vol. 41, No. 7R. P. 4442. DOI: <https://doi.org/10.1143/JJAP.41.4442>.

49. Kukurudziak M. Silicon four element p-i-n photodiode with improved characteristics. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 1. P. 92-100. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.07>.

50. Kukurudziak M. S. A method of increasing the interquadrant resistance of four-quadrant p-i-n photodiodes. *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19, No. 9, P. P09006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/P09006>.

51. Кругляк Ю. О. Стріха М. В. Фізика нанотранзисторів: напруга на затворі, поверхневий потенціал та рухливий електронний заряд у масивній структурі MOS та в тонкій SOI. *Сенсорна електроніка і мікросистемні технології*. 2019. Т. 16, № 2. С. 5–31. DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2019.2.171224>.

52. Kukurudziak M. S. Isolation of Responsive Elements of Planar Multi-Element Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 3. P. 434-440. DOI: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-48>.

53. Sartori M. Arosio M. Baschiroto A. Characterization of an integrated High-Voltage capacitance in Silicon-On-Insulator technology. In: *2023 18th Conference on Ph. D Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*. 2023. Pp. 237–240. IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/PRIME58259.2023.10161956>.

54. Piotrowski T. Węgrzecki M. Stolarski M. Krajewski T. Study of the spatial distribution of minority carrier diffusion length in epiplanar detector structures. *Opto-Electronics Review*. 2015. Vol. 23, No. 4. Pp. 265–270. DOI: <https://doi.org/10.1515/oere-2015-0035>.
55. Gautier G. Leduc P. Porous silicon for electrical isolation in radio frequency devices: A review. *Applied Physics Reviews*. 2014. Vol. 1, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4833575>.
56. Shan M. Guo C. Zhao Y. Chen Q. Deng L. Zheng Z. Chen C. Nanoporous AlGaIn distributed Bragg reflectors for deep ultraviolet emission. *ACS Applied Nano Materials*. 2022. Vol. 5, No. 7. Pp. 10081–10089. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsanm.2c02689>.
57. Boltar K. O. Chinareva I. V. Lopukhin A. A. Yakovleva N. I. Matrix planar and mesa-structures based on heteroepitaxial InGaAs layers. *Applied Physics*. 2013. No. 5. Pp. 10–15.
58. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. High-responsivity silicon p–i–n mesa-photodiode. *Semiconductor Science and Technology*. 2023. Vol. 38, No. 8. P. 085007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6641/acdf14>.
59. Дубіковський О. В. Мас-спектрометричні дослідження в технології виготовлення багатоелементних ІЧ-фотоприймачів на основі антимоніду індію (за матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 28 грудня 2022 р.). *Вісник НАН України*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2023.02.079>.
60. Rafi J. M. Pellegrini G. Quirion D. Hidalgo S. Godignon P. Matilla O. Fajardo P. 10 μm -thick four-quadrant transmissive silicon photodiodes for beam position monitor application: electrical characterization and gamma irradiation effects. *Journal of Instrumentation*. 2017. Vol. 12, No. 01. P. C01004. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/01/C01004>.
61. Rafi J. M. Pellegrini G. Godignon P. Quirion D. Hidalgo S. Matilla O.

Fajardo P. Four-quadrant silicon and silicon carbide photodiodes for beam position monitor applications: electrical characterization and electron irradiation effects. *Journal of Instrumentation*. 2018. Vol. 13, No. 01. Art. C01045. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/01/C01045>.

62. Kukurudziak M. S., & Lipka V. M. Influence of silicon characteristics on the parameters of manufactured photonics cells. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 4. P. 197-205. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-4-24>

63. Wikipedia contributors. Voltage divider. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*: website. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage_divider. (date of application: May 2025).

64. Atalla M. M. Tannenbaum E. Scheibner E. J. Stabilization in silicone surfaces by thermal grovns oxides. *Bell System Technical Journal*. 1959. Vol. 38. P. 749.

65. Sah S. T. Sello H. Sah C. Tremere D. A. Diffusion of phosphorus in silicon oxide film. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1959. Vol. 11. P. 288.

66. Chen H. Morita K. Ma X. Chen Z. Wang Y. Boron removal for solar-grade silicon production by metallurgical route: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2019. Vol. 203. P. 110169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110169>.

67. Khan S. B. Irfan S. Zhuanghao Z. Lee S. L. Influence of refractive index on antireflectance efficiency of thin films. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 9. P. 1483. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091483>.

68. Kukurudziak M. S. Problems of Masking and Anti-Reflective SiO₂ in Silicon Technology. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 2. P. 289-295. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-2-33>

69. Haas P., Tran F., Blaha P. Calculation of the lattice constant of solids with semilocal functionals. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*. 2009. Vol. 79, No. 8. P. 085104.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.085104>

70. Polley C.M., Clarke W.R., Miwa J.A., Simmons M.Y., Wells J.W. Microscopic four-point-probe resistivity measurements of shallow, high density doping layers in silicon. *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 101, No. 26. <https://doi.org/10.1063/1.4773485>

71. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. М.: Радио и связь. 1991.

72. Shupenev A.E., Pankova N.S., Korshunov I.S., Grigoryants A.G. An analysis of destructive methods of thin films thickness measurement. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2019. No. 3. P. 31. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-3-31-39>

73. Zi S. Semiconductor physics. Moscow: Mir. 1984.

74. Кукурудзяк М. С. Проблеми хіміко-динамічного полірування в технології кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2023. Т. 14, № 1. С. 42-52. <https://doi.org/10.15407/hftp14.01.042>

75. Kukurudziak M.S., Koziarskyi D.P., Koziarskyi I.P., Maistruk E.V., Ilashchuk M.I., Kysil D.V. Electrical, Optical, and Structural Properties of Silicon n+-p Structure. *East European Journal of Physics*. 2025. № 3. С. 336-342. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-3-32>

76. Liu A., Yan D., Phang S.P., Cuevas A., Macdonald D. Effective impurity gettering by phosphorus-and boron-diffused polysilicon passivating contacts for silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2018. Vol. 179. P. 136-141. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.11.004>

77. Кукурудзяк М. Проблематика різання підкладок алмазованим диском в технології кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Наукоємні технології*. 2022. Т. 54, № 2. С. 127-137. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.54.16750>

78. Кукурудзяк М. С. Залежність параметрів напівпровідникових приладів від їх розміщення на підкладці. *Інформаційні технології: наука,*

техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023. Харків : НТУ «ХПІ». С. 191-192. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/ea5b83c5-0561-47cb-a4d0-67aacd51c994>

79. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., & Koziarskyi I. P. Influence of Boron Diffusion on Photovoltaic Parameters of n⁺-p-p⁺ Silicone Structures and Based Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 4. P. 289-296. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-4-31><https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-4-31>

80. Bauer J., Lausch D., Blumtritt H., Zakharov N., Breitenstein O. Avalanche breakdown in multicrystalline solar cells due to preferred phosphorous diffusion at extended defects. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2013. Vol. 21, No. 7. P. 1444-1453. <https://doi.org/10.1002/pip.2220>

81. Rouger N. Electric field distribution and voltage breakdown modeling for any PN junction. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2016. Vol. 35, No. 1. P. 137-156. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2014-0330>

82. Breitenstein O., Bauer J., Wagner J.M., Zakharov N., Blumtritt H., Lotnyk A., Warta W. Defect-induced breakdown in multicrystalline silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2010. Vol. 57, No. 9. P. 2227-2234. <https://doi.org/10.1109/TED.2010.2053866>

83. Baliga B.J. Fundamentals of power semiconductor devices. *Springer Science & Business Media*. 2010. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93988-9_3

84. Chien, C. (Ed.). The Hall effect and its applications. Springer Science & Business Media. 2013.

85. Kukurudziak M. S. Effect of Structural Defects on Parameters of Silicon Four-Quadrant p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 2. P. 345-352. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-41>

86. Kukurudziak M. S. Degradation of Silicon Resistivity During Thermal Operations in p-i-n Photodiodes Technology. 2023 *IEEE 13th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)*. 2023, September. P. 301-305. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310993>

87. Кукурудзяк М. С. Метод оцінки часу життя неосновних носіїв заряду кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2023)*. Тези доповідей на VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції: 22-24 листопада 2023 р., м. Дніпро, 2023. С. 191-192. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2023.pdf>

88. Бузанова, Л.К., Гліberman, А.Я. Напівпровідникові фотоприймачі. Москва: Енергія. 1976.

89. Кукурудзяк М. С. Дослідження спектральної характеристики чутливості р-і-п фотодіодів. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2022)*. Тези доповідей на VII Всеукраїнській науково-практичній конференції: 23-25 листопада 2022 р., м. Дніпро, 2022. С. 155-156. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2022.pdf>

90. Кукурудзяк М. С. Аналіз спектральної характеристики чутливості дифузійних р-і-п фотодіодів на основі високоомного р-Si. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2023. Т. 28, № 1. С. 275010-1 – 275010-6. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.275010>

91. Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Добровольський Ю.Г. Фотоприймальний пристрій, стійкий до фонові засвітки, з розширеним динамічним діапазоном вхідних сигналів. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2021. № 3-4. С. 3-8. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.3-4.03>

92. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Methods of Correction of Spectral Characteristics of Silicon Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 1. P. 290-294. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-1-34>

93. Go E., Jin H., Yoon S., Park S., Park S.H., Yu H., Son H.J. Unraveling the origin of dark current in organic bulk heterojunction photodiodes for achieving high near-infrared detectivity. *ACS Photonics*. 2022. Vol. 9, No. 6. P. 2056-2065. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c00193>
94. Bi X., Li J., Gu Z., Tang B., Sheng C., Yang Y., Xu Q. High sensitivity and dynamic-range 25 Gbaud silicon receiver chipset with current-controlled DC adjustment path and cube-shape Ge-on-Si PD. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2020. Vol. 67, No. 11. P. 3991-4001. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.3011292>
95. Pérez J.P.A., Pueyo S.C., López B.C. Automatic gain control. Springer Fachmedien. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0167-4>
96. Сусліков Л.М. Проблеми та завдання сучасного етапу розвитку селективної фільтрації оптичного випромінювання. *Науковий вісник Ужгородського університету: Серія: Фізика*. 2009. № 26. С. 123-143.
97. Ropyak L.Y., Makoviichuk M.V., Shatskyi I.P., Pritula I.M., Gryn L.O., Belyakovskiy V.O. Stressed state of laminated interference-absorption filter under local loading. *Funct. Mater.* 2020. Vol. 27, No. 3. P. 638-642. <https://doi.org/10.15407/fm27.03.638>
98. ГОСТ 9411-91. Кольорове оптичне скло. Технічні умови. [чинний з 1993-01-01]. М.: Видавництво стандартів, 1993. 48 с. (Державний стандарт СРСР).
99. Ishii N., Xia P., Kim C., Lu F., Kanai T., Akiyama H., Itatani J. High harmonic generation in reflection and transmission from gallium arsenide. *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. IEEE. 2019, May. P. 1-2. https://doi.org/10.1364/CLEO_QELS.2019.FM4M.1
100. Першина С., Кашуба А., Семків І., Сторожук Ю., Ільчук Г., Петрусь Р. Осадження та оптична характеристика тонких плівок телуриду кадмію. *Вісник Львівського університету. Серія Фізика*. 2021. Т. 58, № 3.

<https://doi.org/10.30970/vph.58.2021.3>

101. Курбатов Д., Опанасюк А., Опанасюк Н., Данильченко С. Структурно-оптичні характеристики плівок сульфідів цинку, отриманих методом квазізамкнутого об'єму. *Вісник Львівського університету. Серія фізична*. 2008. № 42. С. 108-118.

102. Ivashchenko M. M., Opanasyuk A. S., Opanasyuk N. M., Danilchenko, S. M., & Starikov V. V. Structural and optical characteristics of ZnSe and CdSe films condensed on non-oriented substrates. *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2011. Vol. 14, No. 2. P. 157-163.
<https://doi.org/10.15407/spqeo14.02.157>

103. Zee S. M. *Physics of Semiconductor Devices*. Ripol Classic. 1973.

104. Kukurudziak M. S. P-I-N Photodiode with Optical Concentrator for the Near-IR Region. *Proceedings - IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO*. 2024, May. P. 650-653.

<https://doi.org/10.1109/ELNANO63394.2024.10756905>

105. Kukurudziak M. S. Silicon p-i-n Photodiode with Reduced Background Radiation. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2023, October. P. 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312979>

106. Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Перепелиця О.О., Сидор О.М., Кукурудзяк М.С. Кремнієвий *p-i-n* фотодіод із відрізаючим оптичним фільтром: Пат. 151697 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № u 202107818; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35.
<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282775>

107. Кукурудзяк М. С. Фотодіод з абсорбційним кремнієвим фільтром. *IX Всеукраїнська науково-практична конференція «MEICS-2024»: Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем, 27-29 листопада, 2024 р. Дніпро, 2024. С. 237-238. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/ConfProg2024.pdf>*

108. Igo A.V. Raman light scattering in silicon with the crystal structure damaged by implantation of carbon ions. *Optics and Spectroscopy*. 2020. Vol. 128. P. 1125-1130. <https://doi.org/10.1134/S0030400X20080135>
109. Wu M.C., Wu C.H. Photodiodes with high speed and enhanced wide spectral range. In: *Photodiodes-Communications, Bio-Sensings, Measurements and High-Energy Physics*. IntechOpen. 2011.
110. Sakai K., Kawano M., Aruga H., Takagi S.I., Kaneko S.I., Suzuki J., Fukuda K.I. Photodiode packaging technique using ball lens and offset parabolic mirror. *Journal of Lightwave Technology*. 2009. Vol. 27, No. 17. P. 3874-3879. <https://opg.optica.org/jlt/abstract.cfm?URI=jlt-27-17-3874>
111. Wang J., Dai Y., Cao X., Li Z., Xu X., Bodepudi S.C., Xu Y. Broadband lens and graphene/silicon photodiode for wide spectral imaging. *Optics Letters*. 2024. Vol. 49, No. 3. P. 518-521. <https://opg.optica.org/10.6084/m9.figshare.c.6994173.v2>
112. Data sheet S6801/S6968 series. *Hamamatsu Photonics*: website. URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s6801_etc_kpin1046e.pdf (date of application: May 2025).
113. Data sheet S6036 series. *Hamamatsu Photonics*: website. URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s6036_series_kpin1078e.pdf (date of application: May 2025).
114. Data sheet VTP1232H. *Excelitas Technologies Corp.*: website. URL: <https://www.excelitas.com/product/vtp1232h-si-pd-t1-34-lensed-2326-mm2> (date of application: May 2025).
115. Data sheet VTP1112H. *Excelitas Technologies Corp.*: website. URL: <https://www.excelitas.com/product/vtp1112h-si-pd-46-lensed-16-mm2> (date of application: May 2025).

116. Data sheet VTP1332H. *Excelitas Technologies Corp.*: website. URL: <https://www.excelitas.com/product/vtp1332h-si-pd-t1-34-lensed-irt-2326-mm2> (date of application: May 2025).
117. Proctor C. M., Kuik M., & Nguyen T. Q. Charge carrier recombination in organic solar cells. *Progress in Polymer Science*. 2013. Vol. 38, No. 12. P. 1941-1960. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.08.008>
118. Yang B., Zhang F., Chen J., Yang S., Xia X., Pullerits T., ... & Han K. Ultrasensitive and fast all-inorganic perovskite-based photodetector via fast carrier diffusion. *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29, No. 40. Art. ID 1703758. <https://doi.org/10.1002/adma.201703758>
119. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Study of the Charge Carrier Collection Coefficient of Silicon p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 1. P. 386-392. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-1-39>
120. Кукурудзяк М. С. Вплив хімічної обробки на товщину просвітлюючого SiO₂ в кремнієвій технології. *Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка: тези доповідей на VII Міжнародній науково-практичній конференції: 14-16 травня, 2022 р. Кременчук, 2022. С. 18-19. URL: https://drive.google.com/file/d/1l6LZMdaehKpjnbeE9BEoZapmBXCXq_QL/view*
121. Kukurudziak M. S. Influence of surface resistance of silicon p-i-n photodiodes n^+ -layer on their electrical parameters. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. Vol. 23, No. 4. P. 756-763. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.756-763>
122. Kukurudziak M. S., Andreeva O. P., & Lipka V. M. High-resistivity p-type silicon-based p-i-n photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm. *Technology and Design in Electronic Equipment*. 2020. No 5-6. P. 16-19. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16>
123. Кукурудзяк М. С., & Добровольський Ю. Г. Кремнієвий р-і-п-фотодіод із підвищеною імпульсною чутливістю. *Технологія та*

конструювання в електронній апаратурі.. 2021. № 1-2. С. 61-67.

<http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.61>

124. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Low-voltage Silicon p-i-n Photodiode with Increased Collection Coefficient of Minority Charge Carriers and Responsivity. *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2024, October. P. 1-4. IEEE.

<https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878036>

125. Datasheet Photoresists. *Microchemicals*, 2024.: website. URL: <https://www.microchemicals.com/PRODUCTS/Photochemicals/Photoresist/> (date of application: May 2025).

126. Moger S.N., Mahesha M.G. Investigation on ZnTe/CdxZn1-xTe heterostructure for photodetector applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2020. Vol. 315. P. 112294. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112294>

127. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., Yatskiv R., Koziarskyi I. P., & Koziarskyi D. P. Silicon p-i-n photodiode with reduced crystallographic defect density and structured surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58, No. 16. P. 165106. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/adbd4d>

128. Kukurudziak M. Technology of Silicon p-i-n Photodiodes with a Reduced Number of Thermal Operations. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*. 2023. Vol. 1, No. 1. P. 01002-01002. <https://doi.org/10.31861/sisiot2023.1.01002>

129. Gogorishvili I., Tutunjyan A., Sakharova T., Melikyan M., Khuchua N., Kuparashvili D. Electrical characteristics of p-i-n mesa-photodiodes based on InGaAs/InP heterostructures. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2024. Vol. 91, No. 2. P. 378-383. <https://doi.org/10.1007/s10812-024-01730-y>

130. Wanitzek M., Hack M., Ramachandra H., Seidel L., Schwarz D., Schulze J., Oehme M. Reduction of dark current in Ge-on-Si avalanche photodiodes using a double mesa structure. In: *Metamaterials, Metadevices, and Metasystems*

2024. SPIE. 2024, October. Vol. 13109. P. 24-29.
<https://doi.org/10.1117/12.3028061>

131. Кукурудзяк М.С., Шимановський О.Б., Ліпка В.М. Спосіб виготовлення кристала кремнієвого *p-i-n* фотодіода з мезаструктурою: Пат. 151696 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № u 202107811; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35.
<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282779>

132. Кукурудзяк М. С. Технологічні причини пробою *p-n*-переходу кремнієвих *p-i-n* фотодіодів. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2022. Т. 27, № 3. С. 268299-1.
<https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.268299>

133. Passport data of photoresists FP-383 and FP-25. *Frast-M.*: website. URL: https://frast.ru/frast_new/pr_pozitiv_f.html

134. Passport data of photoresist AZ1518. *Microchemicals.*: website. URL: www.microchemicals.com/products/photoresists/az_1518.html (date of application: May 2025).

135. Passport data of photoresist AZ4533. *Microchemicals.*: website. URL: www.microchemicals.com/products/photoresists/az_4533.html (date of application: May 2025).

136. Kukurudziak M. S., Lipka, V. M., & Ryukhtin, V. V. Silicon *p-i-n* Mesa-Photodiode Technology. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 3 P. 385-389. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-3-47>

137. Кукурудзяк М. С. Утворення макропористого кремнію металостимульованим травленням за допомогою Cr. *9-та Українська наукова конференція з фізики напівпровідників: матеріали конференції*. – Ужгород: ТОВ "Рік-У", 2023. С. 324-325. URL: <https://drive.google.com/file/d/1M968vAoavH5bL16QUgsM5M9K7VmHaop3/view>

138. Кукурудзяк М. С. та Кукурудзяк А. М. Утворення дефектів на

поверхні Si-підкладок в процесі термічного напилення золота. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2023. № 3–4. С. 47–51. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.47>

139. Кукурудзяк М. С., Кукурудзяк А. М. Дефектоутворення на поверхні кремнієвих підкладок при термічному напиленні золота. *Сучасні інформаційні та електронні технології: труди XXIV міжнародної науково-практичної конференції «СИЕТ-2023»*, 29-31 травня, 2023 р. Одеса, 2023. С. 101-102. URL: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2023/01.pdf>

140. Кукурудзяк М. С. Дослідження морфології макропористого Si, одержаного металом стимульованим щавленням за допомогою Au. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2023. Т. 21, №. 3. С. 605-616. <https://doi.org/10.15407/nnn.21.03.605>

141. Heintz A., Ilahi B., Pofelski A., Botton G., Patriarche G., Barzaghi A., Boucherif A. Defect free strain relaxation of microcrystals on mesoporous patterned silicon. *Nature Communications*. 2022. Vol. 13, No. 1. P. 6624. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34288-4>

142. Sio H.C., Kang D., Liu R., Stuckelberger J., Samundsett C., Macdonald D. Fluorine passivation of defects and interfaces in crystalline silicon. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13, No. 27. P. 32503-32509. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c07221>

143. Кукурудзяк М. С. Кремнієвий р-і-п фотодіод із зниженою кількістю поверхневих структурних дефектів. *Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання – 2023» з міжнародною участю*, Київ, 4-5 квітня 2023 року. Україна. С. 51-52. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12751/1/22.pdf>

144. Nance J., Subhash G., Sankar B., Haftka R., Kim N.H., Deck C., Oswald S. Measurement of residual stress in silicon carbide fibers of tubular composites using Raman spectroscopy. *Acta Materialia*. 2021. Vol. 217. P. 117164.

<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117164>

145. Zhang M., Fei Q., Chen S., Yanwei D., Chen P., Tong A. Protrusion of through-silicon-via (TSV) copper with double annealing processes. *Journal of Electronic Materials*. 2022. Vol. 51, No. 5. P. 2433-2449. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09503-z>

146. Kukurudziak M. S. The influence of the structure of guard rings on the dark currents of silicon p-i-n photodiodes. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 603-609. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.4.603-609>

147. Li, K., Yang, X., Tian, Y., Chen, Y., Lin, C., Zhang, Z., ... & Shan, C. (2020). Ga₂O₃ solar-blind position-sensitive detectors. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63(11), 117312. <https://doi.org/10.1007/s11433-020-1581-4>

148. Kukurudziak M. S. Isolation of responsive elements of coordinate p-i-n photodiodes by p + -layer. *Proceedings of the 51th International School & Conference on the Physics of Semiconductors «Jaszowiec 2023»*: June 17–23, 2023. Szczyrk, Poland, 2023. P. 264. URL: <https://www.jaszowiec.edu.pl/2023/>

149. Laube S.M., Gasser C., Schneider-Hornstein K., Zimmermann H. Highly-sensitive integrating optical receiver with large PIN photodiode. *IEEE Photonics Journal*. 2024. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2024.3487302>

150. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб виготовлення р-і-п фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149890 Україна: МПК (2021.01) Н01L 31/00, № у 202100503; заявл. 08.02.2021; опубл. 15.02.2021, Бюл. №50. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=279707>

151. Kukurudziak M. S. 1064 nm wavelength pin photodiode with low influence of periphery on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 01023-1 – 01023-4.

[https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01023](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01023)

152. Goll B., Schneider-Hornstein K., Zimmermann H. Ultra-low capacitance spot PIN photodiodes. *IEEE Photonics Journal*. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 1-6. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3251893>

153. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб виготовлення р-і-п фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149108 Україна: МПК (2021.01) H01L 31/00, № u 202101103; заявл. 05.03.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. №42. <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278625>

154. Mott N.F., Rigo S., Rochet F., Stoneham A.M. Oxidation of silicon. *Philosophical Magazine B*. 1989. Vol. 60, No. 2. P. 189-212.

155. Irene E.A., Massoud H.Z., Tierney E. Silicon oxidation studies: Silicon orientation effects on thermal oxidation. *Journal of the Electrochemical Society*. 1986. Vol. 133, No. 6. P. 1253. <https://doi.org/10.1149/1.2108829>

156. 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.org/10.15407/hftp14.02.182>

ДОДАТКИ

Додаток 1. Вплив кристалографічних дефектів на фотоелектричні параметри кремнієвих *p-i-n* фотодіодів

Кремній, завдяки своїм електрофізичним, механічним і технологічним властивостям, залишається основним матеріалом для виробництва елементної бази сучасної електроніки. Постійно зростаючі вимоги до надійності параметрів кремнієвих структур вимагають використання не лише нових технологій, але й подальшого експериментального та теоретичного вивчення процесів дефектоутворення. Такі дослідження потрібні, зокрема, для підвищення надійності та стабільності параметрів кремнієвих фотоприймачів.

Так, в цьому додатку описано генезис дефектів на поверхні ФД на основі n^+p-p^+ -структур під час різних технологічних операцій. Дослідження поверхні зразків проводились шляхом хімічної обробки досліджуваних зразків в селективних травниках із подальшим аналізом за допомогою оптичних мікроскопів різного збільшення та атомно-силової мікроскопії (NT-206). Для дослідження дефектної структури кремнієвих підкладок з орієнтаціями [111] та [100] використовували травник Сіртля [Д1] наступного складу: $\text{HF} - 100 \text{ см}^3$, $\text{CrO}_3 - 50 \text{ g}$, $\text{H}_2\text{O} - 120 \text{ см}^3$. Для орієнтації [100] також використовувався травник Секко [Д2] з наступним складом: 4.4% $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$: $\text{HF} = 1 : 2$. Травлення проводилось при кімнатній температурі тривалістю 3-10 хв.

Дослідження проводились при виготовленні кремнієвих квадрантних *p-i-n* ФД з ОК для роботи на довжині хвилі $\lambda=1,05 \text{ мкм}$. ФД виготовлялися на основі монокристалічного кремнію *p*-типу з питомим опором $\rho \approx 18\text{-}22 \text{ кОм}\cdot\text{см}$ та орієнтацією [111]. Зразки виготовлено за дифузійно-планарною технологією наведеною в Розділі 2.1.1. Товщина кристалів сягала 500-510 мкм.

Д1. Генезис дефектів на поверхні кремнієвих підкладок під час різних етапів виготовлення фотоприймачів

Д1.1. Вплив електрофізичних характеристик кремнію та технологічних умов на генезис кристалографічних дефектів на поверхні підкладок

Густина дислокацій у кремнієвих пластинах, утворена внаслідок однакових технологічних режимів та операцій (зокрема при однаковому R_s після дифузії фосфору), залежить від вихідного матеріалу: концентрації точкових дефектів, наявності кисневих преципітатів, питомого опору, кристалографічної орієнтації та ін. Зокрема, ростові точкові дефекти та преципітати стають центрами генерації дислокаційних петель під час термообробок [17, 37]. Крім того, при зменшенні питомого опору матеріалу підкладки, збільшується величина механічних напружень у ній, викликана внесенням домішки в процесі росту зливка, оскільки легування кремнію є однією із основних причин утворення структурних дефектів, зокрема дислокацій [37]. Причиною цього є те, що діаметр внесених атомів відрізняється від діаметра атомів підкладки. Зокрема діаметр атома кремнію складає $d_{Si}=1,32\cdot 10^{-10}$ м, тоді як в фосфору $d_P=1,28\cdot 10^{-10}$ м [Д3]. Відповідно, при внесенні чужорідного атома меншого діаметру (порівняно з атомами матриці), в підкладці виникають механічні напруження, що призводить до деформацій стиснення чи розширення, що в свою чергу сприяє утворенню дислокацій [17].

У досліджуваному випадку, використовується Si p -типу, де акцепторною домішкою є бор із атомним радіусом $d_B=0,87\cdot 10^{-10}$ м [Д3]. Враховуючи, що $d_B < d_{Si}$, то в решітці кремнію утворюються деформації стиснення ε , які можна представити формулою (Д1) [37]:

$$\varepsilon = -\beta N_A \quad (\text{Д1})$$

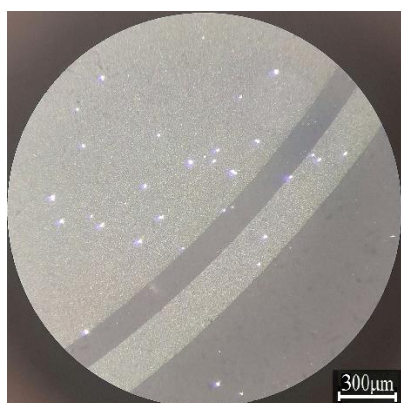
де знак «-» означає, що деформація являє собою стиснення; β – коефіцієнт стиснення, пов'язаний з розчинністю домішки в решітці, що визначається як зміна періоду решітки кремнію в розрахунку на 1% введеної домішки.

Кремнієві зливки зазвичай мають розкид питомого опору $\Delta\rho$ на різних кінцях. Часто даний розкид сягає 7-8 кОм·см, у кращому випадку $\Delta\rho=1-2$ кОм·см. Враховуючи, що деформації стиснення в Si прямопропорційні концентрації домішки (чи обернено пропорційні ρ), то з (Д1) свідчить, що навіть у межах одного зливка, умови виникнення структурних дефектів неоднакові.

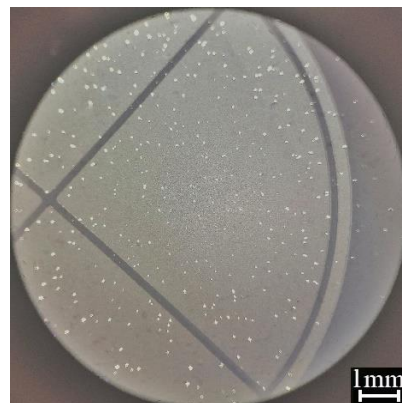
Також досліджено вплив кристалографічної орієнтації кремнію на густину структурних дефектів після технологічних процесів. Досліджувався монокристалічний кремній орієнтації [111] та [100] (Розділ 2.1). До технологічних операцій початкова поверхнева густина дислокацій в обох варіантах кремнію сягала $N_{\text{disc}} \leq 20 \text{ см}^2$. Після технологічних операцій згідно маршруту виготовлення ФД поверхнева густина дислокацій значно зросла. (Рис. Д1). На Рис. (Д1) наведено зображення кремнієвих структур після обробки в селективному травнику Сіртля та Секко.

Слід зазначити, що в обох досліджуваних випадках кремнієві підкладки легували однаковою концентрацією фосфору ($R_s=2,7-2,9 \text{ Ом}/\square$) в одному технологічному циклі та проводили однакову тривалість окиснення ($d_{\text{SiO}_2}=0,65-0,7 \text{ мкм}$). Однак, як видно з Рис. Д1а, б, поверхня Si з орієнтацією [111] мала значно меншу поверхневу густину дислокацій, ніж кремній з орієнтацією [100]. Густина дислокацій в випадку [111] в n^+ -областях сягала $N_{\text{disc}} \approx 2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^3 \text{ см}^2$, а в p -областях $N_{\text{disc}} \approx 50-90 \text{ см}^2$. У випадку n^+ -областей в матеріалі з орієнтацією [100] $N_{\text{disc}} \approx 10^9 - 10^{11} \text{ см}^2$, а в p -областях $N_{\text{disc}} \approx 1 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5 \text{ см}^2$ (Рис. Д1в, г).

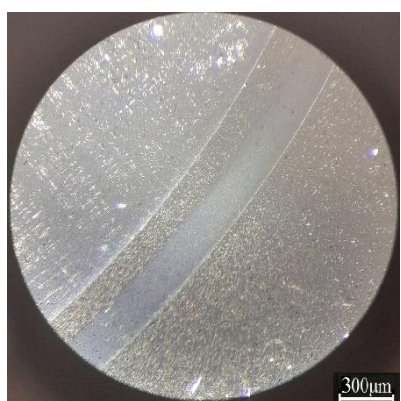
Відмінність в густині поверхневих структурних дефектів в кремнію різних кристалографічних орієнтацій спричинено відмінністю в розміщенні площин ковзання дислокацій [62] (Розділ 2.1.6.).



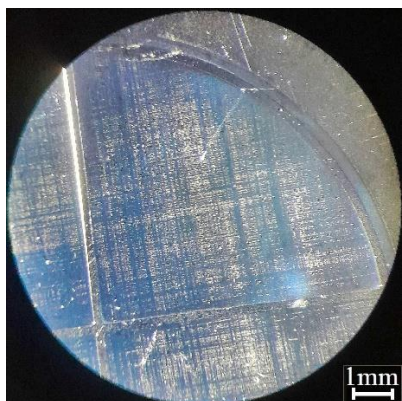
а)



б)



в)



г)

Рис. Д1. Зображення поверхні ФД в темному полі металографічного мікроскопа після селективного травлення: а, б) кремній орієнтації [111]; в, г) кремній орієнтації [100].

Д1.2. Вплив дифузії фосфору на дефектоутворення в n^+ -шарах n^+ - p - p^+ -структур

Досліджено вплив легування фосфором на густину дислокацій на поверхні кремнієвих підкладок. Дифузія фосфору проводилась за допомогою твердотільних планарних джерел згідно методики наведеної в Розділі 2.2.1 та . Поверхневий опір n^+ -шарів після дифузії фосфору наведено в Таблиці 1.1.

З Рис. Д2 можна побачити, що при збільшенні концентрації домішки (зменшенні поверхневого опору) кількість дислокацій зростає. Зокрема, для зразків з $R_S=8,1 \text{ Ом}/\square$ та $R_S=5,0 \text{ Ом}/\square$ були характерні поодинокі чи подвійні

дислокації (Рис. Д2а). Густина дислокацій в даному випадку складала $N_{\text{дис.}}^{8.1}=70 - 90 \text{ см}^{-2}$ та $N_{\text{дис.}}^{5.0}=1,2 \cdot 10^2 - 1,4 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$.

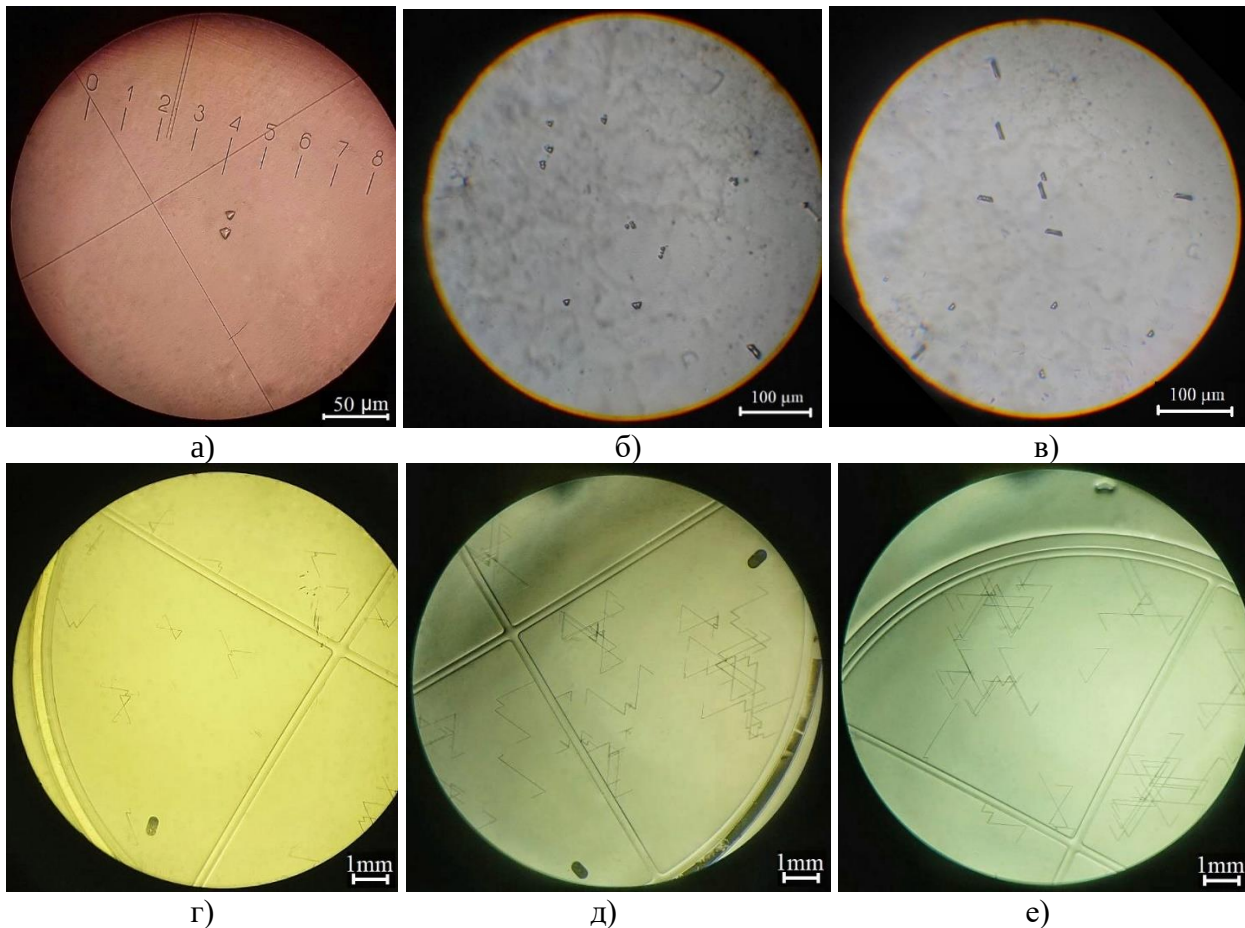


Рис. Д2. Зображення поверхні ФД після селективного травлення: а) $R_S=8,1 \text{ Ом}/\square$; б) $5,0 \text{ Ом}/\square$; в) $R_S=2,7 / 3,3 \text{ Ом}/\square$; г) $R_S=2,4 \text{ Ом}/\square$; д) $R_S=2,1 \text{ Ом}/\square$; е) $R_S=1,9 \text{ Ом}/\square$.

Відмітимо, що для вихідних пластин даний параметр складав $N_{\text{дис.}}^{Si}=5 - 15 \text{ см}^{-2}$. Для зразків з $R_S=3,3 \text{ Ом}/\square$ були характерні скупчення по 2-3 дислокації та утворення «коротких» дислокаційних ліній (Рис. Д2б). Концентрація дислокацій в даному випадку складала $N_{\text{дис.}}^{3.3}=2,5 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$. При зменшенні поверхневого опору до $R_S=2,7 \text{ Ом}/\square$ спостерігалось збільшення розмірів дислокаційних ліній (Рис. Д 2г) та утворення дефектних структур, які являли собою об'єднання дислокаційних ліній із взаємним розміщення під кутом 60° , що характерно для орієнтації $[111]$. Густина дислокацій складала

$N_{\text{дис.}}^{2,4}=0,9\cdot 10^4 - 1,4\cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. При подальшому збільшенні концентрації фосфору відбувалось зростання густини дислокацій та утворення локальних дислокаційних сіток (Рис. Д2д, е). Значення $N_{\text{дис.}}$ сягнули $N_{\text{дис.}}^{2,1}=4\cdot 10^4 - 5\cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ та $N_{\text{дис.}}^{1,9}=6\cdot 10^4 - 7\cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$.

Згідно отриманих значень поверхневої густини дислокацій отримано графік залежності $N_{\text{дис.}}=f(R_S)$ (Рис. Д3).

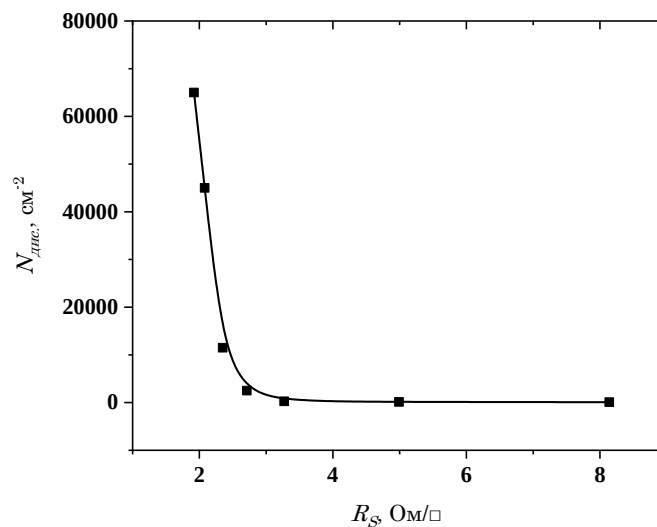


Рис. Д3. Графік залежності густини дислокацій від поверхневого опору.

Також досліджено утворення дислокацій на поверхні кремнієвих підкладок під час одностадійної дифузії за допомогою рідкого дифузанта PCl_3 . Дифузія проводилась при $T=1353 \text{ К}$ в атмосфері азоту. Після дифузії отримано підкладки з поверхневим опором n^+ -шарів $R_S \approx 2,5 \text{ Ом/кв}$ та $R_S \approx 2,7 \text{ Ом/кв}$, та досліджено їх поверхню після селективного травлення (Рис. Д4).

На поверхні легованих шарів підкладок спостерігались сітки дислокацій з високою густиною. Поверхнева густина дислокацій після дифузії за допомогою PCl_3 складає $N_{\text{дис.}}=3,3\cdot 10^8 - 3,8\cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ для $R_S \approx 2,5 \text{ Ом/кв}$ (Рис.Д4а), та $N_{\text{дис.}}=2,2\cdot 10^9 - 2,7\cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ для $R_S \approx 2,7 \text{ Ом/кв}$ (Рис. Д4б).

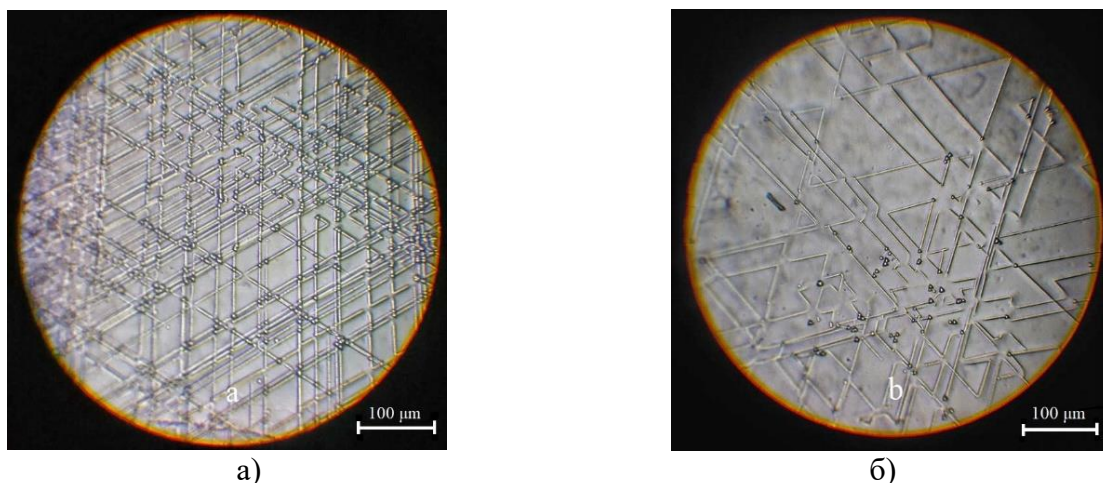


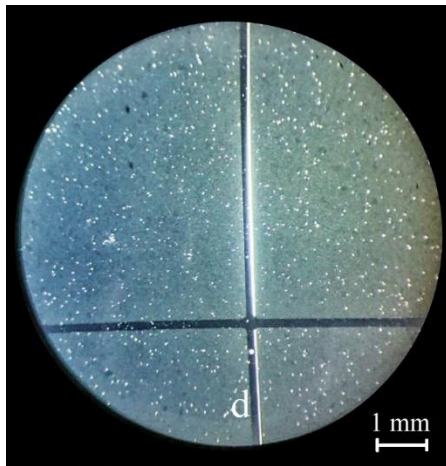
Рис. Д4. Зображення дислокаційних сіток на поверхні n^+ -шарів після дифузії фосфору за допомогою PCl_3 : а) $R_s = 2,5 \text{ Ом}/\square$; б) $R_s = 2,7 \text{ Ом}/\square$.

Збільшення густини дислокацій в випадку використання рідиннофазного дифузанта спричинене тим, що значна частина атомів фосфору в цьому випадку займає міжвузля кристалічної решітки кремнію та є електрично нейтральними. Висока концентрація міжвузлових атомів в решітці кремнію проковує значні механічні напруження, що є основною причиною генерації значної густини дислокацій. В випадку дифузії з твердотільних планарних джерел, атоми фосфору дифундують в вузли кристалічної решітки та вносять механічні напруження пов'язані лише із відмінністю розмірів атомних радіусів кремнію та фосфору [23].

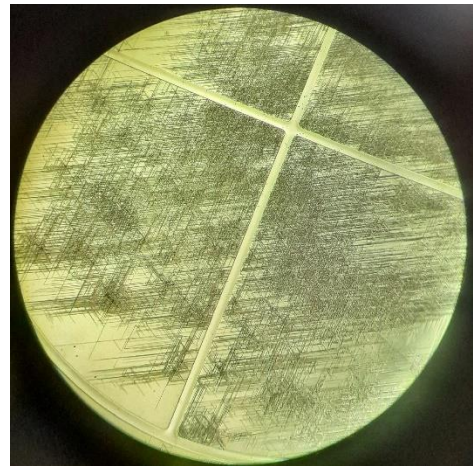
Також у випадку рідиннофазної дифузії фосфору спостерігалась нерівномірність розподілу дефектів по поверхні (Рис. Д5) при збільшенні швидкості потоку газу-носія, та нерівномірність легування по пластині.

Незважаючи на більшу густину дефектів, дифузія з хлориду фосфору має кілька суттєвих переваг перед дифузією з планарних джерел. По-перше, хімічні реакції при дифузії з PCl_3 супроводжуються утворенням галогенів, зокрема Cl_2 , які в свою чергу розкладаються на іони Cl^- . Завдяки своїй високій хімічній активності ці іони взаємодіють з позитивно зарядженими іонами металів,

присутніми на поверхні підкладок і в атмосфері реактора, що зменшує густину поверхневих станів, мінімізує наявність фіксованого заряду в оксиді кремнію чи дифузію неконтрольованих домішок. Але недоліком є те, що джерелами і продуктами реакції є токсичні речовини.



а)



б)

Рис. Д5. Зображення рівномірності розподілу дислокацій після дифузії фосфору з планарних джерел фосфору (а) та з PCl_3 (б).

Слід також зазначити, що кварцові реактори, в яких відбувається дифузія з хлориду фосфору, насичуються дифузантом набагато швидше, ніж реактори для дифузії з планарних джерел. Відповідно, виникає потреба у частому протравлюванні реакторів у плавиковій кислоті або їх заміні. Ще однією перевагою дифузії з PCl_3 є те, що вона здійснюється за одну термічну операцію, тоді як дифузія з використанням твердотільних джерел вимагає двох термічних операцій. Зі збільшенням кількості нагрівань/охолоджень Si пластин значно зростає вплив механічних напружень, спричинених термоударами, на фотоелектричні параметри ФД, а саме час життя носіїв заряду і, відповідно, чутливість, однак, негативний вплив структурних дефектів, які утворюються під час дифузії з PCl_3 , не дозволяє повною мірою використати переваги цього методу для формування p - n переходів.

Д1.3. Проблеми хіміко-динамічного полірування кремнієвих підкладок

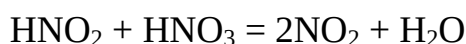
Із розвитком електроніки вимоги до якості та параметрів напівпровідникових приладів зростають. Відповідно і виникає необхідність в отриманні напівпровідникових матеріалів із високим ступенем чистоти. Особливої уваги потребує очистка та забезпечення структурної досконалості напівпровідникових підкладок. Еталоном чистоти вважається атомарно чиста поверхня, отримання якої можливе при сколюванні матеріалу [Д4] чи термічному відпалі в високому вакуумі [Д5], або при надвисокочастотній плазмохімічній обробці [Д6]. Технологічний процес обробки атомарно чистої поверхні ускладнений потребою проведення операцій дифузії, епітаксії та ін. в вакуумі. Така поверхня використовується для вивчення фундаментальних властивостей матеріалів, а в електронній промисловості достатньо хімічно чистих поверхонь, що забезпечується різного роду хімічними обробками та хімічним травленням.

Якщо проводити процес хімічного травлення таким чином, що підкладка знаходитиметься в статичному положенні, то процес розчинення напівпровідникового матеріалу проходитиме нерівномірно по всій поверхні. Нерівномірність травлення пластин пояснюється наступними чинниками: 1) в статичному положенні підкладки концентрація травильного розчину різна для різних ділянок поверхні; 2) за рахунок нерівностей (виступів і западин) поверхні підкладки в різних її частинах виділяється неоднакова кількість тепла, що приводить до локального перегріву окремих ділянок підкладки і різкого збільшення швидкості розчинення напівпровідникового матеріалу; 3) периферійні ділянки підкладки, до яких швидше поступає свіжий травник, знаходяться не в однакових термодинамічних умовах і в результаті цього піддаються інтенсивнішому травленню. Вказані чинники призводять до того,

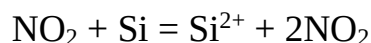
що в результаті хімічної обробки підкладки, що знаходиться в статичному положенні, різко погіршується її плоскопаралельність та проявляється потоншення в області периферії. Для усунення цих небажаних ефектів в напівпровідниковій технології застосовують хіміко-динамічне полірування напівпровідникових підкладок, яка полягає в активному перемішуванні травника безпосередньо біля поверхні підкладки і постійному обертанні підкладки в об'ємі травника. Перемішування травника безумовно сприяє якнайшвидшому вирівнюванню складу травника за всім об'ємом травильної камери і, як наслідок, приводить до рівномірності ХДП. Хіміко-динамічний процес обробки підкладок дозволяє одержувати поверхню з високою однорідністю за плоскопаралельністю та потребує менших витрат часу і реактивів[75, Д7].

Склад травників ХДП для кремнію за останні десятиліття не змінилися та являють собою суміші азотної(HNO_3), плавикової (HF) та оцтової кислот(CH_3COOH) [Д8]. Механізм полірування наступний:

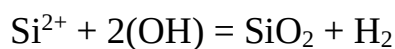
1. Утворення оксиду азоту (NO_2) шляхом взаємодії азотної кислоти с азотистою (HNO_2), яка завжди присутня в невеликих кількостях в азотній кислоті



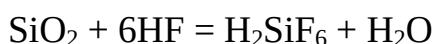
2. Окислення кремнію оксидом азоту.



3. Утворення оксиду кремнію SiO_2



4. Травлення оксиду кремнію SiO_2



Оцтова кислота являє собою сповільнювач травлення, об'ємна частка якої може коливатись в широких межах.

При підготовці підкладок кремнію для виготовлення кремнієвих *p-i-n*

фотодіодів спостерігалась поява різних типів дефектів, які впливали на оптичні та фотоелектричні параметри зразків. Механізми появи дефектів та методи їх уникнення потребували детального вивчення, оскільки в наукових та технічних джерелах інформації про описане не знайдено.

Дослідження проводились при виготовленні кремнієвих 4-квадрантних *p-i-n* ФД. Після різання кремнієвих злитків на пластини, останні підлягали шліфуванню та поліруванню. Вказані операції механічної обробки утворюють порушений поверхневий шар підкладки (Рис. Д6), який підлягає хіміко-механічному поліруванню [Д9]. Далі перед проведенням ХДП проводилась 3-х стадійна відмивка підкладок в сірчано-перекисному, аміачно-перекисному та азотно-перекисному розчинах. Якщо підкладки після ХМП були розділені на елементи методом різання диском із зовнішньою алмазною ріжучою кромкою, чи будь-яким іншим методом, то перед 3-х стадійною хімічною обробкою проводилась відмивка в ультразвуковій ванні.

ХДП проводилось з метою видалення порушеного шару, який залишився після механічної обробки, для очищення від небажаних включень та зглажування нерівностей поверхні. Склад травника являв HNO_3 : HF : CH_3COOH = 9:2:4. Пластини поміщались у фторопластову ємність, що обертається. Вісь ємності нахилена під кутом 30 - 45 ° до горизонту, що забезпечувало найкращі умови перемішування травника. Швидкість обертання становила 60 - 80 об/хв.

Відмітимо, що під час ХДП швидкість травлення лицевої і зворотної сторін не однакові (лицева травиться швидше). Відсоткове відношення швидкостей сягає приблизно 60%/40%.

Перед дифузією бору в тильну сторону кристалів, також проводилась ХДП із захистом лицевої сторони хімічно стійким лаком. Метою даної операції було видалення шару кремнію із внесеними неконтрольованими домішками з високими коефіцієнтами дифузії (наприклад лужних металів) під час

попередніх термічних операцій – окислення та дифузії фосфору.

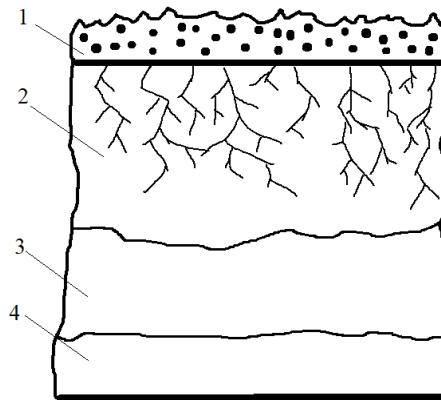


Рис. Д6. Порушений при механічній обробці поверхневий шар підкладки : 1- рельєфний шар; 2 – шар мікротріщин; 3 – шар скупчення дислокацій; 3 – монокристал

Встановлено, що оптимальною глибиною травлення лицевої сторони підкладки при ХДП є 20-25 мкм (якщо враховувати травлення і зворотної сторони – 35-40 мкм сумарно). При зменшенні глибини травлення проявляються дефекти механічної обробки (Рис. Д7). Збільшувати глибину полірування недоцільно внаслідок виснаження травника за рахунок насичення продуктами полірування.

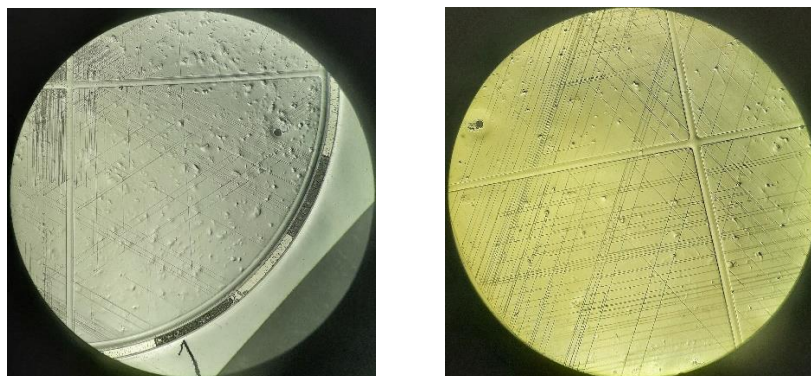


Рис. Д7. Зображення поверхні підкладки з недостатньою товщиною стравленого шару після механічної обробки (пластина оброблена в селективному травнику Сіртля).

При зміні концентрації компонентів травника для ХДП суттєво міняються його властивості – травник може стати селективним. Оскільки одним із широко відомих селективних травників є травник Деша [Д7]. Його склад схожий із розчином для полірування:



При поліруванні таким травником на поверхні підкладок проявляються ямки травлення трикутної форми, характерні для кремнію із кристалографічною орієнтацією [111] (Рис. Д8).

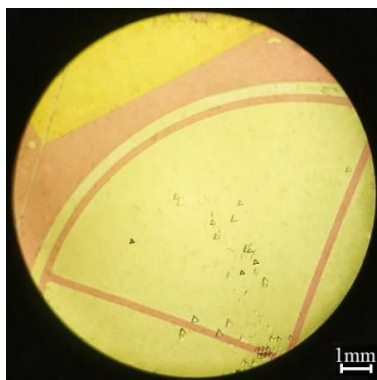


Рис. Д8. Зображення селективно підтравленої поверхні підкладок під час ХДП внаслідок відхилення від складу травника.

При певній швидкості обертання ємності із травником установлюється відповідна стала товщина збідненої реагентом області безпосередньо біля поверхні підкладки. Постійність товщини даної області підтримує сталу швидкість дифузії молекул травника з об'єму розчину до поверхні підкладки. Таким чином забезпечується рівномірність процесу полірування та швидкості травлення. При надто повільному обертанні, поблизу поверхні підкладки може утворюватись надто широкий збіднений шар травника і полірування сповільнюватиметься. А при великій швидкості обертання, збіднений шар може не встигати утворюватися біля поверхні підкладок або «зриватися» з

поверхні потоком рідини, що призводить до селективного підтравлювання пластин. Даний ефект може проявлятися в структуруванні підкладок (Рис. Д9) та зростанні шорсткості поверхні (Рис. Д10).

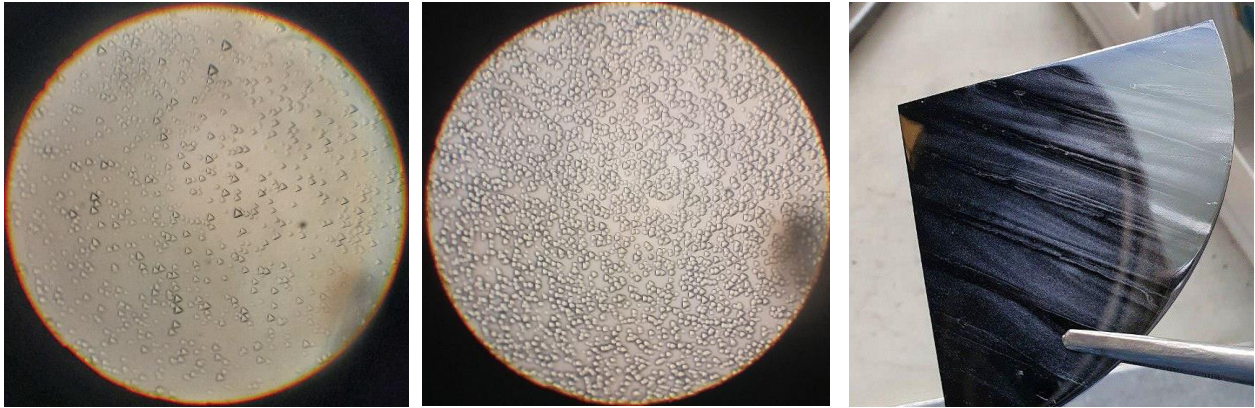


Рис. Д9. Зображення структурованої поверхні підкладок внаслідок селективного травлення під час ХДП.

При високій швидкості розчинення травника відбувається значене виділення тепла реакції, що призводить до підвищення температури процесу, локальному розігріву зразка та неконтрольованому збільшенні швидкості реакції травлення. Також при високих швидкостях ХДП виділяється значна кількість газоподібних продуктів реакції, які екранують мікроділянки поверхні та підвищують турбулентність потоку розчину, що негативно впливає на зглажування рельєфу. Відмітимо, що незначне утворення текстурування також можливе зі сторони підкладки, розміщеної до дна ємності для ХДП внаслідок неможливості якісного перемішування травника в даній області. В такому випадку можливе утворення поверхні типу «лимонної кірки» (Рис. Д10).

Було визначено шорсткість R_z текстурованої та дзеркальної поверхні після ХДП згідно [Д8] при базовій довжині $l=5 \mu\text{m}$:

$$R_z = \frac{(\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}|)}{5} \quad (Д1)$$

де $H_{i \max}$ та $H_{i \min}$ – відхилення в п'яти найбільших максимумах та мінімумах відповідно.

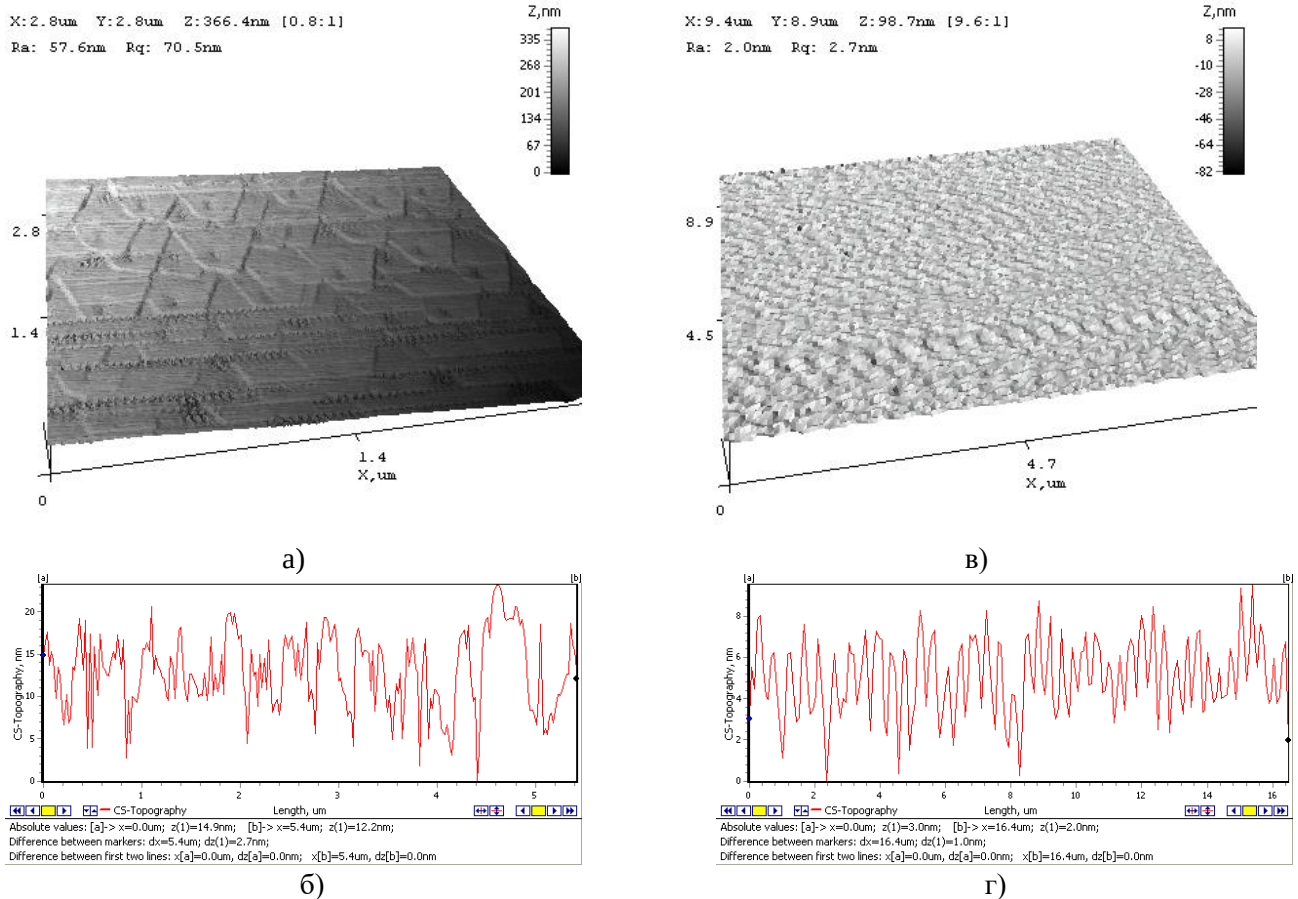


Рис. Д10. АСМ зображення поверхні підкладок після ХДП: а) 3D-зображення текстурованої поверхні; б) профіль текстурованої поверхні; в) 3D-зображення дзеркальної поверхні; г) профіль дзеркальної поверхні

Для дзеркальної поверхні $R_z=6,9$ нм, для текстурованої - $R_z=18,4$ нм.

При наявності в об'ємі зливків, а відповідно і на поверхні підкладок включень іншої фази, скупчень точкових мікродефектів різного розміру, чи набутих дефектів в процесі механічної обробки, спостерігається нерівномірність травлення та порушення плоскопаралельності. Оскільки в таких областях можлива відмінність швидкості ХДП від матричного матеріалу. В такому випадку під час полірування на поверхні можуть

утворюватись макродефекти у вигляді точкових включень, кратерів, канавок. Вказані порушення являються місцями зародження і локалізації дислокацій (Рис. Д11) та можуть сприяти зростанню або розкиду значень темнових струмів. Для уникнення описаного варто використовувати структурно-досконалі зливки, та при неякісно проведеному хіміко-механічному поліруванні провести останню операцію повторно.

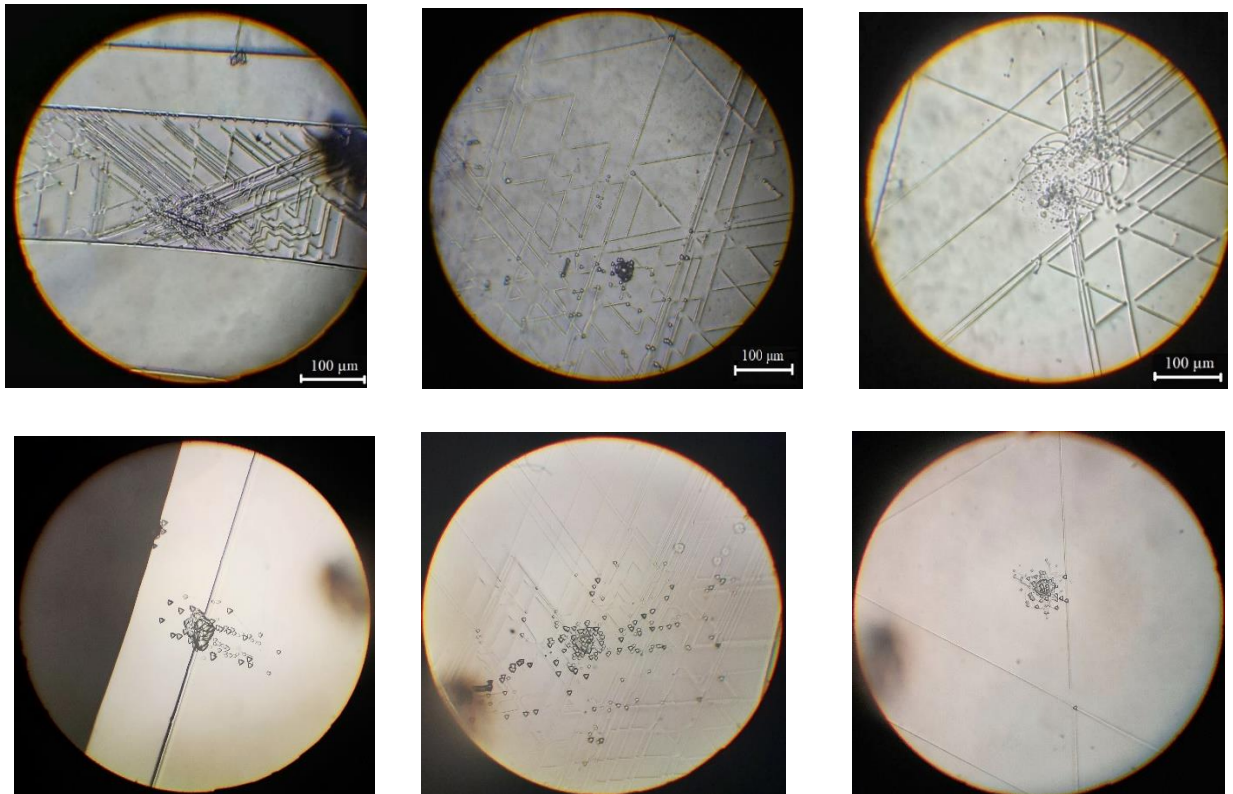


Рис. Д11. Зображення скупчень дислокацій в місцях локалізації дефектів полірування.

У випадку ХДП зворотної сторони перед дифузією бора, лицеву сторону захищають хімічно стійким лаком. При недостатній товщині лаку, можливе утворення проколів в захисному шарі. В такому випадку під час операції полірування відбувається затікання травника під шар лаку та розтравлення просвітляючого чи маскуючого оксиду. (Рис. Д12). При підтравлюванні просвітляючого покриття та відхилення його товщини від умови мінімуму відбивання [99] випромінювання спостерігається розкид фоточутливості по

ФЧЕ внаслідок зміни коефіцієнта відбивання. Також кристали з такими дефектами бракуються по зовнішньому вигляду.

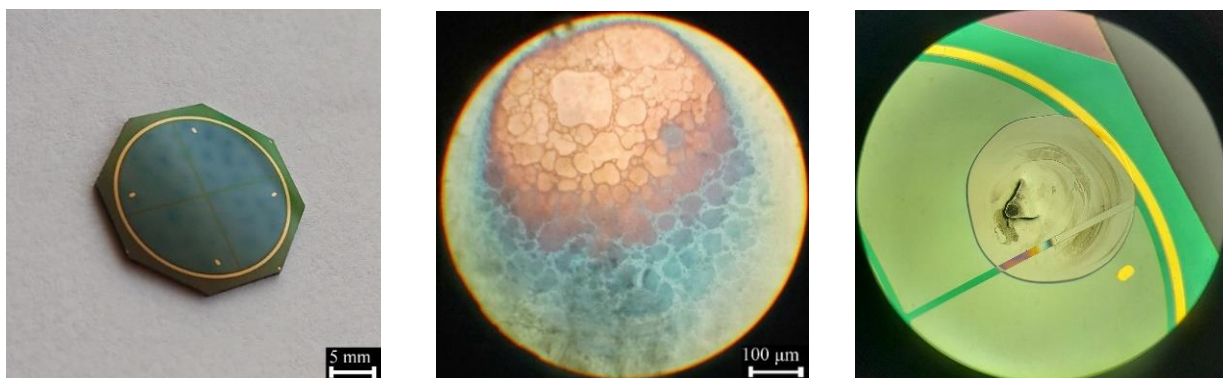


Рис. Д12. Зображення розтравлень оксиду кремнію під час ХДП внаслідок наявності проколів в захисному лаку.

Перед закінченням процесу полірування неприпустимо виймати пластини із ємності з травником, оскільки на поверхні підкладок залишаються каплі травника. В місцях наявності капель починається бурна реакція з виділенням парів азотної кислоти і сильним розігрівом. Внаслідок цієї реакції пластини сильно розтравлюються і на їх поверхні утворюються плями, заглиблення-кратери та чорний наліт оксиду кремнію (Рис. Д13). При значному масштабі реакцій пластини стають матовими із густо всіяними кратерами. При незначному масштабі описаних реакцій, візуально та в світлому полі мікроскопа дана дефектність не спостерігається, а при спостереженні в темному полі заглибини світяться, нагадуючи поодинокі дислокації. Для уникнення описаного закінчувати травлення слід, додаванням води в травник.

Для дослідження характеру та глибини утворених кратерів, отримано АСМ-зображення описаних дефектних підкладок (Рис. Д14). На Рис. Д14 зображено порушену поверхню пластин після ХДП, що містить кратери глибиною до 300 нм, точкові дефекти та включення іншої фази. Дані заглиблення також сприяють росту темнових струмів та зменшенню

чутливості ФД. При появі описаної порушеної поверхні та не придатності підкладок до подальших технологічних операцій варто проводити зняття поверхневих шарів механічними методами та знову ХДП.

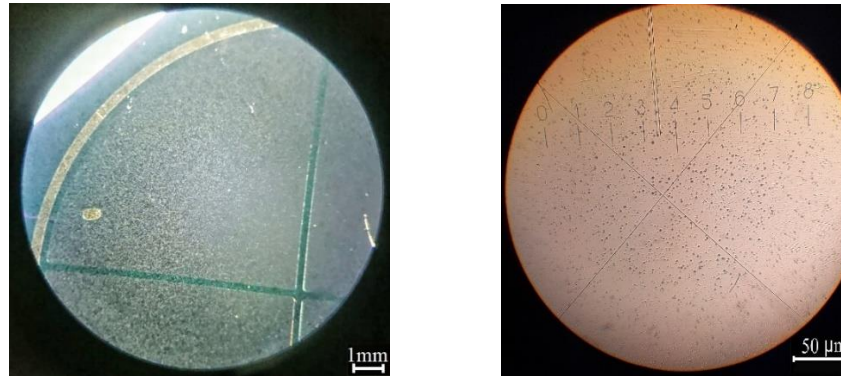


Рис. Д13. Поверхня пластин вкритої кратерами після ХДП.

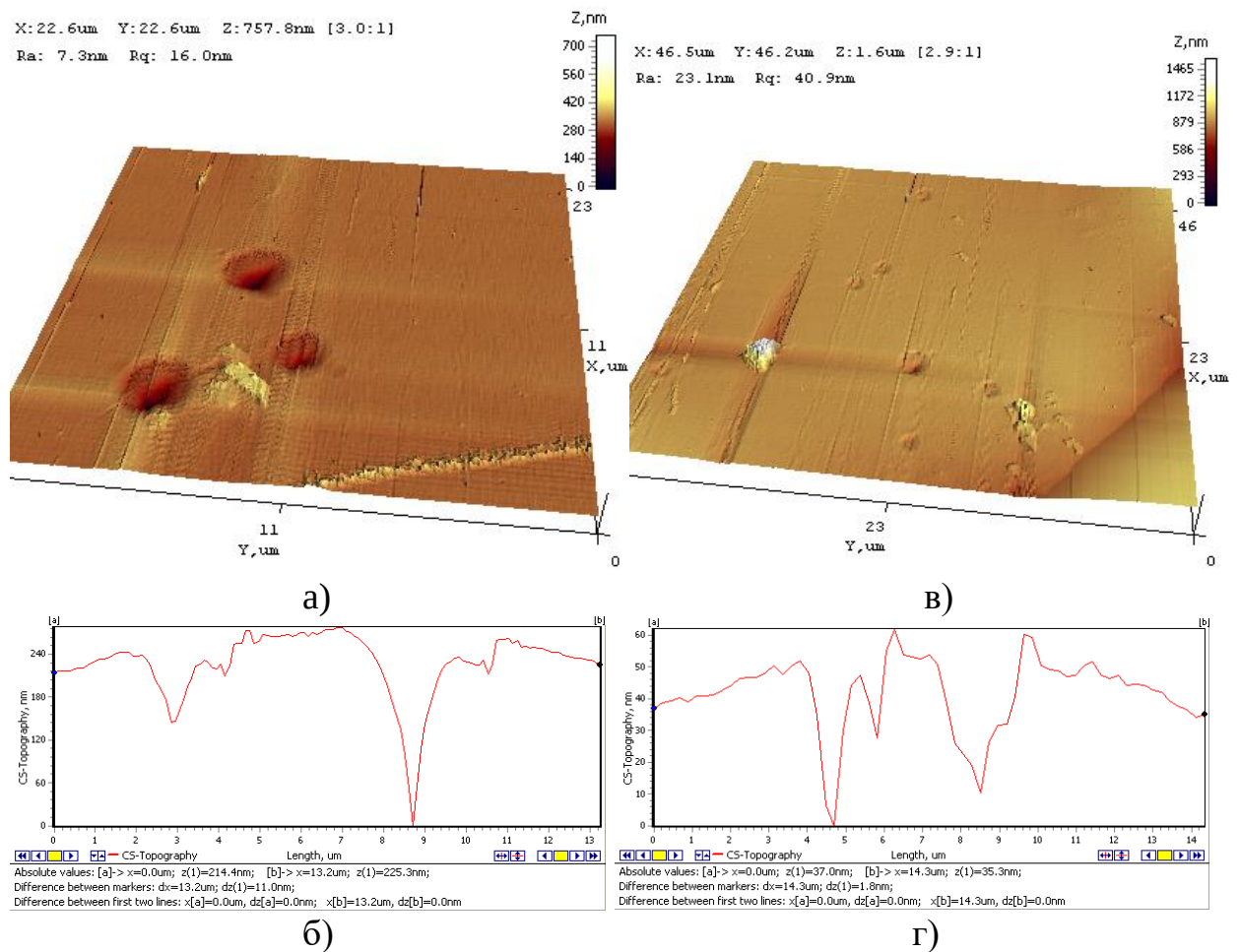


Рис. Д14. АСМ-зображення поверхні підкладок із кратерами після ХДП: а; в) - 3D-зображення поверхні; б, г) - профіль кратерів.

Д1.4. Утворення дефектів на поверхні Si-підкладок під час термічного напилення золота

Під час виготовлення нами ФП на основі кремнієвих $n^+p\text{-}p^+$ -структур помічено деяку деградацію параметрів виробів після етапу термічного напилення золота для формування контактних площадок. Зокрема, спостерігалось зростання темнових струмів ФЧЕ розкид темнових струмів по фоточутливих елементах в багатоеlementних ФД та рідше – пробій $p\text{-}n$ -переходу. Описана деградація параметрів потребувала дослідження для виявлення її причин та механізмів.

Дослідження проводились при виготовленні 4-елементних ФД. ФД виготовлялись згідно методики наведеної в Розділі 2.1.1. при використанні монокристалічного кремнію орієнтації [111]. Нанесення плівок Au з адгезійним підшаром хрому Cr проводилось термічним напиленням у вакуумі при $P=10^{-5}$ мм. рт. ст. та температурі підкладок $T=200^\circ\text{C}$ з подальшим впалюванням. Товщина золота сягала 400-600 нм. Для дослідження структурної досконалості поверхні підкладок після операцій напилення проводилось селективне травлення в розчині Сіртля. Дослідження морфології поверхні Au та Si проводилось в мікроскопах різного збільшення та за допомогою атомно-силового мікроскопа NT-206.

Імовірними причинами зростання I_m можуть бути механічні пошкодження поверхні кристалів під час операції металізації чи погана хімічна обробка. Оскільки до і після термічного напилення проводився контроль зовнішнього вигляду, причина механічних пошкоджень виключаються. Крім того, при неналежній хімічній обробці була б погана адгезія металу до кремнію, подібно до напилення золота на кремній без підшару хрому (Рис. Д15).

Для встановлення характеру зростання I_m отримано вольт-амперні характеристики бракованих зразків після металізації, які були придатні до

вакуумного напилення (Рис. Д16.).



Рис. Д15. Зображення кристалів ФД із поганою адгезією Au.

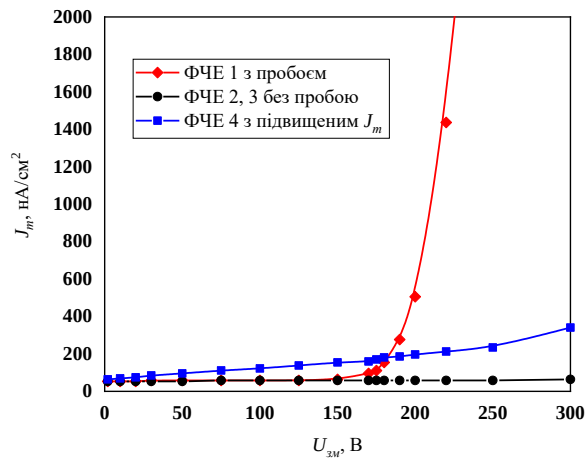


Рис. Д16. Зворотня ВАХ бракованого ФД після напилення Cr-Au.

Крива ВАХ ФЧЕ 2, 3 на Рис. Д16 характеризує придатний кристал (придатний ФЧЕ) ФД. Щодо кривої для ФЧЕ 4, то зростання I_m відносно інших чутливих елементів, в даному випадку, спостерігалось вже при $|U_{зм}| = 2 \text{ В}$. Імовірно це спричинене наявністю дислокацій, переріз захоплення яких збільшується при збільшенні напруги зміщення. Відповідно дані дефекти завдяки своїм пружним полям — атмосферам Коттрелла можуть декоруватися домішками та, пересікаючи p - n перехід, утворювати генераційно-рекомбінаційні центри в області просторового заряду [37]. Це в свою чергу зменшуватиме час життя неосновних носіїв заряду та збільшуватиме

генераційну складову темового струму [17]. Крива для ФЧЕ 3 описує випадок пошкодження кристалу дефектами, які зруйнували структуру p - n -переходу, що призвело до пробою p - n -переходу при високих U_{zm} [Д8].

Для визначення причин зростання темового струму та пробою p - n -переходу вирішено дослідити структурну досконалість та морфологію пластин після процесу металізації. При дослідженні поверхні підкладок після напилення Au виявлено локальні потовщення плівки золота, спричинені кипінням металу у випаровувачі та потраплянням «крапель» Au на підкладки (Рис. Д17а, б). В місцях локалізації даних «капель» утворювався товстіший, часто гострокінечний, шар золота, який потребував тривалішого травлення під час фотолітографії. Це призводило до розтравлення, і, як наслідок, зміни заданої форми та розміру контактних площадок. Також описані утворення можуть пошкоджувати фотошаблони, утворюючи подряпини. При механічному зніманні описаних утворень спостерігалось порушення структури кремнію, що свідчило про вплавлювання Au в підкладку (Рис. Д17в).

Для дослідження дуфектоутворень на поверхні пластин, спричинених зазначеним явищем, браковані зразки оброблялись в селективному травнику. Попередньо стравлювалися Au, Cr та SiO₂. Оглядаючи поверхні бракованих кристалів в мікроскопах з різним збільшенням, було виявлено комплекси структурних дефектів у формі кратерів, що являли собою скупчення хаотично розміщених дислокацій та точкових дефектів (Рис. Д18). Також отримано зображення описаних дефектів за допомогою АСМ (Рис. Д19). При дослідженні причин появи даних дефектів встановлено, що вони утворюються внаслідок локального плавлення кремнію при потраплянні на нього «крапель» Au із $T > T_{пл.Si}$, внаслідок кипіння у випаровувачі.

Встановлено, що напилення із дроту супроводжується інтенсивнішим “засміченням” підкладок «краплями» золота, ніж при використанні корольків. Для оцінки морфології поверхні Au після обох варіантів напилення зразки

досліджувались за допомогою атомно силового мікроскопа. (Рис. Д20).

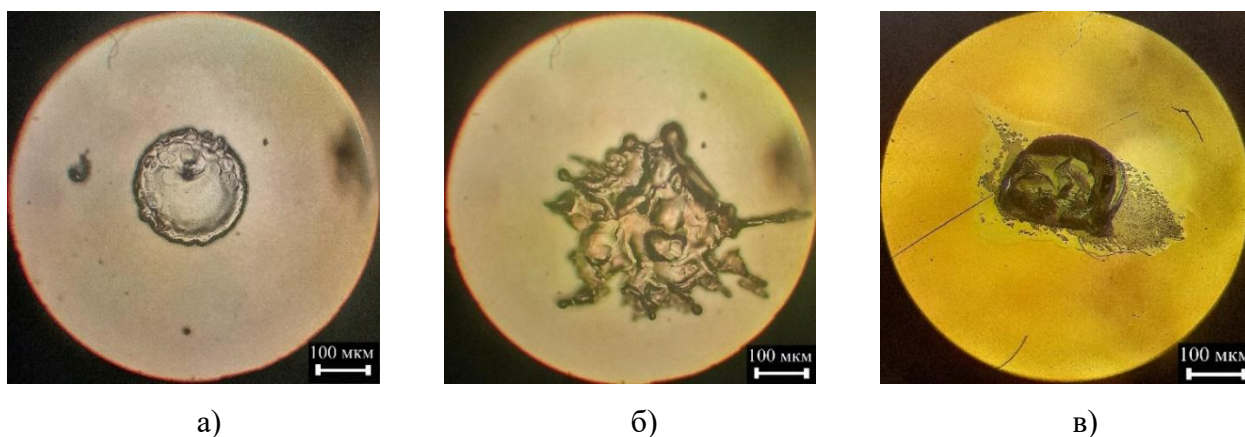


Рис. Д17. Зображення «крапель» Au (а, б) та порушення структури кремнію після їх механічного знімання (в).

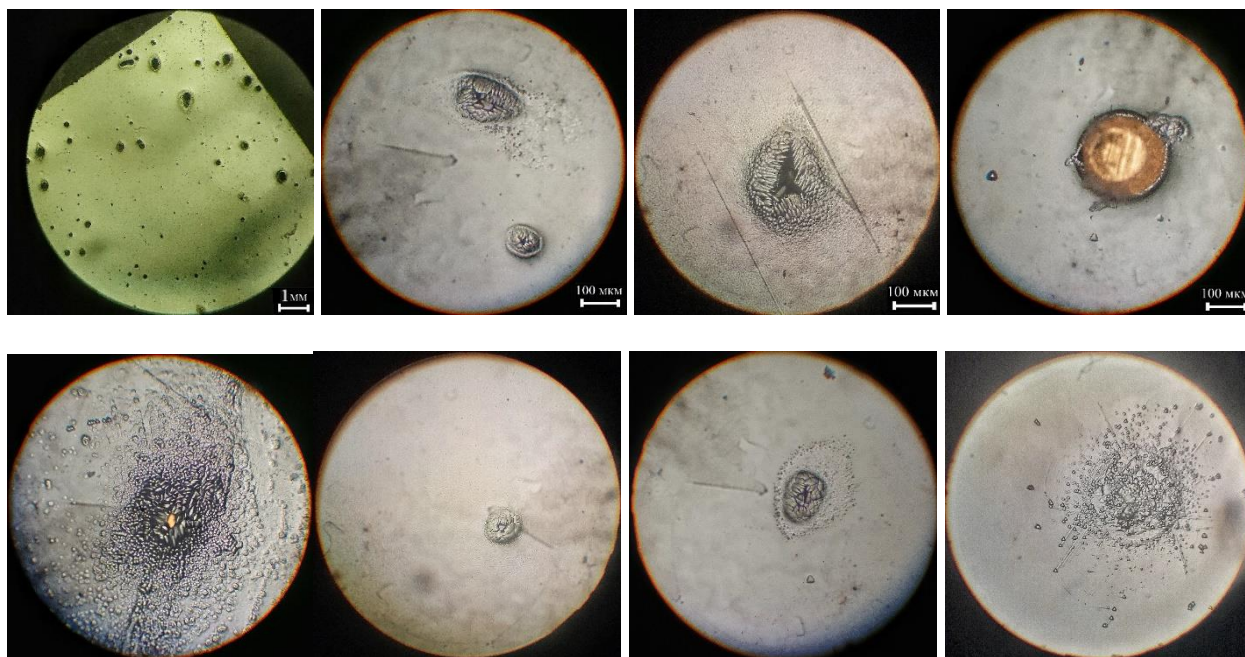


Рис. Д18. Зображення порушеної поверхні підкладок після селективного травлення.

Як видно з Рис. Д20 шорсткість морфології в випадку напилення з дроту (Рис Д20а, б) значно вища, ніж в випадку напилення з корольків (Рис. Д20в). Зауважимо, що після утворення металізації на лицевій стороні підкладок проводиться фотолітографія для утворення контактних площадок, а враховуючи можливість розтравлення внаслідок наявності потовщень золота – на лицеву сторону краще проводити напилення із корольків. Напилення з

дроту варто використовувати для зворотної сторони підкладок, де дефектоутворення менш критичне.

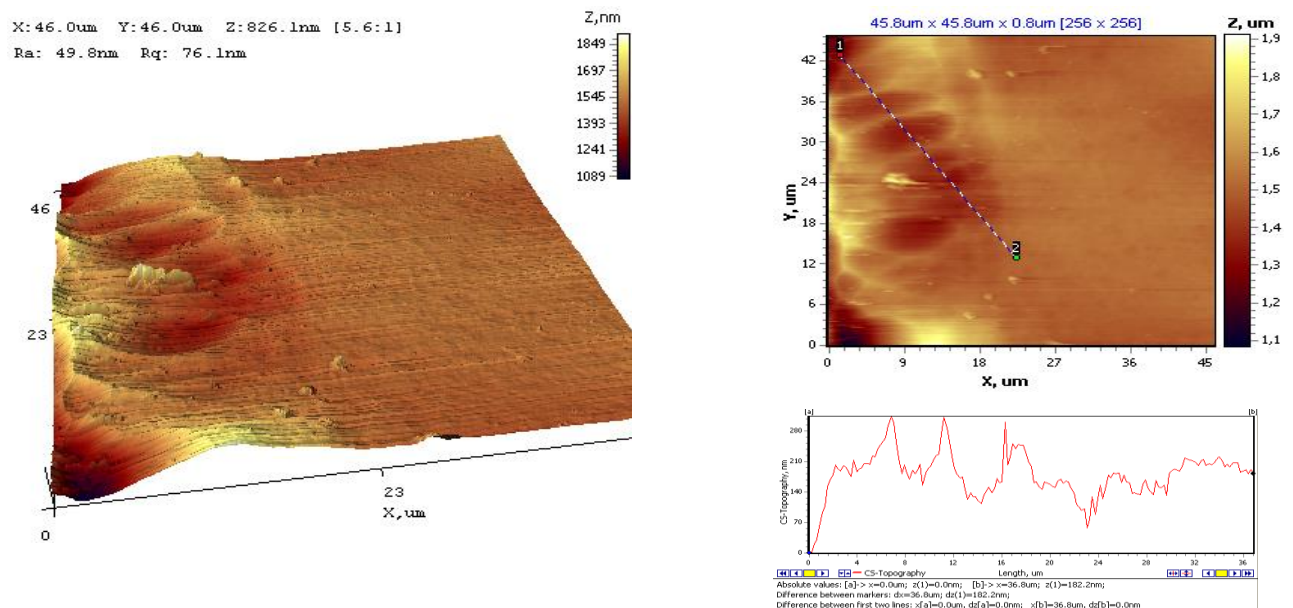


Рис. Д19. АСМ-зображення дефектів, утворених під час термічного наплення золота.

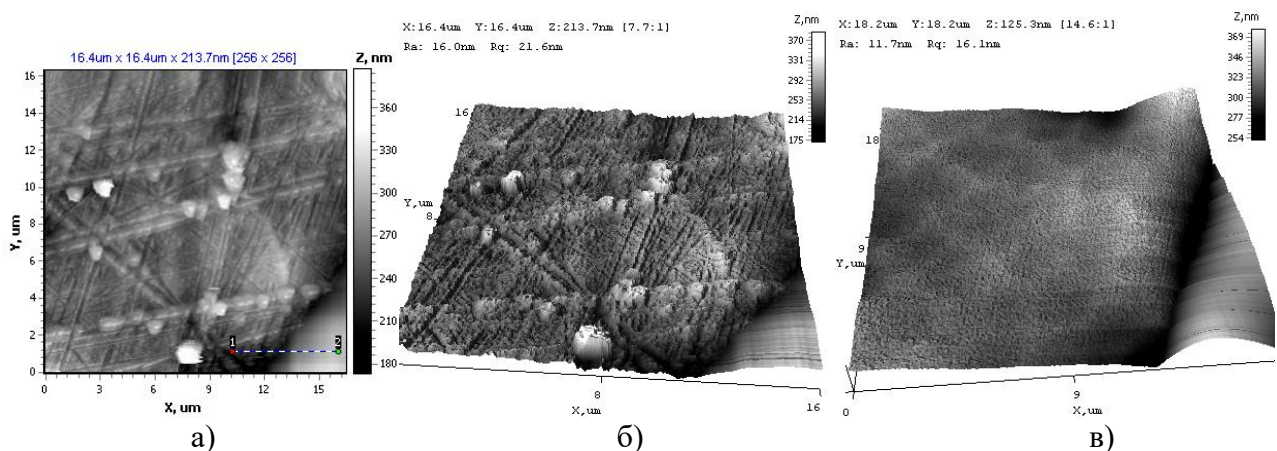


Рис. Д20. АСМ-зображення кремнієвої підкладки із напленням Au: а) 2D-зображення (наплення з дроту); б) 3D-зображення (наплення з дроту); в) 3D-зображення (наплення з корольків).

Уникнути чи мінімізувати утворення описаних дефектів можна використовуючи наплення із закритих випаровувачів чи збільшенням часу наплення на заслінку при плавленні золота. Однак ці методи збільшують розхід дорогоцінного металу. Також можна використовувати інші види наплення, які

забезпечують належну якість та адгезію отриманих плівок, зокрема, іонно-плазмові чи катодне напилення.

Д1.5. Проблематика маскувального та просвітляючого SiO₂ при виготовленні фотоприймачів на основі n^+p-p^+ -структур

Окислення відіграє важливу роль у планарній технології, яка, в свою чергу, є основою технології кремнієвих інтегральних схем, фотоприймачів та іншої твердотільної електроніки [Д9]. На початкових етапах розвитку планарної технології окислення використовували лише для виготовлення маскувальних покриттів, які запобігали проникненню домішок в окремі ділянки кристалів під час дифузії, а також для створення захисного пасивуючого шару після виготовлення приладу. Останнім часом SiO₂ почали використовувати як активні та пасивні елементи в кремнієвих функціональних блоках [Д10], а також як противідбиваючі покриття у фотоприймальних пристроях [Д11], що призвело до нового інтенсивного вивчення процесу окиснення та властивостей оксидного шару. Зокрема, активно вивчаються і моделюються умови росту нанометрових плівок оксиду кремнію, що є актуальним для мініатюризації та підвищення швидкодії електронних елементів [Д12, Д13].

При виробництві кремнієвих $p-i-n$ фотодіодів спостерігався ряд систематичних типів дефектів і погіршення параметрів виробів, викликаних деградацією маскувальних або противідбиваючих покриттів в процесі виготовлення. Спостерігалось зниження опору ізоляції чутливих елементів в багатоелементних ФД, що сприяло збільшенню темнових струмів (Розділ 4). Також було виявлено зниження чутливості виробів через деградацію товщини або структури оксидної плівки під час технологічних операцій тощо. Описане потребувало детального дослідження для встановлення причин та методів їх уникнення.

Маскуючий SiO₂ утворювали під час першої термічної операції при

температурі $T=1453$ К за принципом сухого-мокрого-сухого окиснення [68]. Враховуючи, що товщина оксиду кремнію, який повністю маскує від довготривалої дифузії фосфору при $T=1323$ К, сягає 0,3-0,4 мкм [Д14], товщина маскуючого SiO_2 сягала $d_{\text{SiO}_2} \approx 0,6-0,7$ мкм. Ця товщина обиралась також з урахуванням перерозподілу фосфору в оксиді під час наступних термічних операцій.

Противідбиваючий оксид кремнію утворювався під час операції рзгонки фосфору в атмосфері сухого кисню при температурі $T=1453$ К. Товщина SiO_2 становила 0,17-0,2 мкм, що відповідає умові мінімального відбиття [Д15].

При серійному виготовленні кремнієвих $p-i-n$ ФД помічено зменшення d_{SiO_2} в процесі технологічних операцій після його утворення, даний фактор призводив до зменшення фоточутливості. При дослідженні описаного, побачено, що причиною є хімічна обробка (ХО) [120]. Відповідно вирішено вивчити вплив ХО на товщину оксидної плівки.

Для очистки підкладок використовувались ХО в кип'ячих розчинах кислот з вказаних в Таблиці Д1, тривалість обробки сягала 10 хв. Для дослідження зміни d_{SiO_2} в процесі ХО до і після операцій вимірювалась товщина даного покриття.

Таблиця Д1.

Склад розчинів для ХО кремнієвих підкладок та зміна d_{SiO_2} під час операції

Розчин	Δd_{SiO_2} , нм
$\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$	6-7
$\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$	8-9
$\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$	16-17

Враховуючи те, що після утворення просвітляючого покриття згідно технологічного маршруту проводиться ще три 3-х стадійні відмивки, які зменшують d_{SiO_2} на 0,9-0,1 мкм потрібно збільшувати тривалість розгонки фосфору.

Для можливості оцінки спаду чутливості (ΔS_{imn}) ФД внаслідок зменшення d_{SiO_2} отримано графік залежності спаду S_{imn} від товщини SiO_2 (Рис. Д21). Вимірювалась початкова фоточутливість кристалу ФД при $d_{SiO_2} \approx 0,19$ мкм та пошарово стравлювався оксид в повільному травнику HF: $H_2O=1:10$. Після кожного процесу травлення також проводились вимірювання S_{imn} .

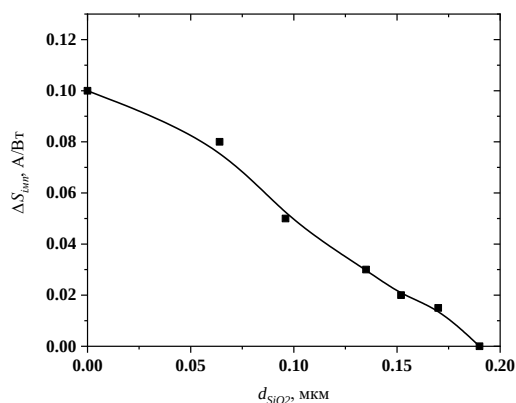
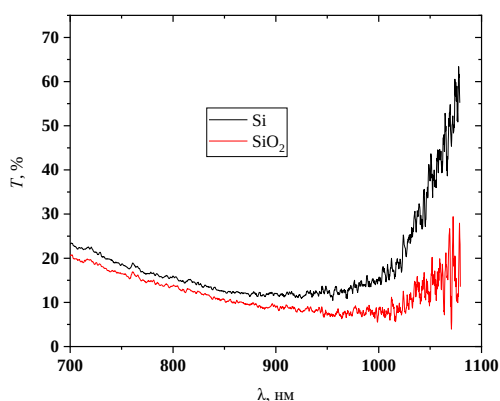


Рис. Д21. Експериментальний графік залежності спаду чутливості від товщини просвітляючого покриття.



просвітляючого покриття та з просвітляючим покриттям товщиною $d_{SiO_2} \approx 0,19$ мкм

Рис. Д22. Спектри відбивання ФД без

Також отримано спектри відбивання ФД при $d_{SiO_2} \approx 0,19$ мкм та ФД без просвітляючого SiO_2 (Рис Д22). З Рис. Д5.2 можна побачити, що при $\lambda = 1,05$ мкм коефіцієнт відбивання ФД без SiO_2 складає $R \approx 30-40\%$, а при $d_{SiO_2} \approx 0,19$ $R \approx 5-15\%$.

Зміна товщини маскувальних і просвітлювальних покриттів також можлива під час фотолітографії, зняття фосфоросилікатного або боросилікатного скла, хіміко-динамічного полірування.

Зокрема, при травленні оксиду під час фотолітографії або при видаленні скла у фтористоводневій кислоті не можна надовго вилучати касету з пластинами з розчину, оскільки це призводить до нерівномірного травлення поверхні (Рис. Д23) через розтікання травника по поверхні підкладки. Відповідно, нерівномірність товщини плівки може призвести до розкиду

чутливості та нерівномірного травлення оксиду під час подальших фотолітографій.

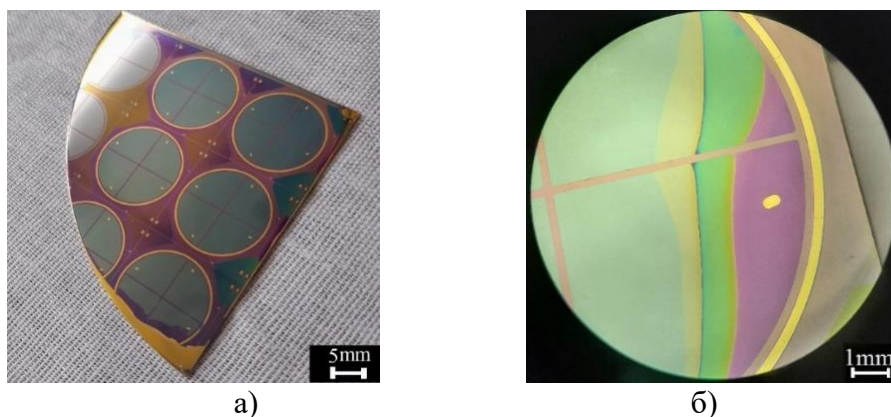


Рис. Д23. Зображення нерівномірної товщини маскувального (а) та просвітляючого (б) SiO_2 .

Найважливішою умовою отримання якісного оксиду кремнію є чистота пластини перед окисленням. Наявність домішок на поверхні кремнію перед окисленням або в процесі росту оксиду негативно впливає на однорідність плівки та електричні властивості інтерфейсу.

На нерівній, забрудненій поверхні вирощений або нанесений оксид може містити включення кристобаліту (Рис. Д24), які є небажаними у всіх класичних випадках використання оксидних плівок кремнієвої технології. Кристобаліт має більшу щільність, ніж кварцове скло, і межі між аморфними областями та більш щільними кристалічними областями являють собою порожнечу, які можуть заповнюватися як домішками з поверхні, так і дифузантом в процесі дифузії [Д16]. Необхідною умовою отримання високоякісного SiO_2 є полірування поверхні підкладок з подальшою хімічною обробкою. Можливе також ультразвукове очищення.

Під час окислення в кремнії часто утворюються дефекти пакування [37, Д17]. Утворення цих дефектів на поверхні пластин відбувається з кількох причин. Перша - механічне пошкодження поверхні підкладки під час різання або шліфування. Якщо такі пошкодження, наприклад, подряпини або сліди від різання, не видалити подальшим хімічним поліруванням, то вони можуть

стати локальними ділянками зародження дефектів упаковки (Рис. 25а-б).

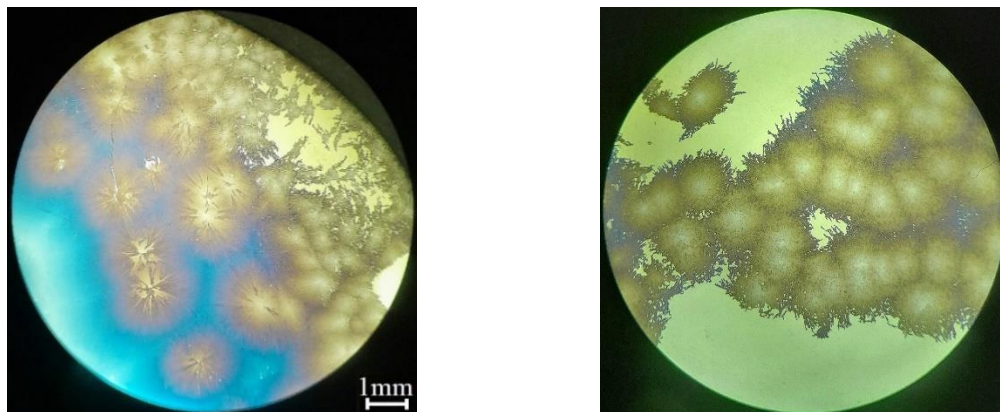


Рис. Д24. Зображення оксиду кремнію з включеннями кристобаліту.

Друга причина утворення дефектів пакування (за відсутності механічних пошкоджень на поверхні) пов'язана з наявністю в пластинах ростових і так званих свірл-дефектів [37, Д18], оскільки комплекси точкових дефектів з вихровим розподілом є затравкою для дефектів пакування при окисленні (Рис. Д25в-д).

Іншим механізмом утворення структурних дефектів під час окиснення можуть бути механічні напруження, що виникають внаслідок різниці в коефіцієнтах термічного розширення Si і SiO_2 [Д19]. Але при вирощуванні оксиду кремнію 600-700 нм на поверхні матеріалу орієнтації [Д17] утворення дислокацій в областях відсутності механічних порушень не спостерігалось, а густина дислокацій після окиснення наближалась до власної густини вихідного кремнію. Інша ситуація спостерігалась при окисленні кремнію орієнтації [100], де різниця в коефіцієнтах термічного розширення відіграє суттєву роль внаслідок зниження поверхневої густини атомів кремнію [18, 37, 62].

Зауважимо, що дефекти, які утворюються при окисленні, мають міжвузловий характер і пов'язані з накопиченням і конденсацією надлишкових атомів кремнію, що утворюються в результаті дифузії кисню в кремнії. Саме

міжвузлові атоми кремнію формують скупчення точкових дефектів в місцях механічних порушень поверхні.

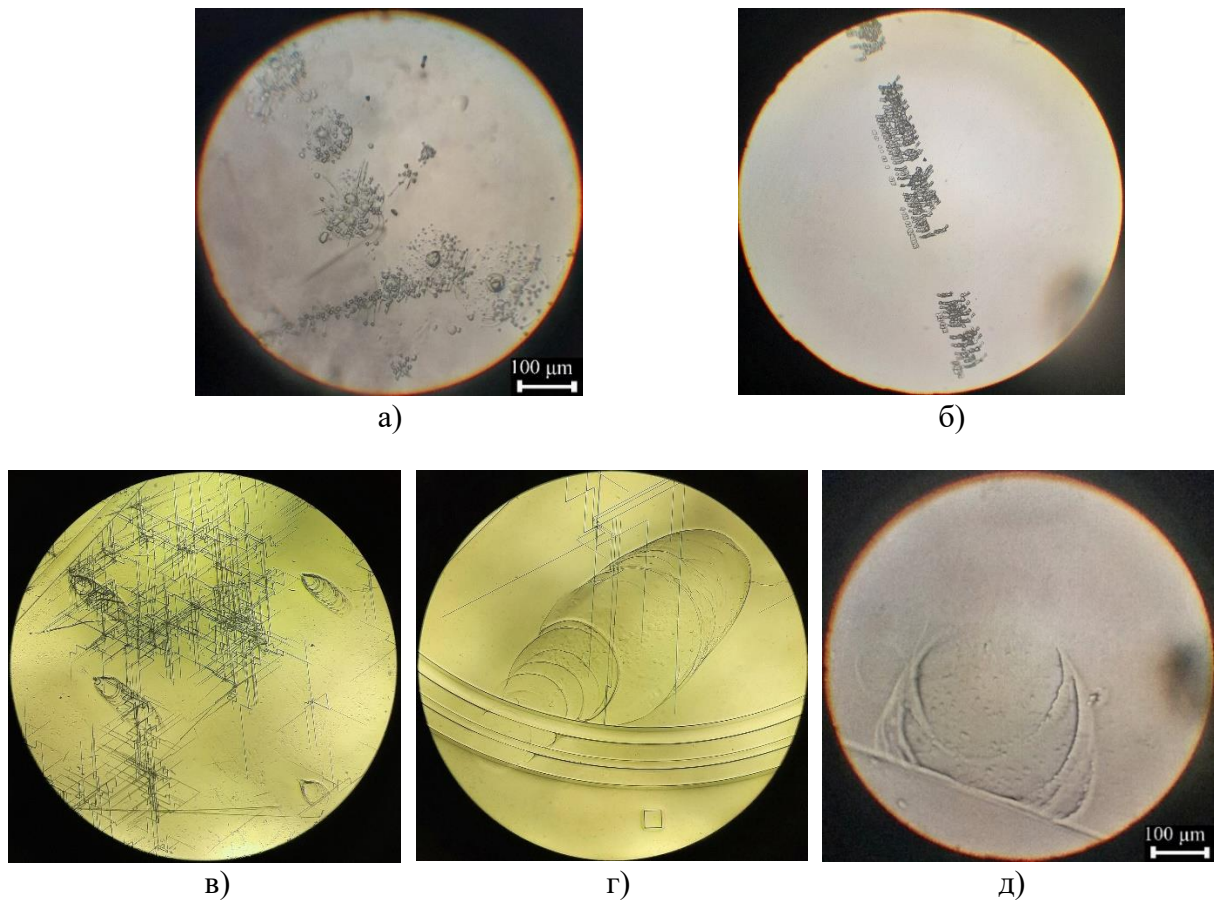


Рис. Д25. Зображення структурних дефектів в областях механічних порушень (а, б) та свірл-дефектів (в-г) на поверхні пластин (пластини після селективного травлення).

Д1.6. Дефектоутворення на поверхні кремнієвих підкладок під час розділення їх на елементи

У ході експериментальних досліджень кремнієві підкладки розділялися методами скрайбування та різання диском з алмазованою зовнішньою кромкою. Операція скрайбування провокувала утворення значної кількості механічних порушень, сколів, дефектів вздовж лінії різання (Рис. Д26), внаслідок чого перевага надавалась операції різання диском з алмазованою зовнішньою кромкою.

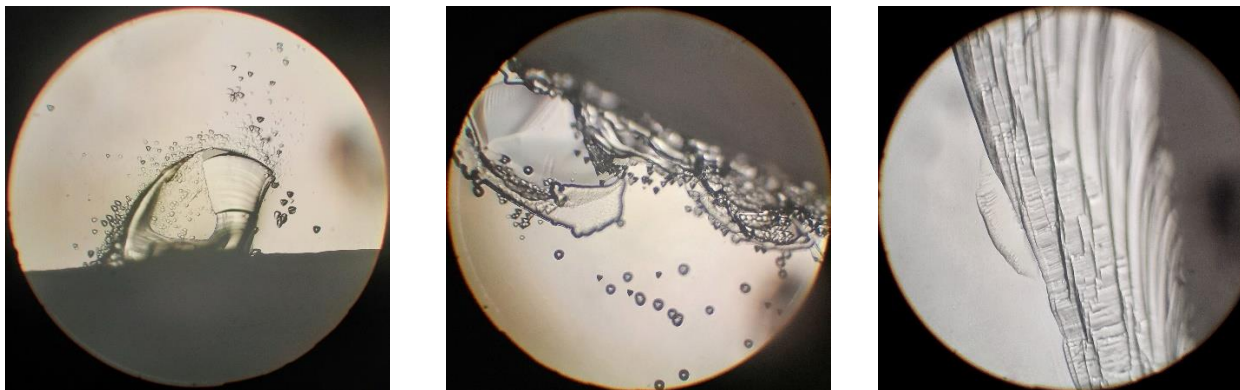


Рис. Д26. Зображення сколів вздовж лінії різання кремнієвих пластин методом скрайбування.

Помічено, що при розташуванні ФД поблизу лінії різання, що була виконана на кремнієвій пластині до термічних операцій, ФЧЕ володіли підвищеними темновими струмами порівняно з такими, що розміщені у центрі пластин. При дослідженні таких зразків у селективному травнику Сіртля, помічено присутність сіток дислокацій вздовж ліній різання з високою концентрацією структурних дефектів (Рис. Д27), які сприяли підвищенню темнового струму.



Рис. Д27. Зображення дислокацій вздовж лінії різання кремнієвих пластин диском з алмазованою зовнішньою кромкою.

Утворення дислокацій було спровоковане механічними напруженням,

які відбуваються під час операції різання при використанні високих швидкостей проходження диску, чи при деградації ріжучого полотна останнього. Після селективного травлення зразків, які були розділені після термічних операцій, скупчень дислокацій не було виявлено. Можна стверджувати, що утворення структурних дефектів у першому випадку спричинене наявністю механічних напружень вздовж ліній різання. Ці області ставали місцями локалізації дислокацій, утвореними в результаті релаксації напружень під час впливу значної температури.

Для виключення можливості дефектоутворення варто використовувати мінімальні швидкості проходження диску та проводити періодичне його точіння.

Д2. Вплив дислокацій на фотоелектричні параметри кремнієвих фотодіодів

Д2.1. Вплив дислокацій на темнові струми кремнієвих фотодіодів

Під час серійного виробництва фотодіодів було виявлено, що на певних ділянках використовуваних пластин (найчастіше на периферії) з'являються дислокаційні лінії та сітки, які можна побачити неозброєним оком і без селективного травлення (Рис. Д28.). Ці утворення не спостерігаються на поверхні підкладок до термообробки, але стають помітними після термообробки. Утворені дислокаційні комплекси характеризуються нерівномірним розподілом і локалізацією (підвищеною щільністю в певних ділянках підкладки). Причин утворення зазначених структурних дефектів може бути декілька. Перша - це релаксація механічних напружень у кремнії під час термообробки. Ці напруження могли утворитися під час росту злитка або механічної обробки. Друга - накопичення точкових структурних дефектів і мікродефектів, які є зонами генерації дислокаційних петель під час термічних

операцій [18, 23, 37, 42, Д20]. В даному випадку використовувався монокристалічний кремній вирощений методом витягування з розплаву, відповідно під час росту зливків периферія останніх може набувати значних механічних напружень. Відповідно, основною причиною генерації дислокаційних сіток по периферії платин під час термообробок є саме релаксація вказаних напружень із утворенням структурних дефектів.

Кристали з описаними поверхневими утвореннями мали погіршені параметри. Для дослідження було відібрано декілька таких кристалів з різних серій (ФД₁₋₆). Поверхня кристалів досліджувалась металографічним методом після селективного травлення. Отримано вольт-амперні характеристики кожного ФЧЕ досліджуваних ФД (Рис. Д29). Для порівняння наведено вольт-амперні характеристики одного серійного небракованого зразка (ФД₆).

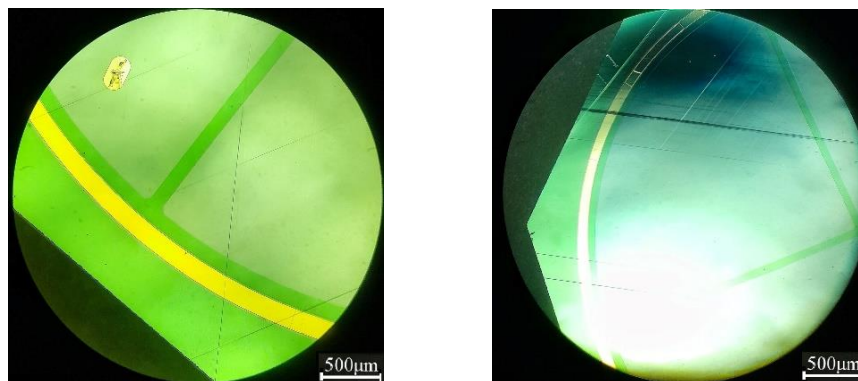


Рис. Д28. Зображення дислокаційних ліній на поверхні фотодіодів до селективного травлення.

Як видно з Рис. Д29, досліджувані фотодіоди мали значний розкид темнових струмів ФЧЕ. Для визначення причин нерівномірності I_m кристали ФД були оброблені в селективному травнику Сіртля (Рис. Д30). Як видно з Рис. Д30, ФД з розкидами темнових струмів мали нерівномірну густину дислокацій на поверхні ФЧЕ. У ФД₁ і ФД₂, в областях підвищеної дефектності, густина дислокацій досягала $N_{dis} \approx 10^{11}-10^{13} \text{ см}^{-2}$ (Рис. Д31а). У ФД₃-ФД₅ в зонах підвищеної дефектності густина дислокацій досягала $N_{dis} \approx 10^8-10^9 \text{ см}^{-2}$ (Рис. Д31б). У серійному ФД₆ $N_{dis} \approx 10^2-10^6 \text{ см}^{-2}$ (Рис. Д31в).

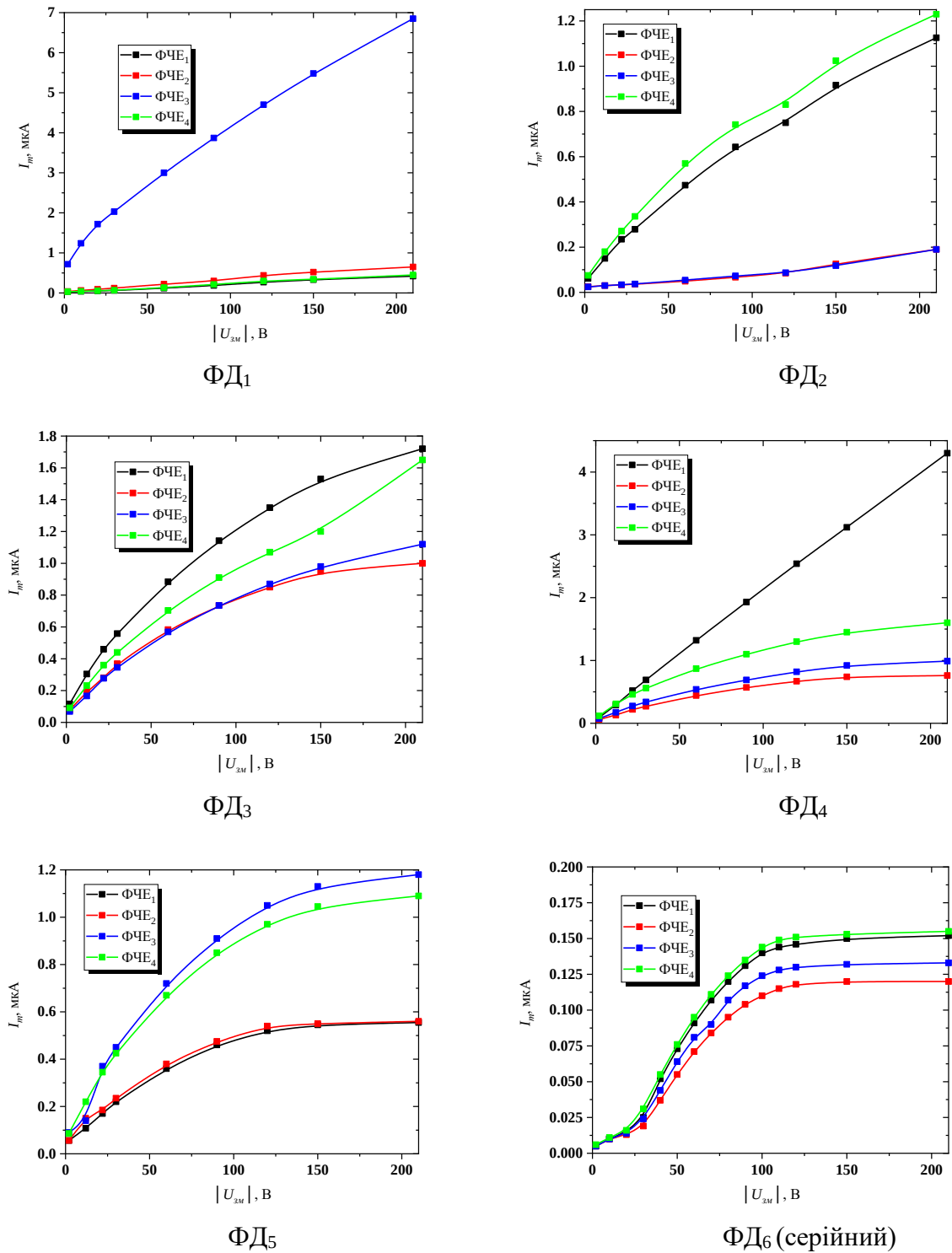


Рис. Д29. ВАХ фотодіодів.

Однак, варто зазначити, що темновий струм фотодіода не залежить від реальної густини дислокацій на поверхні ФЧЕ, оскільки визначальною складовою темного струму ФД є об'ємна генераційно-рекомбінаційна компонента темного струму, яка є значно більшою за поверхневу генераційну

компоненту [18]. Відповідно, розташування дислокацій має вирішальне значення. І значний вплив на величину рекомбінаційного струму будуть мати дефекти, розташовані в ОПЗ.

Глибину залягання дислокацій можна визначити шляхом пошарового травлення кремнію з наступним селективним травленням. Однак ми виявили, що переважна більшість дислокацій, утворених в результаті дифузії фосфору з планарних твердотільних джерел, знаходиться в дифузійному шарі. При легуванні підкладок з рідиннофазних джерел фосфору дислокації також можуть генеруватися на деякій відстані від дифузійного шару через вищі механічні напруження, спричинені високою концентрацією атомів фосфору в міжвузлях кристалічної ґратки кремнію [23].

Однак варто зазначити, що дислокації, утворені в результаті дефектів росту або дефектів, внесених під час механічної обробки, можуть перетинати всю підкладку і робити значний внесок у значення темнових струмів за рахунок зменшення часу життя неосновних носіїв заряду. З метою виявлення дислокацій, які перетинають всю товщу кремнієвої пластини, ми також досліджували зворотні сторони досліджуваних кристалів фотодіодів (Рис. Д32).

Як видно з Рис. Д32, ФЧЕ з високими темновими струмами мали дислокаційні сітки підвищеної густини і в проекціях на тильну сторону підкладок. Це свідчить про наявність дислокацій у всій товщі ОПЗ ФЧЕ зі збільшеним I_m . ФЧЕ досліджуваних ФД, які не характеризувалися підвищеними темновими струмами, також мали деяку густину дислокацій на фронтальній стороні, але з огляду на відсутність цих дефектів на тильній стороні ФЧЕ, можна припустити, що вони не розподілені по всій товщі ОПЗ і знаходяться в дифузійній зоні або поблизу неї.

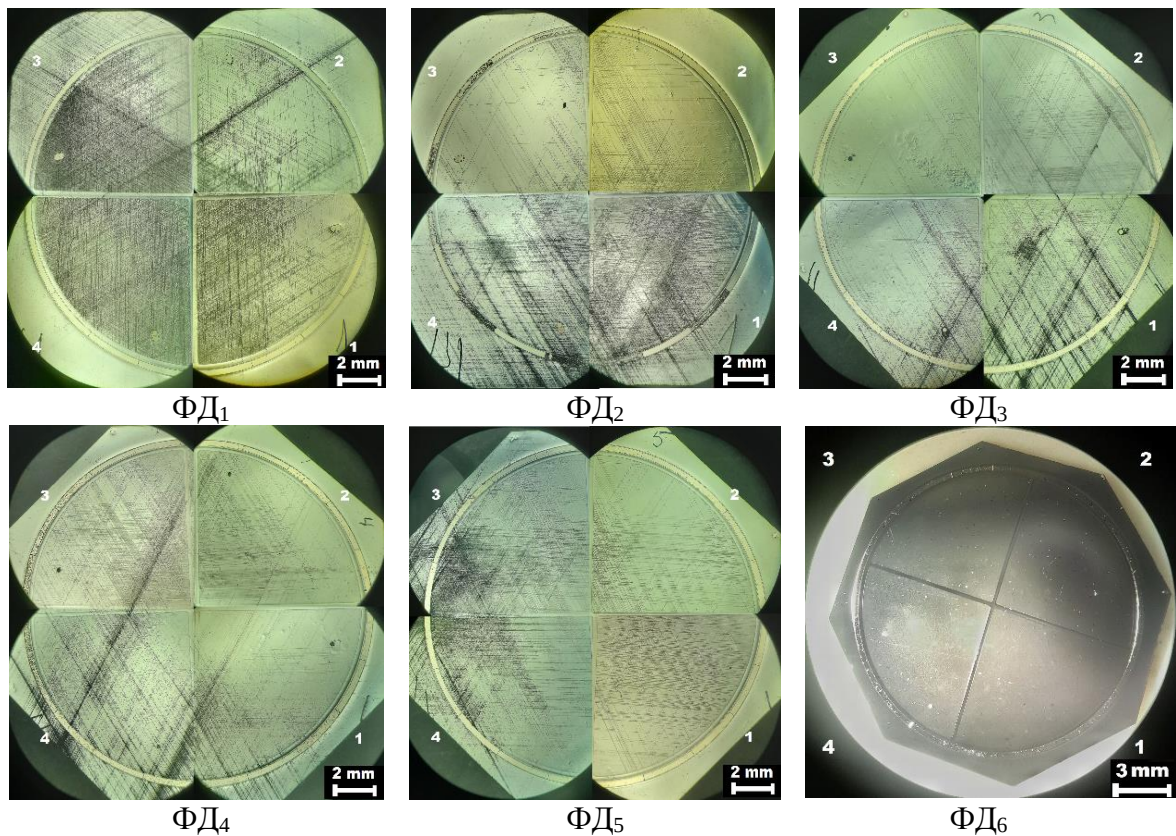


Рис Д30. Зображення дислокацій на поверхні кристалів ФД після селективного травлення.

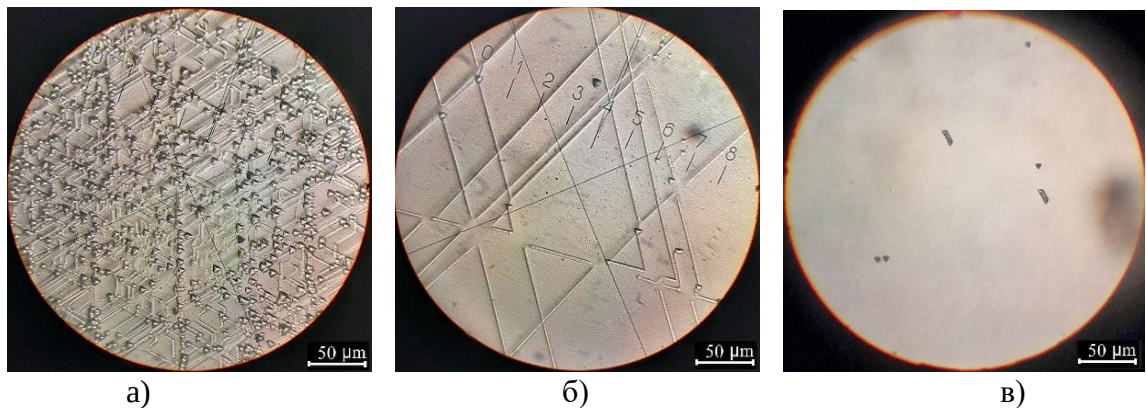


Рис. Д31. Зони підвищеної густини дислокацій при збільшенні $\times 500$ для: а) ФД₁ та ФД₂; б) ФД₂- ФД₅; в) ФД₆.

У випадку серійного ФД₆, на тилловому боці виявлено лише невелику густину дислокацій ($N_{dis} \leq 10^2 \text{ см}^{-2}$), що характерно для кремнію після технологічних обробок. Розкид темнових струмів серійного фотодіода становив до 20%, на відміну від досліджуваних дефектних зразків, де розкид міг досягати в 2 і більше разів.

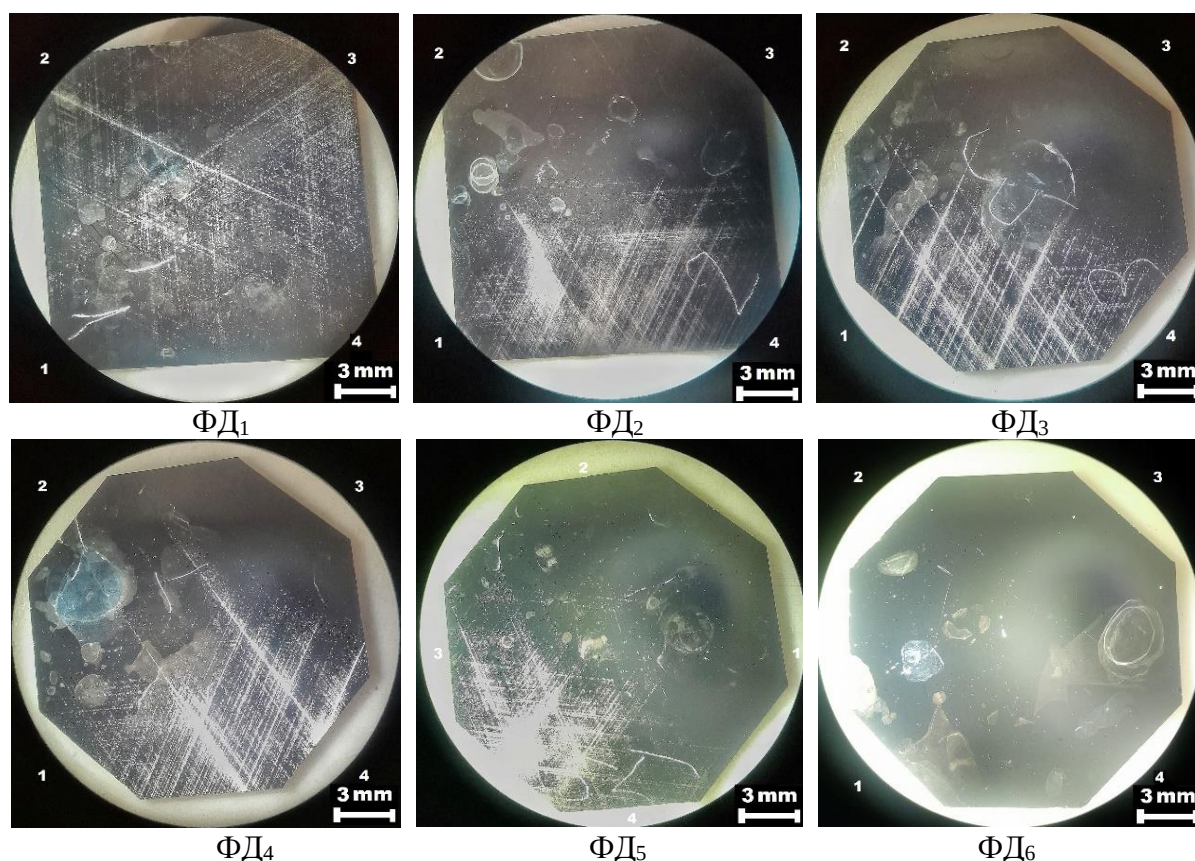


Рис. Д32. Дислокаційні сітки зі зворотної сторони кристалів ФД.

Вплив дислокацій на електричні параметри ФД і властивості p - n переходів може проявлятися двояко: по-перше, наявність дислокацій може призводити до появи рівнів в забороненій зоні за рахунок полів пружних напружень, пов'язаних з дислокаціями. Дислокації можуть служити областями рекомбінації носіїв заряду, і відповідно, наявність центрів рекомбінації в збідненій області p - n переходу буде проявлятися в збільшенні струмів генерації при зворотному зміщенні p - n переходу. По-друге, більш важливим ефектом є вплив дислокацій на властивості p - n переходів за рахунок накопичення домішок на дислокаціях і навколо них, оскільки дислокації можуть декоруватися домішками за рахунок своїх пружних полів, то дислокація, декорована домішками, перетинаючи p - n перехід, призведе до появи високої густини ГРЦ в ОПЗ p - n переходу, що знову ж таки призведе до збільшення генераційних струмів в ФД при зворотному зміщенні [37].

Д2.2. Вплив дислокацій на опір ізоляції між активними елементами фотодіодів

Як видно з Табл. Д2, ФД₁-ФД₅ мали певний розкид опору ізоляції ФЧЕ та ОК R_{36} . Виявлено, що ФЧЕ ««з'єднані» з ОК дислокаційними лініями та мають знижений опір ізоляції. У серійного ФД₆ значного розкиду R_{36} не спостерігалось, оскільки в нього дислокаційні лінії, що перетинають ФЧЕ і ОК, відсутні.

Таблиця Д2

Значення R_{36} досліджуваних ФД

	$R_{36}, \text{M}\Omega$			
	ФЧЕ ₁	ФЧЕ ₂	ФЧЕ ₃	ФЧЕ ₄
ФД ₁	30.8	2.5	20	31.7
ФД ₂	20	40	26.7	12.5
ФД ₃	1.5	6.9	7.4	2.8
ФД ₄	3.6	6.7	6.7	1.4
ФД ₅	4.8	3.7	1.4	2.8
ФД ₆	8	6.7	7.1	8.3

Д2.3. Вплив дислокацій на чутливість фотоприймачів

При вимірюванні імпульсної чутливості ФД ми також спостерігали деяку нерівномірність цього параметра для різних ФЧЕ. Це явище досліджено більш детально на прикладі ФД₅ і ФД₆. Залежність чутливості кожного ФЧЕ від напруги зворотного зміщення наведено на Рис. Д33.

Як видно з Рис. 3.6а, чутливість кожного ФЧЕ ФД₅ при фіксованій напрузі відрізняється. Також видно, що кожна крива досягає насичення при різних $U_{зм}$, хоча максимальна чутливість всіх ФЧЕ ФД₅ приблизно однакова. Різниця в значеннях чутливості може бути викликана різницею в часі життя неосновних носіїв заряду через різну густину дислокацій кожного чутливого елемента.

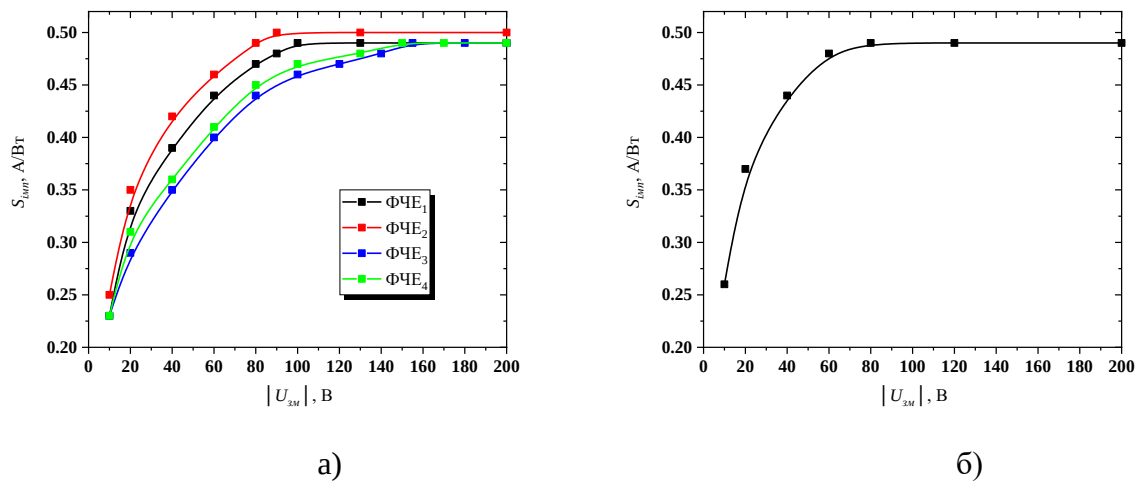


Рис. Д33. Залежність чутливості ФД від напруги зворотного зміщення: а) ФД₅; б) ФД₆.

Зауважимо, що різниця в напрузі насичення чутливості також може бути викликана різницею в коефіцієнті збору неосновних носіїв заряду, який залежить від W_i та L_n , ширина ОПЗ в свою чергу залежить від питомого опору матеріалу [10]. Чутливість ФД досягає насичення, коли коефіцієнт збору носіїв заряду досягає максимального значення, тобто коли всі фотогенеровані носії заряду в базі фотодіода розподіляються p - n переходом (2.21)[11, 88].

Нами визначено ρ та L_n кожного ФЧЕ ФД₅ згідно методики наведеної в Розділі 2.3.3 (Таблиця Д3).

Таблиця Д3.

Значення ρ та L_n кожного ФЧЕ ФД₅

Параметр	ФЧЕ ₁	ФЧЕ ₂	ФЧЕ ₃	ФЧЕ ₄
ρ , кОм	19.2	19.2	13.9	14.7
L_n , мкм	60	80	35	30

Як видно з Табл. Д3, в ФД₅ спостерігається деякий розкид ρ і L_n . Якщо порівняти отримані дані з густиною дислокацій в цього ж ФД, то можна побачити, що ФЧЕ з більшою густиною дислокацій мають менший L_n . Це підтверджує той факт, що час життя неосновних носіїв заряду зменшується зі

збільшенням густини дислокацій. З Табл. ДЗ також видно, що L_n ФЧЕ корелюють між собою як і темновий струм. Також видно, що збільшення густини дислокацій провокує деградацію питомого опору. Це, в свою чергу, може сприяти розкиду $S_{ФЧЕ}$, оскільки бар'єрна ємність ФД визначається N_A та, відповідно, ρ Si [66].

Щодо серійного ФД₆, то в цьому випадку розкиду фоточутливості не спостерігалось (Рис. ДЗЗб). Однак чутливість досягала насичення при дещо менших напругах зворотного зсуву, що свідчить про помірний ступінь деградації питомого опору та часу життя неосновних носіїв заряду. У цьому випадку, згідно з розрахунками, $\rho \approx 20,8$ кОм і $L_n \approx 90$ мкм. Цей ФД мав значно меншу густину дефектів і, як наслідок, дещо вищі кінцеві електрофізичні характеристики кремнію, що забезпечило кращі параметри, ніж досліджувані дефектні зразки.

ДЗ. Динаміка дислокацій на поверхні кремнієвих підкладок з інверсійними шарами під час ізотермічних відпалів

Досліджуючи утворення інверсійних шарів (ІШ) на межі розділу Si-SiO₂ при виготовленні кремнієвих n^+p - p^+ -фотоприймачів, було виявлено деяку динаміку дислокацій після ізотермічних відпалів, яка була відсутня в зразків без інверсії. При огляді наукових джерел з'ясовано, що багато робіт присвячено дослідженню руху дислокацій на поверхні напівпровідникових структур. Так, в [Д21] вивчено поведінку лінійних дефектів у кремнії p -типу з кристалографічною орієнтацією [111], при пропусканні постійного струму густиною $0-15 \cdot 10^5$ А/м² у напрямку [110], в інтервалі температур $T=850-1000$ К при ізотермічному відпалі та було виявлено закономірності зміни лінійної щільності та максимального пробігу дислокацій. В [Д22] досліджено стаціонарний рух дислокацій при механічних напруженнях значно нижчих напружень Пейлєрса. В [Д23] проведено молекулярно-динамічне дослідження

формування дислокацій під час росту кремнію по різних кристалографічних напрямках. Але дані про рух дислокацій на поверхні структур Si-SiO₂ з ІШ відсутні. Тому було вирішено дослідити динаміку даних структурних дефектів, умови появи та можливість контрольованого використання цього явища для потреб електроніки.

Д3.1. Виготовлення n^+p-p^+ -структур з інверсійними шарами

Дослідження проводилось при виготовленні кремнієвих n^+p-p^+ -фотодіодів з ОК на основі кремнію p -типу провідності з питомим опором $\rho \approx 16-20$ кОм·см та орієнтацією [111]. Технологічний маршрут виготовлення фоточутливих кристалів наведений в Розділі 2.1.1.

Відомо, що при використанні високоомного p -кремнію на межі розділу Si-SiO₂ з високою імовірністю утворюються ІШ, формуючи поверхневі провідні канали n^+ -типу (Рис. 2.5) [49-52].

Для ідентифікації інверсії вимірювались вольт-фарадні характеристики МДН-структур при частоті 30 кГц (Рис. Д34). В випадку описаного технологічного маршруту утворення ІШ спостерігалось як при утворенні маскуючого так і просвітляючого SiO₂, а також, з меншою імовірністю, і після дифузії бору [47]. Зауважимо, що інвертування $C-V$ характеристик для кристалів після дифузії бора спостерігається при вищих напругах, ніж в перших двох випадках.

Виготовлені зразки травились в селективному розчині Сіртля тривалістю 5 хв та досліджувались в оптичних мікроскопах. На поверхні кристалів без інверсії спостерігались дислокаційні лінії та сітки, які були розміщені в n^+ -областях (Рис. Д35).

На Рис. Д35 зображено поверхню ФЧЕ після селективного травлення. Поверхнева концентрація зразка після загонки фосфору складала $N_0 \approx 1,25 \cdot 10^{21}$ см⁻³. Густина дислокацій складала $N_{dis} \approx 4-6 \cdot 10^6$ см⁻².

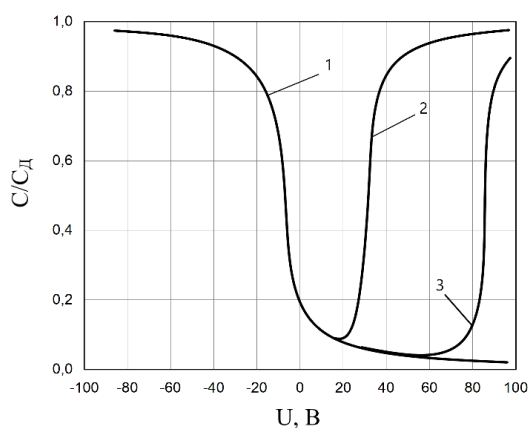


Рис. Д34. C - V характеристики ФД:
1— типова для структури Si-SiO_2 p -типу;
2— інвертована x -ка після окислення; 3—
інвертована x -ка після дифузії бору.

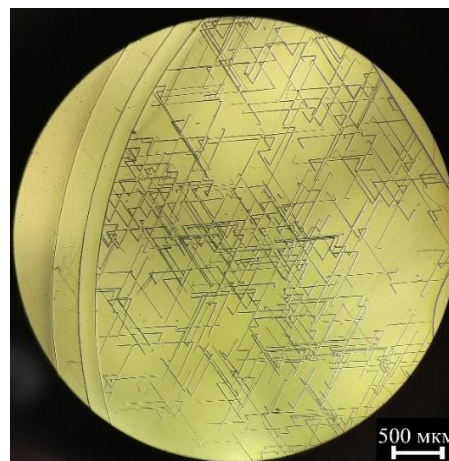


Рис. Д35. Зображення
дислокаційної сітки па поверхні ФЧЕ.

Щодо зразків з ІІІ, то на їх поверхні спостерігалась локалізація дислокацій по периферії ФЧЕ із скупченням на поверхні ОК чи інших елементів топології n^+ -типу поза ФЧЕ (Рис. Д36).

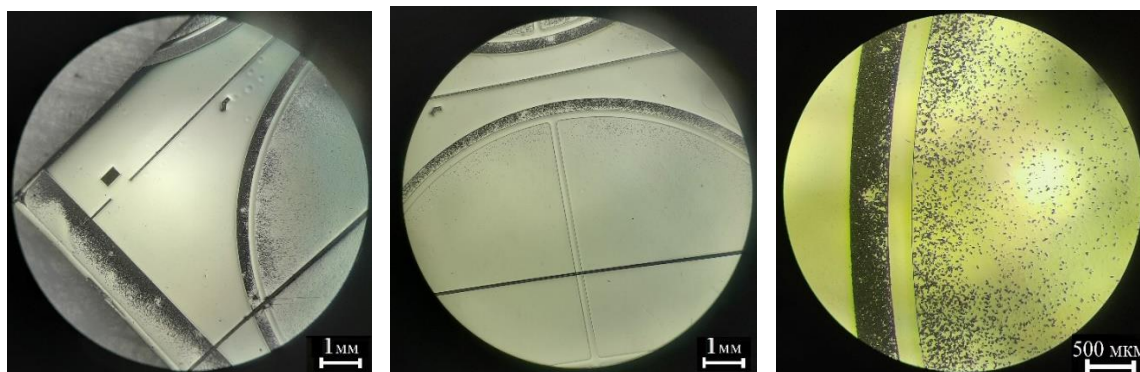


Рис. Д36. Зображення поверхні ФД з ІІІ після селективного травлення.

Із побаченого був зроблений висновок про рух дислокацій по поверхні структур Si-SiO_2 з ІІІ в напрямку периферії кристалу під час ізотермічного відпалу, що сприяло значному зниженню густини структурних дефектів на поверхні ФЧЕ. Описане явище можна використовувати для отримання високолегованих бездефектних кремнієвих структур, оскільки наявність

дислокацій чи інших порушень кристалічної ґратки негативно впливають на параметри виробів, зокрема темновий струм та фоточутливість ФД [37, 18].

У випадку використання описаного явища як технологічного методу «очищення» поверхні кремнієвих структур, виникає потреба в контрольованому утворенні інверсійних шарів. Одним з методів утворення ІШ може бути термічне окислення в парах соляної кислоти за принципом сухе-вологе-сухе окислення (для кремнію *p*-типу). Іншим методом, який не потребує додаткових матеріалів є відпал структур Si-SiO₂ при температурі $T=1173-1223$ К в атмосфері азоту тривалістю ≥ 240 хв. Інверсійні канали, в даному випадку, утворюватимуться за рахунок перерозподілу та дифузії домішок металів в оксиді (які були внесені під час попередніх термічних операцій) до межі розділу Si-SiO₂ [49, 51]. Вказана температура не збільшує глибини *p-n*-переходів та мінімізує деградацію параметрів внаслідок проведення додаткових термічних операцій, а також дана операція може проводитись одночасно із геттеруванням зворотної сторони підкладки бором (в випадку технології кремнієвих *p-i-n* ФД). Після проведення описаних операцій та міграції дислокацій із активних елементів виробу в периферію кристалу варто стравити інвертований оксид в плавиковій кислоті та утворити на поверхні структури просвітляюче покриття будь-яким відомим методом [Д24, Д25].

Д3.2. Дослідження параметрів кремнієвих структур з інверсійними шарами та механізмів динаміки дислокацій

Запропонованим методом вдається повністю «очистити» поверхню ФЧЕ від дислокацій (Рис. Д37).

Але в розглядуваному випадку дані структурні дефекти після відпалу локалізувались в ОК. З рисунків Д36 та Д37 можна побачити, що густина дислокацій в ОК після відпалу сягає $N_{\text{дис.}} \approx 2 \cdot 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. Але зазначимо, що

охоронне кільце також є активним елементом ФД, оскільки обмежує I_m ФЧЕ, відповідно темновий струм ОК повинен бути теж низьким.

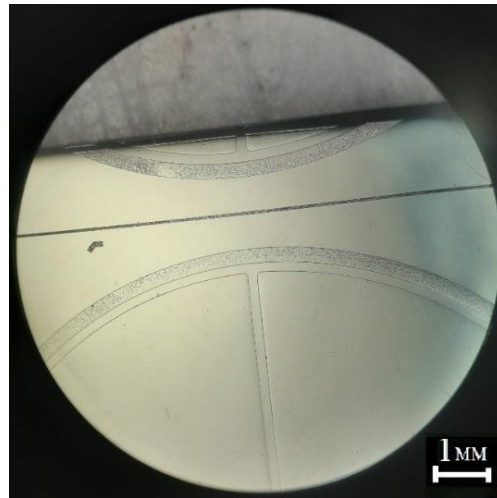


Рис. Д37. Зображення кристалу ФД з відсутніми дислокаціями на поверхні ФЧЕ.

Якщо розрахувати внесок дислокацій в рівень темного струму ФЧЕ згідно методики наведеної в [17], то можна побачити, що при $N_{disc.} \approx 4-6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ $I_m^{ген} \approx 700 \text{ нА}$ (у випадку локалізації дефектів не лише на поверхні, а і в ОПЗ). Але на практиці при такій густині дислокацій спостерігалось $I_m = 80-100 \text{ нА}$ ($U_{зм} = -120 \text{ В}$). Після використання описаного методу «очищення» ФЧЕ від дислокацій вдавалось отримати $N_{disc.} \approx 2-4 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ та знизити рівень темного струму до $I_m = 40-50 \text{ нА}$.

Щодо рівня генераційного темного струму ОК при $N_{disc.} \approx 2-4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ (густина дислокацій в ОК після відпалу), то згідно розрахунків I_{OK} повинен сягати $\sim 400-450 \text{ мкА}$, а на практиці $I_{OK} \approx 6-10 \text{ мкА}$. Вказане значення темного струму ОК не погіршує роботу ФД.

Розбіжність теоретичних значень і практичних свідчить про розміщення дислокацій переважно в n^+ -шарі, а розрахунки проводились в наближенні, що дислокації розміщені також і в ОПЗ. Зауважимо, що розбіжність в випадку рівнів темного струму ОК після відпалу значно вища, ніж для ФЧЕ, з чого можна зробити висновок, що дислокації під час ізотермічного відпалу

підкладки з інверсійними шарами рухаються також з об'єму кристалу до його поверхні.

Для можливості реалізації даного методу очищення ФЧЕ із мінімалізацією розміщення дислокацій в ОК (чи інших активних елементах), на периферії кристалів варто створювати пасивні n^+ -області, обмежені оксидом, які будуть місцями локалізації дефектів після відпалу. Це можуть бути окремі області довільної форми (Рис. Д38).

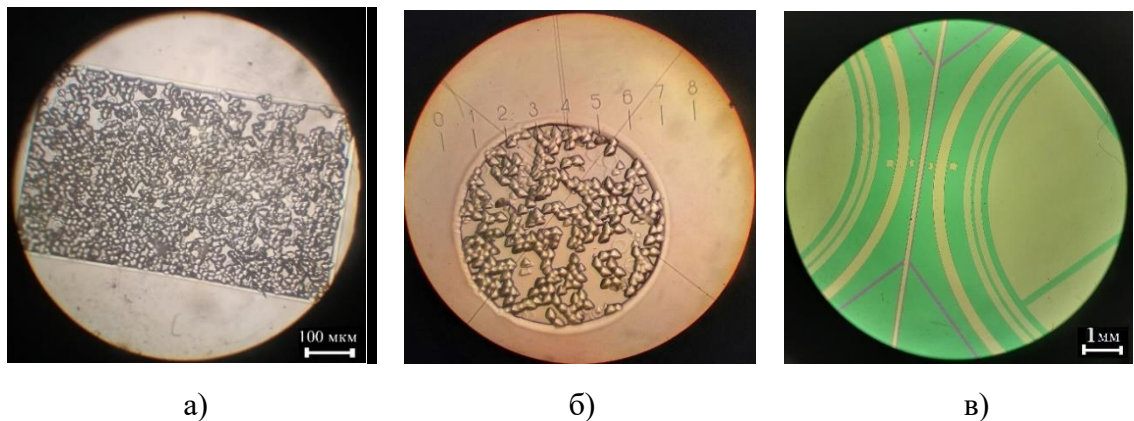


Рис. Д38. Місця локалізації дефектів після відпалу довільної форми (а, б) та концентричне кільце за межами ОК (в).

Ефективним варіантом області локалізації дефектів є пасивне концентричне кільце на периферії кристалу (Рис. Д38в).

Варто відмітити, що елементи, які являтимуться місцями локалізації дефектів на периферії можуть бути відрізані на етапі розділення підкладок на кристали наприклад різанням диском із зовнішньою алмазованою кромкою [76] чи будь-яким іншим методом [Д26-Д28].

В технології кремнієвих $p-i-n$ ФД наявність ІШ проявляється зменшенням опору ізоляції між ФЧЕ та ОК чи власне між ФЧЕ, що призводить до значного зростання темнових струмів. В зразках бракованих внаслідок наявності інверсії $\sum R_{36} \approx 1-10$ кОм при $\sum R_{36} \approx 5-15$ МОм для серійних ФД. А темновий струм ОК $I_{OK} \approx 1-5$ мА при $I_{OK} \approx 0,5-5$ мкА ($U_{zm} = -120$ В) для серійних виробів. I_m бракованих ФД точно виміряти неможливо, оскільки він постійно

зростає внаслідок стоку носіїв заряду з ОК. Можна зафіксувати лише початкове значення, яке сягає $I_m \geq 10$ мкА при $I_m = 25-50$ нА для серійних зразків. Після травлення оксиду кремнію та утворенні нового можливе зниження темнових струмів, але як показують експерименти, після переокиснення значення I_m та I_{OK} дещо вищі, ніж в серійних виробках. Вимірювання показали, що $\sum R_{36}$ в даному випадку сягає 0,5-1 МОм. Це свідчить про наявність залишкових провідних каналів на поверхні кремнію, хоча деякі джерела стверджують про повну ліквідацію ІІІ при стравлюванні SiO_2 [63, Д29]. Для ФД із малою напругою зміщення дані поверхневі канали не впливають на значення темнового струму, але при $|U_{zm}| \geq 100$ В спостерігається його зростання. Тому при використанні запропонованого методу для виробів із високими напругами зміщення варто після зняття оксиду з ІІІ проводити травлення поверхні структур на глибину 0,1-0,2 мкм плазмохімічним чи хіміко-динамічним методом [74, Д30].

При дослідженні морфології областей локалізації дефектів після відпалу в мікроскопах з високим збільшенням та за допомогою атомно-силового мікроскопа спостерігається утворення гексагональних дефектів (Рис. 3.12), які є частковими крайовими дислокаційними петлями [Д31]. Дані порушення утворюються при високій концентрації структурних дефектів в умовах ненасичення вакансій та при наявності хімічної рушійної сили, внаслідок чого зародження дефекту відбувається не одночасним рухом всієї частини дислокації, а шляхом зародження сходинок дислокації і їх бокового руху вздовж дислокації [37]. При збільшенні міри ненасичення вакансій також можуть утворюватися круглі дефекти та дефекти, обмежені викривленими частковими дислокаціями, що також можна побачити з Рис. Д39. Зазначимо, що після «міграції» дислокаційні лінії та сітки трансформувались в значно коротші структурні дефекти із високою густиною.

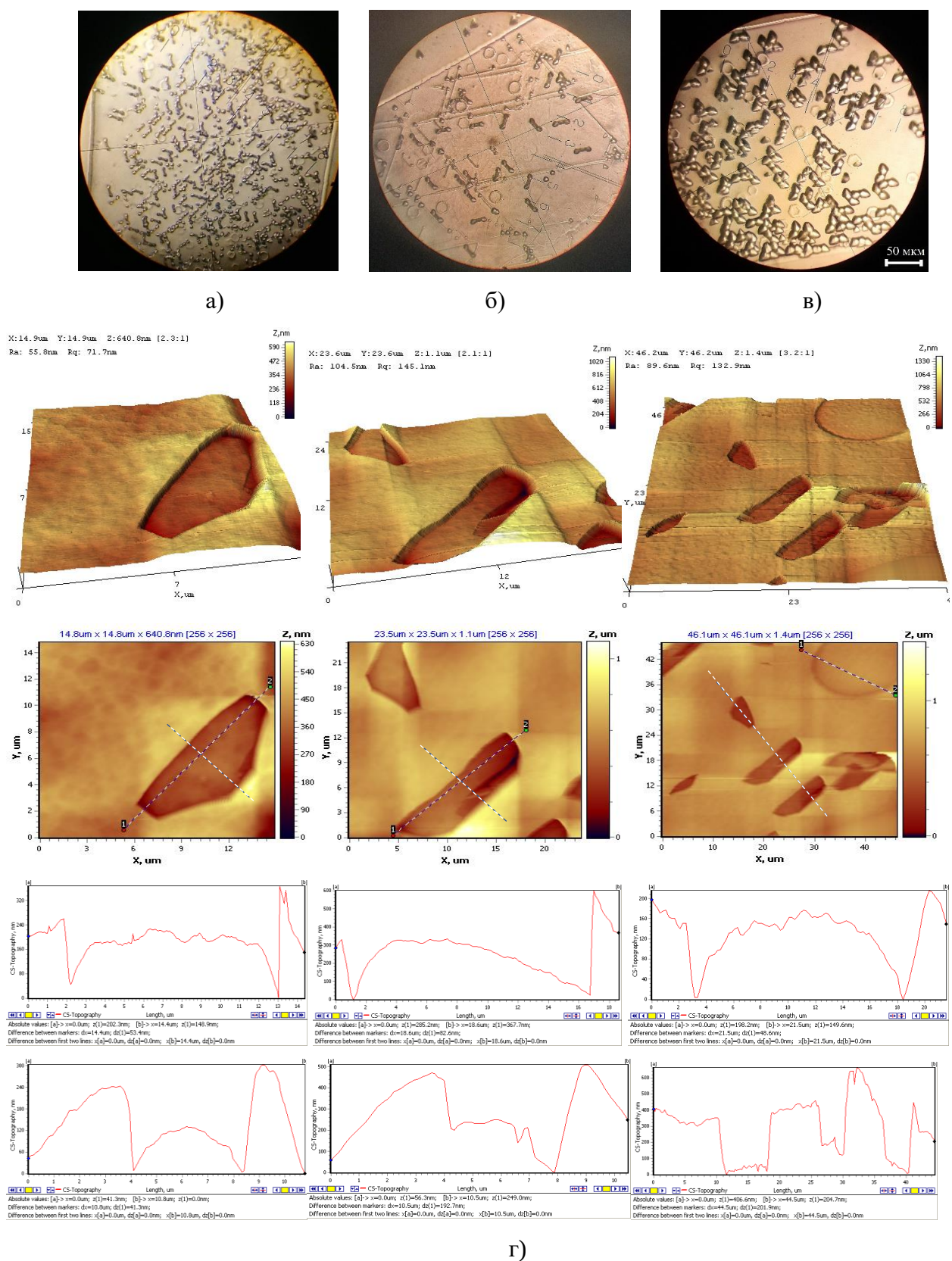


Рис. Д39. Зображення морфології поверхні ділянок з високою густиною дислокацій після їх міграції: а-в) фото отримане за допомогою оптичного мікроскопа при збільшенні $\times 500$; г) АСМ-зображення.

Більшість моделей та досліджень динаміки дислокацій пов'язані із напруженнями на поверхні чи в об'ємі підкладок, які були внесені шляхом деформацій [Д32-Д35]. В описаному ж випадку, анігіляція дислокаційних утворень на поверхні ФЧЕ відбувається за наступним механізмом – зародження часткової дислокації Шоклі із подальшим її рухом вздовж площини дефекту, що призводить до перетворення дефектів упаковки в призматичні дислокації, а дислокаційних сіток та ліній в значно дрібніші дислокаційні утворення. Зародження часткових дислокаційних петель Шоклі та Франка потребує наявності механічних напружень достатньої величини, які можуть виникати в кристалі під час окислення та термоударів [37]. В досліджуваному випадку маскуючий окисл сягав товщини 600-700 нм, що провокувало значні механічні напруження та рух дефектів в зони зі зниженими напруженнями – в зони без оксиду, або зони зі зниженою товщиною SiO_2 (ОК чи інші ділянки із просвітлюючим оксидом). В цьому випадку наявність інверсійних каналів збільшує ефективність динаміки структурних дефектів та збільшує їх швидкість, оскільки в зразках без інверсійних шарів динаміки дефектів не спостерігалось. Описаний механізм дозволяє пояснити зниження густини структурних дефектів чи їх відсутність в зонах з маскуючим оксидом, але механізм міграції дислокацій з ФЧЕ досконало нами ще не вивчений та потребує додаткового дослідження, але він може бути пов'язаний із атмосферами Коттрелла [37] та їх взаємодією з ІШ в присутності механічних напружень.

Д4. Метод зниження густини структурних дефектів на поверхні планарних кремнієвих n^+ - p - p^+ -структур

В цьому параграфі описано запропонований нами новий метод зниження густини поверхневих структурних дефектів на поверхні кремнієвих пластин, який одночасно є методом геттерування неконтрольованих домішок та ГРЦ.

Метод дозволяє знизити деградацію електрофізичних характеристик кремнію та отримати надійні фотоприймачі із покращеними параметрами.

Д4.1. Виготовлення експериментальних фотодіодів

Дослідження проводилися при виготовленні кремнієвих чотириквadrантних $p-i-n$ ФД з охоронним кільцем для роботи на довжині хвилі $\lambda = 1,05$ мкм. Серійні ФД (ФД_с) виготовлялися на основі бездислокаційного монокристалічного кремнію p -типу з питомим опором $\rho \approx 16-17$ кОм·см, часом життя неосновних носіїв заряду $\tau=1400$ мкс орієтації [111]. Товщина кристалів сягала $X=495-500$ мкм. Технологічний маршрут виготовлення ФД_с наведений в Розділі 2.1.1.

Запропоновані експериментальні фотодіоди (ФД_е) (Рис. Д40) виготовлялися в єдиному технологічному циклі з серійними зразками за дещо зміненим маршрутом: після фотолітографії перед дифузією фосфору проводилось ХДП зон ФЧЕ та ОК в суміші кислот $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH} = 9:2:4$ тривалістю $t_{\text{ХДП}}=30-240$ с [109, 110].

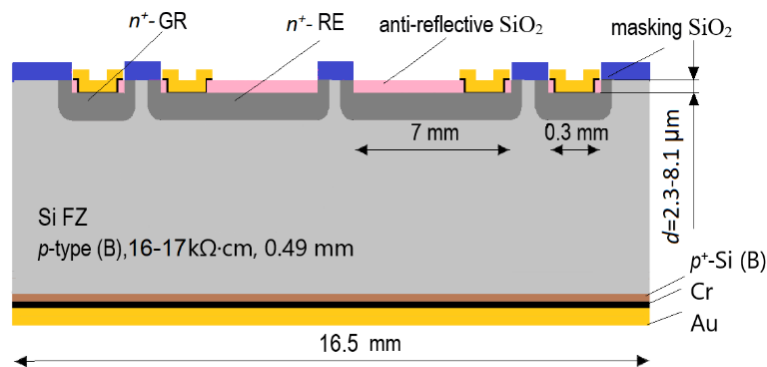


Рис. Д40. Схематичний переріз запропонованого кристалу фотодіода.

Варто зазначити, що вказаний поліруючий травник є хімічно агресивним розчином, відповідно, маскувати поверхню підкладки від небажаної його дії є складним технологічним завданням. Випробувано ряд фоторезистів для встановлення належної хімічної стійкості до вказаного травника. Позитивний

фоторезист AZ1518 (Microchemicals) ($d=1.8$ мкм) [134] відшаровувався в перші 10 с процесу ХДП, не володів належною хімічною стійкістю та провокував нерівномірність травлення в зонах відшарування (Рис.Д41). Фоторезист AZ4533 ($d=3.3$ мкм) [135] відшаровувався після тривалості полірування 30 с, а AZ4562 ($d=6.2$ мкм) [125] відшаровувався після тривалості полірування порядку 45-50 с. Відповідно для досліджень обрано фоторезист AZ4562, але вказане маскуюче покриття не дозволяло проводити тривале полірування.

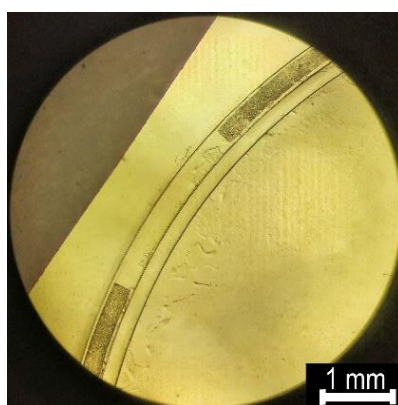


Рис. Д41. Зображення дефектної поверхні кристалу ФД, утвореної внаслідок відшарування фоторезисту під час ХДП.

Проведено дослідження можливості маскування зон, які не підлягають поліруванню, плівкою SiO_2 , оскільки швидкість травлення кремнію у поліруючому травнику значно нижче, ніж оксиду кремнію [57]. Після ХДП із маскуючим SiO_2 полірована поверхня ставала матовою (Рис.Д42а), а травлення оксиду відбувалось нерівномірно (Рис. Д42б). Нерівномірність травлення оксидної плівки спровоковано відмінністю швидкості обміну продуктів реакції травлення плоскої поверхні та поверхні з виступами-впадинами, внаслідок чого в областях біля граней ФЧЕ чи ОК спостерігався товстіший шар SiO_2 (Рис. Д43).

При поліруванні плоских поверхонь спостерігається такий же ефект, внаслідок чого пластини по периферії можуть бути дещо тоншими ніж в центральній частині, і те ж саме стосується випадку полірування плоскої

підкладки з оксидом (Рис. Д44) (вимірювання товщини оксидних плівок проводилось еліпсометричним методом).

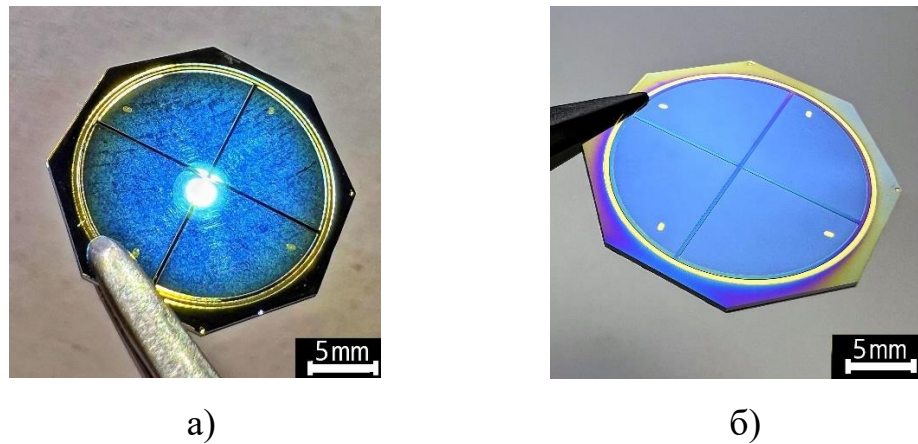


Рис. Д42. Зображення кристалів експериментальних фотодіодів: а) матовий кристал ($t_{ХДП}=120$ с); б) кристал із нерівномірним периферійним оксидом ($t_{ХДП}=180$ с).

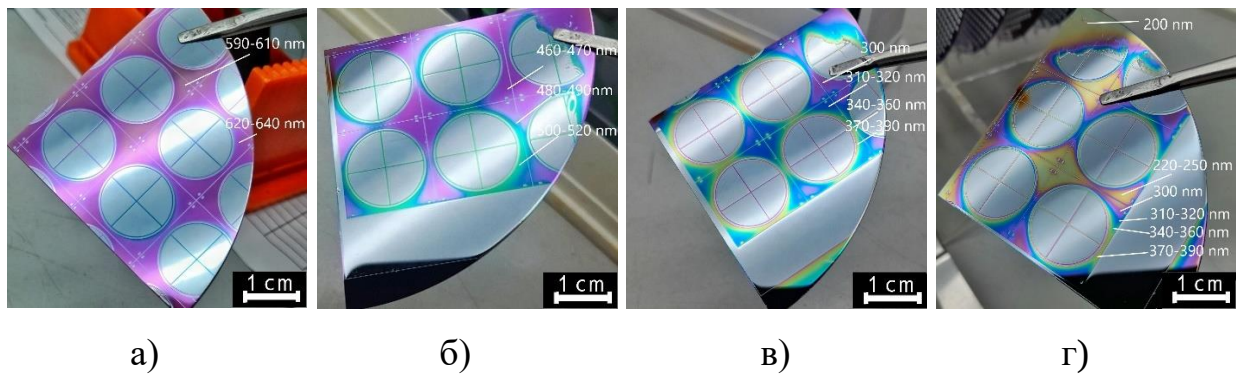


Рис. Д43. Зображення кремнієвих підкладок із різною тривалістю ХДП фронтальної сторони: а) 30 с; б) 60 с; в) 120 с; г) 180 с.

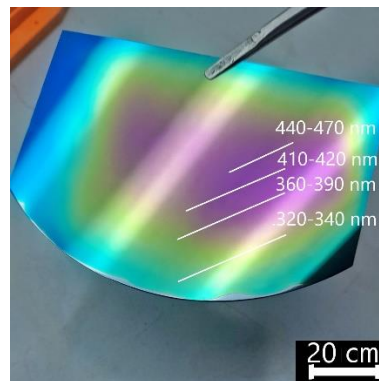


Рис. Д44. Зображення нерівномірного SiO_2 після операції ХДП.

В Таблиці Д4 наведено залежність тривалості ХДП та товщини травленого шару кремнію в зонах ФЧЕ та ОК.

Таблиця Д4.

Залежність тривалості ХДП та товщини травленого шару кремнію.

t , с	30	60	120	180
d , мкм	2,3	4,4	6,4	8,1

Зменшення швидкості травлення з часом спричинене деградацією травника внаслідок збільшення кількості продуктів реакції.

Д4.2. Дослідження морфології поверхні фотодіодів

Пластини кремнію після механічної обробки перед термічним окислення підлягали операції ХДП, а після окислення, як сказано вище, експериментальні зразки полірувались в зонах ФЧЕ та ОК повторно. В загальному процес травлення поверхні Si є двостадійним. На першому етапі відбувається окислення поверхні азотною кислотою HNO_3 . Наступним кроком відбувається травлення оксиду плавиковою кислотою HF, з подальшим утворенням водорозчинної форми комплексу H_2SiF_6 та води. На енергетично вигідних ділянках поверхні (місцях фізичних та хімічних неоднорідностей, дефектів) створюються мікроскопічні локалізовані аноди та катоди, між якими протікає струм, в якості провідного середовища виступає травник-електроліт. Зв'язані процеси, що протікають на мікроанодних та мікрокатодних ділянках поверхні під час травлення кремнієвої поверхні в суміші кислот HF- HNO_3 , можна описати загальним рівнянням [74]:



Місцезнаходження мікроанодних та мікрокатодних ділянок, якими переважно є дефекти структури та кордони між зернами, в процесі травлення Si не є сталими або фіксованими на поверхні. Відбувається лише певне чергування анодних та катодних станів на локальній ділянці. Спочатку проходить реакція розкиснювання HNO_3 з енергетично вигідною ділянкою поверхні, що спричиняє інжекцію дірок в Si – ця ділянка стає локальним катодом. Наступним кроком відбувається процес відновлення атому Si інжекттованими дірками та утворення оксиду SiO_2 – ділянка переходить в анодний стан. В подальшому відбувається реакція між SiO_2 та HF, що призводить до утворення водорозчинного комплексу H_2SiF_6 та води, тобто процес травлення Si відбувається на локальному аноді. Продуктом анодної реакції є атомарний водень, що виділяється в великій кількості. Він, реагуючи з HNO_3 , сприяє її розкисненню та переключенню ділянки поверхні Si в катодний стан. В результаті цього отримуємо повторювальний цикл анодно-катодних реакцій. Постійне переключення між анодними та катодними реакціями на будь-якій локальній ділянці поверхні призводить до не вибіркового (або не селективного) травлення Si поверхні, тобто полірування.

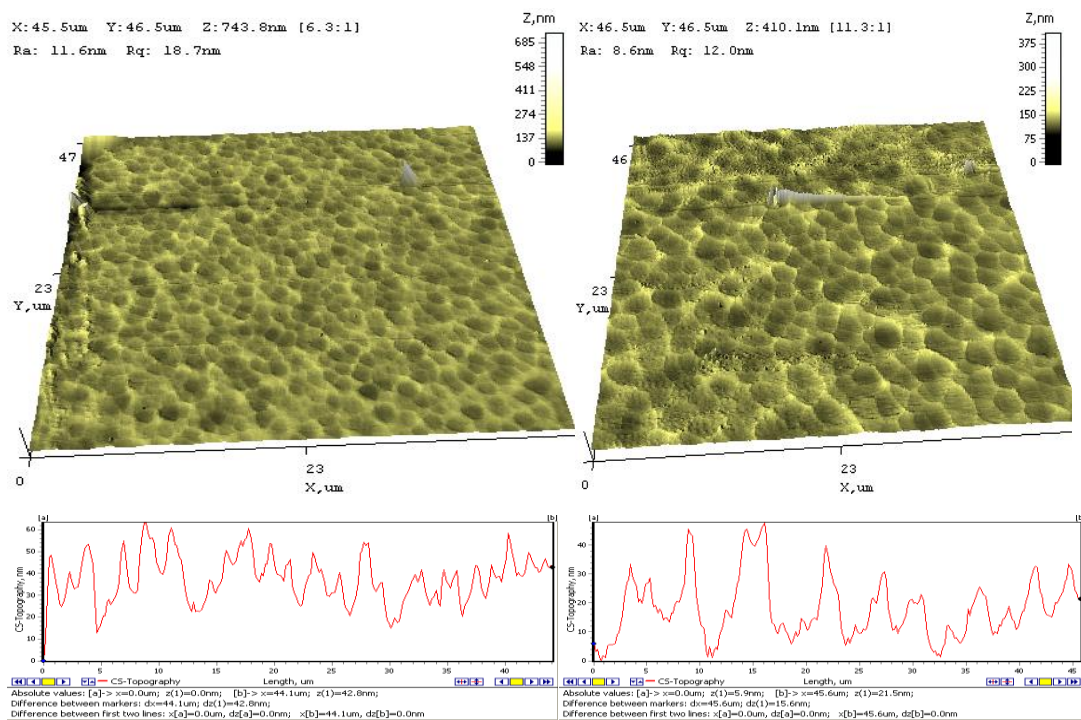
Завжди існує ймовірність того, що дірки, які емітовані катодною реакцією, можуть перейти до іншого катодного стану на поверхні або рекомбінувати з вільними електронами, що містяться в електроліті, ще до того, як відбудеться реакція з атомом Si на первинному мікрокатоді. В цьому випадку катодно заряджена ділянка зберігає свій зарядовий стан довший час, також, як і відповідна анодно заряджена ділянка, в будь-якому іншому місці на поверхні так само залишається мікроанодом, згідно збереження нейтральності повної реакції. Як наслідок отримуємо селективне травлення на локальних анодних ділянках, яке утворює шорстку Si поверхню, що в свою чергу призводить до утворення шарів структурованого кремнію. Поява будь-якого оксиду кремнію на ділянці мікрокатоду призведе процес травлення до ще більшої селективності, внаслідок появи бар'єру між дірками та поверхнею

Si, що зменшує реакцію на локальному мікрокатоді. Відповідно, утворення матової-структурованої поверхні після операції ХДП експериментальних зразків спровоковане наявністю оксиду кремнію на поверхні підкладок [Д36].

При дослідженні морфології експериментальних ФД після травлення методами АСМ та СЕМ мікроскопії встановлено, що матова поверхня являла собою макроструктуровану. Збільшення тривалості травлення сприяло збільшенню шорсткості поверхні (Рис. Д45).

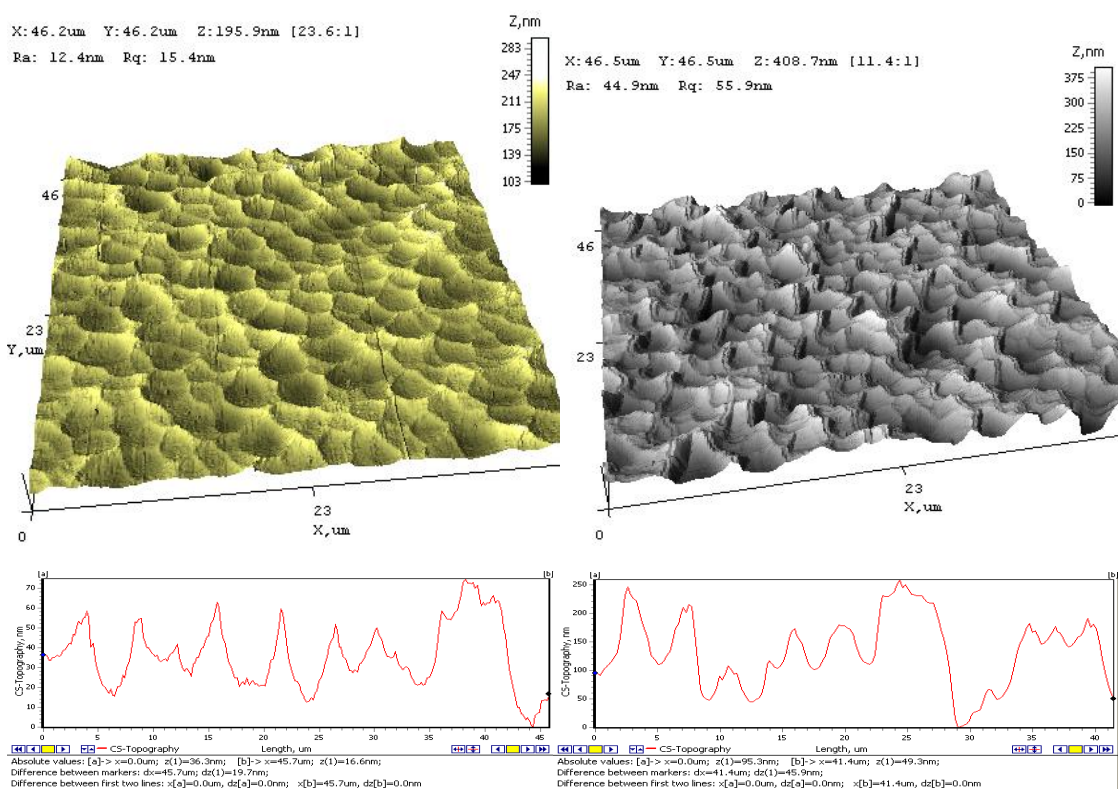
При збільшенні тривалості ХДП $t_{ХДП} > 180$ с спостерігалась неоднорідність структурування поверхні, травлення по кристалографічних площинах (Рис. Д46), збільшення шорсткості в зонах порушень кристалічної ґратки (в зонах механічних дефектів (Рис. Д47) та на дефектах структури (Рис. Д48).

Причини нерівномірного травлення можуть бути наступні: виснаження травника, внаслідок тривалої операції ХДП (зміна складу травника внаслідок розкладання вихідних реагентів розчину і накопичення продуктів реакції); утворення мікрорельєфу, виступів та впадин, що порушує ламінарність потоку травника та обмін продуктів реакції і свіжого травника; наявність структурних дефектів, утворених як під час окислення так і ростових (зауважимо, що при мілій тривалості травлення неоднорідності розміру пор внаслідок наявності дефектів не спостерігається); виділення тепла під час реакції, що при тривалому процесі сприяє локальному розігріву зразка та неконтрольованому пришвидшенні травлення; екранування газовми бульбашками мікроучастків поверхні, що створює неоднорідні умови для протікання реакції травлення та ін [74].



а)

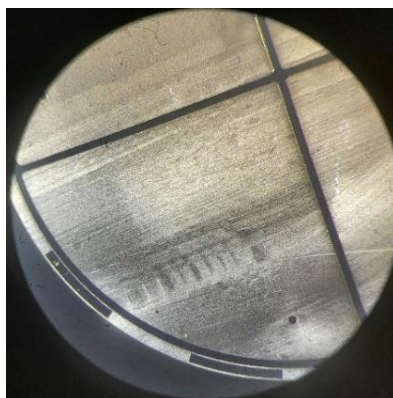
б)



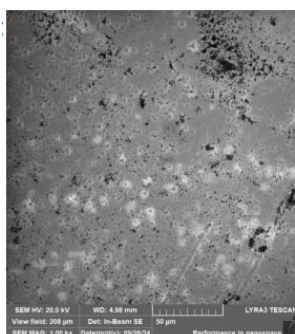
в)

г)

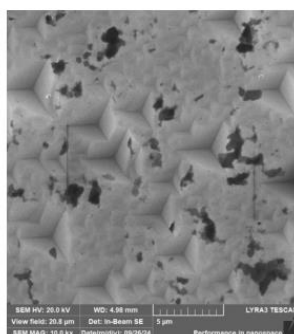
Рис.Д45. Макропориста структура поверхні кремнію після ХДП: а) $t_{ХДП}=30$ с; б) $t_{ХДП}=60$ с; в) $t_{ХДП}=120$ с; г) $t_{ХДП}=180$ с.



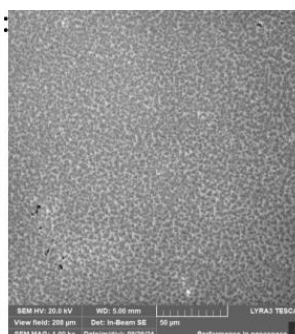
а)



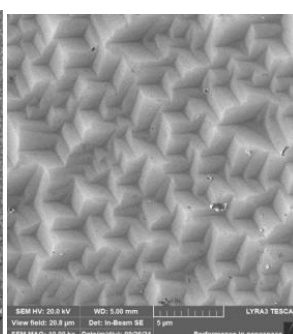
б)



в)



г)

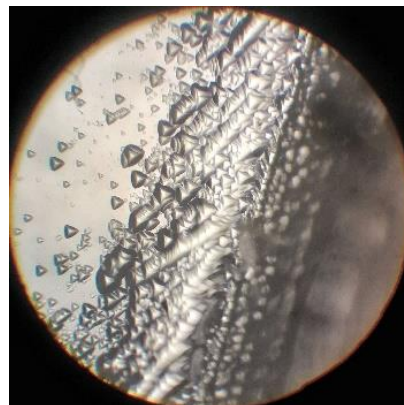


д)

Рис. Д46. Зображення нерівномірного структурування поверхні підкладки після ХДП($t_{\text{ХДП}}=210$ с): а) фото, темне поле металографічного мікроскопа (x16); б-д) СЕМ-зображення.



а)



б)

Рис. Д47. Зображення збільшення шорсткості поверхні в зонах механічних порушень після ХДП($t_{\text{ХДП}}=240$ с): а) подряпина ; б) периферія та торець пластини.

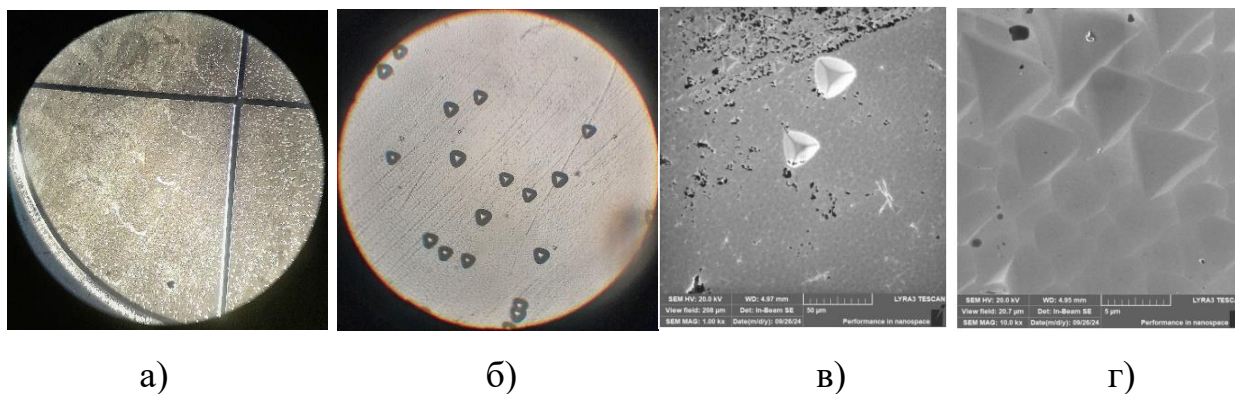


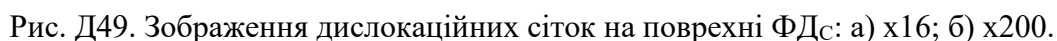
Рис. Д48. Зображення збільшених розмірів пор в зонах структурних дефектів після ХДП ($t_{\text{ХДП}}=240$ с): а) фото, темне поле металографічного мікроскопа (x16); б) фото, темне поле металографічного мікроскопа (x200); в, г) СЕМ-зображення.

Д4.3. Дослідження дефектної структури поверхні підкладок

Вихідні кремнієві підкладки володіли густиною дислокацій $N_{\text{дис.}}=5-15$ см⁻². Після окислення збільшення кількості дислокацій не спостерігалось, але відомо [37], що під час окислення, на поверхні пластин утворюються дефекти упаковки. Ці дефекти мають міжвузлову природу та пов'язані з акумуляцією та конденсацією надлишкових міжвузлових атомів домішки чи кремнію. Дефекти упаковки утворюються переважно в областях механічних порушень поверхні підкладок (сліди різання чи шліфування, подряпини) або на комплексах точкових дефектів (чи свірл-дефектів), але цей фактор нівелюється проведенням хімічного травлення пластин після механічної обробки.

Окиснення кремнію відбувається шляхом переносу атомів кисню через шар оксиду, який росте, з подальшою взаємодією їх з атомами кремнію на межі розділу Si-SiO₂. Атом кисню досягнувши межі розділу двох фаз або займає вакансію, або впроваджується в зайнятий вузол ґратки, заміщуючи атом кремнію. При тривалому окисленні, кількість надлишкових атомів кремнію росте та може утворювати скупчення-кластери. Саме вказані кластери є основними центрами локалізації дислокацій та однією із причин їх генерації під час наступних термічних операцій (у випадку відсутності

Досліджено поверхню серійних ФД після селективного травлення (Рис. Д49). На поверхні ФЧЕ виявлено комплекси дислокаційних ліній та сіток. Густина дислокацій на поверхні ФЧЕ серійного ФД сягала $N_{duc}=4\cdot6\cdot10^6\text{ см}^{-2}$. Причиною дефектоутворення є дифузія фосфору, а саме: утворення механічних напружень внаслідок дифузії атомів Фосфору в ґратку кремнію, оскільки атомний радіус фосфору більше атомного радіусу кремнію[17, 37].



229

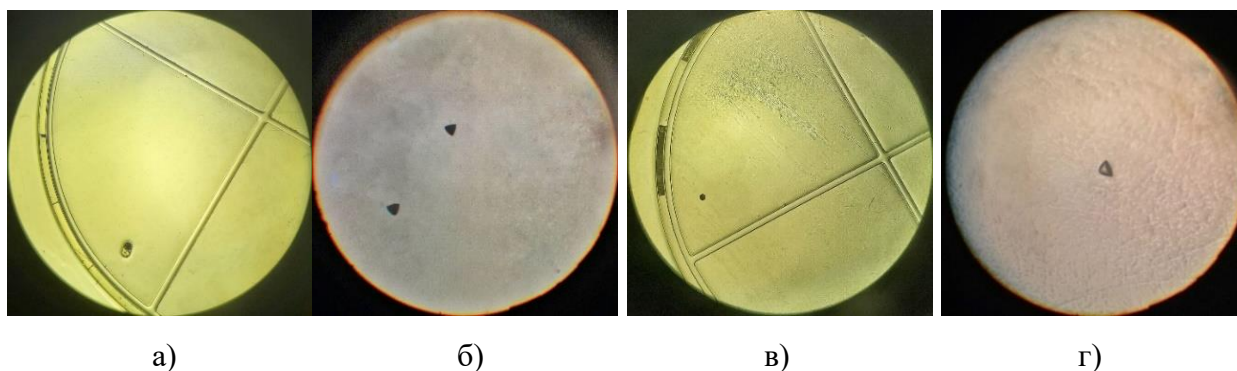


Рис. Д50. Зображення дислокацій на поверхні ФД_Е: а); б) поверхня ФД після ХДП з захистом фоторезистом; в); г) поверхня ФД після ХДП без захисту фоторезистом ($t_{\text{ХДП}}=120$ с).

Варто зазначити, що селективне травлення структурованої поверхні провокує утворення ямок травлення пірамідоподібної форми різного розміру, які нагадують крайові дислокації, (Рис. Д51). Вказані ямки травлення є збільшеними порами, утвореними в областях наявності дислокацій чи точкових дефектів, розмір яких після ХДП суттєво не відрізнявся внаслідок низької тривалості травлення. Фактично селективний травник модифікує структуровану поверхню, збільшуючи розміри пор (збільшуючи шорсткість) чи інших структурних елементів розвиненої поверхні.

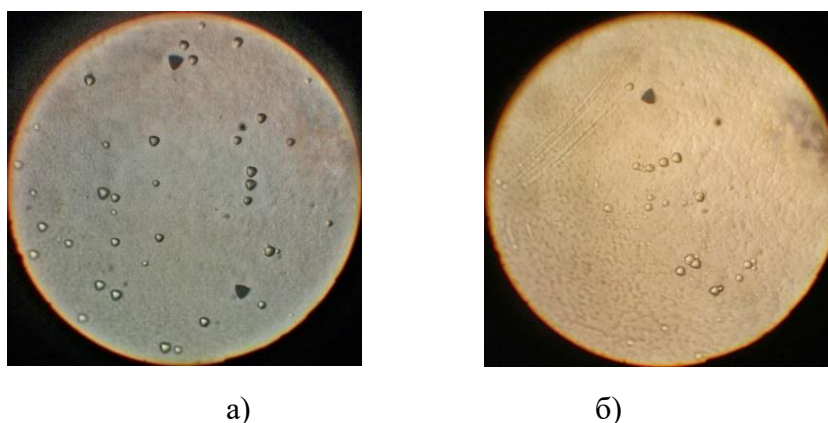


Рис. Д51. Зображення дислокацій та підвищеної шорсткості на поверхні ФД_Е: а) $t_{\text{ХДП}}=60$ с; б) $t_{\text{ХДП}}=120$ с.

Д4.4. Дослідження параметрів запропонованих фотодіодів

Досліджено серію фотодіодів виготовлених на основі кремнію в єдиному технологічному циклі, яка складалась із комерційних зразків та двох типів ФД виготовлених за запропонованим маршрутом: ФД з операцією ХДП тривалістю 30 с з маскуванням фоторезистом AZ4562 (ФД_{Е0}); ФД з операцією ХДП тривалістю 30 с без маскуванням фоторезистом (ФД_{Е30}).

Отримано графіки типових ВАХ досліджуваних ФД (Рис. Д52).

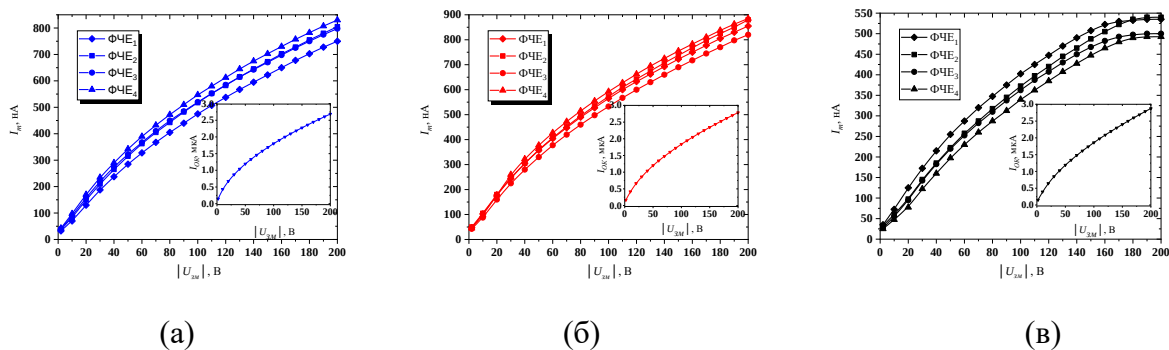


Рис. Д52. ВАХ ФД_с (а), ФД_{Е0} (б), та ФД_{Е30} (в).

З Рис. Д52 можна побачити, що ФД_{Е30} володіли нижчими темновими струмами ніж інші зразки на 30-40 %. Значення темнових струмів ФД_{Е0} та ФД_с не виходили в насичення в діапазоні досліджуваних напруг. Зниження I_m ФД_{Е30} можна пояснити наявністю структурованої поверхні, яка являється геттером [Д37, Д38]. Відповідно, в випадку ФД_{Е30} під час термічних операцій функцію геттерування виконували не лише дифузійні n^+ - та p^+ -шари, а і структурована поверхня. Вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду кінцевих ФД методом спаду фотопровідності підтверджує факт щодо геттерування структурованою поверхнею: $\tau_{ФДс}=90-100$ мкс, $\tau_{ФДЕ0}=100-110$ мкс, $\tau_{ФДЕ30}=140-150$ мкс. Оскільки об'ємна генераційна складова темного струму обернено пропорційна до часу життя неосновних носіїв заряду[37], тому і I_m ФД_{Е30} має дещо нижчі значення.

Як видно з вимірювань τ , в процесі виготовлення ФД час життя носіїв заряду знижується приблизно на порядок відносно початкового, а введення

додаткового механізму геттерування дозволяє дещо нівелювати деградацію електрофізичних характеристик кремнію. Незначне збільшення $\tau_{\text{ФДЕ0}}$ відносно серійного випадку спричинене травленням поверхневого шару кремнію після термічного окислення, який містить не лише дефекти структури, а і дифундовані неконтрольовані домішки, які під час наступних термічних операцій дифундували б в товщу підкладки, де утворювали б додаткові рекомбінаційні центри.

Хоча ФДЕ0 володіли нижчою густиною поверхневих дефектів та дещо вищим τ , значення їх темнових струмів фактично не відрізнялись від серійних, а в деяких випадках були і вищими. Це можна пояснити тим, що дефекти структури, зокрема дислокації та дефекти упаковки, утворені під час термічних технологічних операцій, розміщені переважно на поверхні підкладок або в товщі дифузійного шару. Основний внесок в значення темнових струмів ФД роблять дефекти чи неконтрольовані домішки, розміщені саме в високоомній i -області (чи в ОПЗ) фотоприймачів, оскільки являють собою додаткові генераційно-рекомбінаційні центри та знижують час життя неосновних носіїв заряду. Запропонована топологія кристалу крім збільшення τ дозволяє знизити густину поверхневих структурних дефектів та знизити поверхневу генераційну складову темнового струму.

Але зазначимо, що в ФДЕ внаслідок ХДП та деякого заглиблення ФЧЕ в товщу підкладки спостерігається незначне збільшення ефективної площі ФЧЕ , яке збільшує значення поверхневої генераційної складової темнового струму та нівелює його зниження внаслідок зменшення густини поверхневи дефектів. Але варто відмітити, що накладання ростових та поверхневих дефектів може провокувати значні розкиди темнового струму по ФЧЕ одного ФД або і пробої p - n -переходу [17, 37], тому зниження густини поверхневих дефектів навіть без зниження темновго струму дозволяє отримувати високонадійні фотоприймачі із високими напругами пробою.

У випадку $I_{\text{ОК}}$ (Рис. Д52 вставки), то на відміну від I_m їх значення

більшою мірою залежить від густини поверхневих станів та наявності інверсійних шарів на межі розділу Si-SiO₂ периферії кристалу. Враховуючи, що досліджувані ФД виготовлені в єдиному технологічному циклі та володіли однаковими значеннями N_{ss} то їх I_{OK} були подібними.

Також досліджено імпульсну чутливість ФД (Рис. Д53) та встановлено, що ФД_С та ФД_{Е0} володіють майже однаковими значеннями фоточутливості, а S_{imp} . ФД_{Е30} сягає дещо вищого максимального значення. Збільшення чутливості спричинене наявністю структурованої поверхні, яка дещо зменшує коефіцієнт відбивання випромінювання R від поверхні ФД, що можна побачити з Рис. Д54, де коефіцієнт пропускання структурованого ФД_{Е30} вище, ніж ФД_С. Зауважимо, що збільшення коефіцієнта пропускання кристалів збільшує коефіцієнт збирання фотогенерованих носіїв заряду, в тому числі і за рахунок відбивання від Au-дзеркала зі зворотної сторони кристалу, а це в свою чергу також збільшує фоточутливість ФД [28].

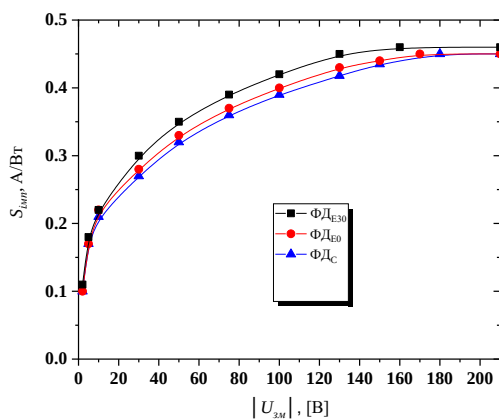


Рис. Д53. Графік залежності $S_{imp}(|U_{зм}|)$ ФД_С та ФД_Е.

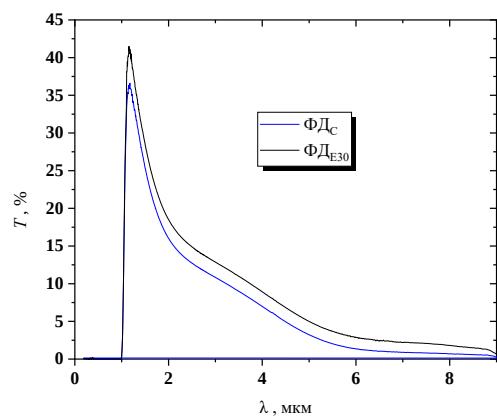


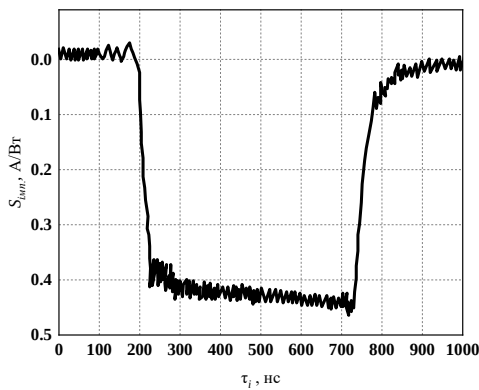
Рис. Д54. Спектр пропускання

кристалів ФД_С та ФД_{Е30} без Cr-Au на тилівій тороні.

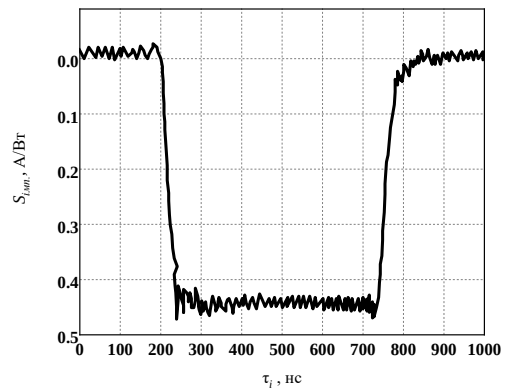
Також варто відмітити, що фоточутливість досліджуваних зразків виходила в насичення при різних напругах зворотного зміщення: ФД_С – $U_{зм} \sim -180$ В, ФД_{Е0} – $U_{зм} \sim -170$ В, ФД_{Е30} – $U_{зм} \sim -130$ В. Нагадаємо, що $p-i-n$ ФД досягає максимальної фоточутливості в випадку, коли сума ширини ОПЗ та

дифузійної довжини неосновних носіїв заряду стає рівною товщині i -області ФД (2.25). Але при подальшому збільшенні зворотної напруги ОПЗ продовжує збільшуватись, та при деякій $|U_{zm\ max}|$ розширюється на всю високоомну область кристалу ФД (2.26).

Встановити $|U_{zm\ max}|$ можна розглядаючи імпульсні характеристики ФД: в випадку (2.25) при подальшому збільшенні напруги зміщення форма імпульсної характеристики змінюватиметься та змінюватиметься час наростання та спадання сигналу (Рис. Д55а), а в випадку (2.26) форма характеристики не змінюватиметься, а час наростання та спадання не змінюватиметься або змінюватиметься мінімально (Рис. Д55б).



а)



б)

Рис. Д55. Форма вихідного імпульсного сигналу ФД_{Е30} при $|U_{zm}|=130$ В (а); $|U_{zm\ max}|=160$ В (б).

Знаючи товщину кристалу та глибини залягання дифузійних шарів ФД, та отримавши вихідні імпульсні характеристики ФД можна визначити кінцевий питомий опір кристалів згідно методу наведеного в Розділі 2.3.3. Встановлено: для ФД_С $\rho \approx 9,7$ кОм·см ($|U_{zm\ max}|=210$ В), для ФД_{Е0} $\rho \approx 10,1$ кОм·см ($|U_{zm\ max}|=200$ В), для ФД_{Е30} $\rho \approx 12,6$ кОм·см ($|U_{zm\ max}|=160$ В). Як видно із отриманих результатів деградація питомого опору базового матеріалу структурованого фотодіода менша, ніж в інших зразків. Це підтверджується також із ВАХ ФД_{Е30} (Рис. Д52), де значення темнових струмів виходять в

насичення при нижчих напругах, ніж $\Phi_{ДС}$ та $\Phi_{ДЕ0}$, оскільки $I_m^{ген}$ прямопропорційне W_i .

Вимірювання бар'єрної ємності ФД також підтверджують факт відмінності кінцевого питомого опору об'єму кристалів (Рис. Д56), оскільки ємність $\Phi_{ДЕ30}$ сягала нижчих значень, ніж інші зразки, адже $C_{RE} \sim N_A \sim 1/\rho$ [66].

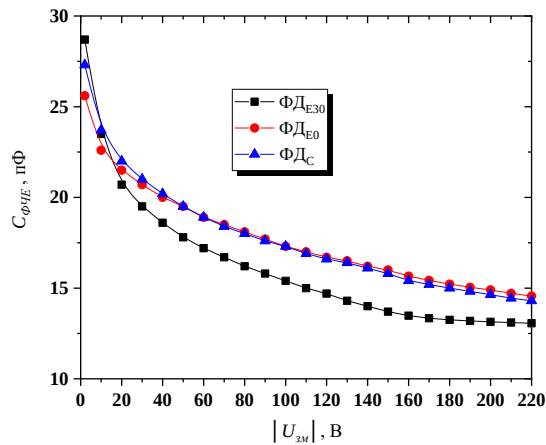


Рис. Д56. Графік залежності $C_{ФЧЕ}(|U_{зм}|)$ $\Phi_{ДС}$ та $\Phi_{ДЕ}$.

Зауважимо, що ємність $\Phi_{ДЕ0}$ сягала співмірних значень з $\Phi_{ДС}$, хоча і експериментальний зразок володів дещо вищим питомим опором. Імовірно збільшення C_{RE} $\Phi_{ДЕ0}$ спровоковане деяким збільшенням площі ФЧЕ, за рахунок утворення бокових граней ФЧЕ під час ХДП.

Також визначено еквівалентну потужність шуму досліджуваних ФД (NEP) при $|U_{зм}|=120$ В та $\Delta f=200$ Гц, та отримано: для $\Phi_{ДЕ30}$ $NEP=7,94 \cdot 10^{-13}$ Вт·Гц^{-1/2}, для $\Phi_{ДЕ0}$ $NEP=9,98 \cdot 10^{-13}$ Вт·Гц^{-1/2}, для $\Phi_{ДС}$ $NEP=9,58 \cdot 10^{-13}$ Вт·Гц^{-1/2}. Враховуючи, що чутливість фотодіодів суттєво не відрізняється, то NEP фактично визначається рівнем шумів. Оскільки $\Phi_{ДЕ30}$ володів найнижчим рівнем темнових струмів і шумів та дещо вищою чутливістю, то значення його еквівалентної потужності шуму найнижче.

Д4.5. Дослідження параметрів фотодіодів з різною тривалістю хіміко-динамічного полірування

Досліджено параметри експериментальних фотодіодів виготовлених в іншій серії на основі кремнію з $\rho=16-18$ кОм·см та $\tau=1750$ мкс за запропонованим технологічним маршрутом із різною тривалістю ХДП без захисту фоторезистом: $t_{ХДП}=30$ с (ФД_{Е30}), $t_{ХДП}=60$ с (ФД_{Е60}), $t_{ХДП}=120$ с (ФД_{Е120}), $t_{ХДП}=180$ с (ФД_{Е180}). Зразки ФД_{Е180} забракувались на етапі вимірювання опору ізоляції активних елементів, який сягав значно нижчих значень, ніж інші зразки (Табл. Д5).

Таблиця Д5

Залежність $\sum R_{con}$ від $t_{ХДП}$.

ФД	ФД _с	ФД _{Е30}	ФД _{Е60}	ФД _{Е120}	ФД _{Е180}
$\sum R_{con, МОМ}$	3,3-5	2,5-4	1-2	0,6-1,3	0,02-0,05

Зниження $\sum R_{con}$ при збільшенні тривалості травлення свідчить про зниження маскуючих властивостей оксиду кремнію від атомів фосфору внаслідок його потоншення. Відповідно, в випадку ФД_{Е180} відбулося легування фосфором зазорів між активними елементами фотодіода, внаслідок чого їх опір ізоляції сягав низьких значень. Про наявність інверсійних шарів на межі розділу Si-SiO₂ в ФД_{Е180} свідчило також вимірювання C-V характеристик МДН-структур (Рис. Д57). Крива вольт-фарадної характеристики ФД_{Е180} інвертувала на відміну кривих притаманним іншим зразкам.

Зниження $\sum R_{con}$ провокує зростання коефіцієнта фотозв'язку між ФЧЕ [50], зростання I_m та I_{OK} (Рис. Д8 вставка). Зростання темнових струмів ОК відбувається внаслідок утворення інверсійних провідних шарів на периферії кристалу ФД шляхом легування фосфором чи перерозподілу атомів домішки під час наступних термічних операцій. При потребі проведення тривалішого ХДП потрібно вирощувати товстіший маскуючий SiO₂.

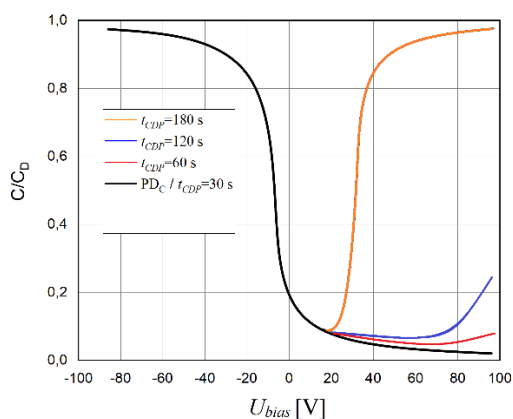


Рис. Д57. C-V характеристики ФД

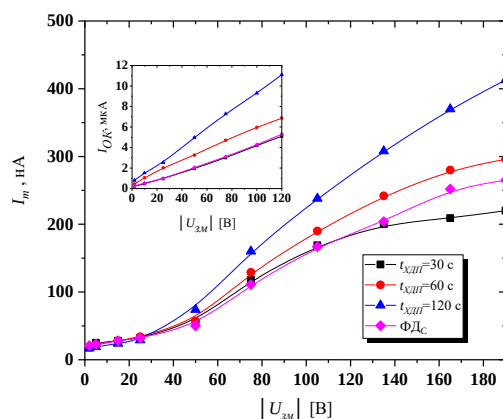


Рис. Д58. ВАХ ФД_С та ФД_Е

При дослідженні ВАХ ФД (Рис. Д58) побачено, що при збільшенні тривалості ХДП I_m зростає. Хоча міра геттерування, при збільшенні $t_{ХДП}$ зростає, внаслідок утворення більш порушеної поверхні та збільшення шорсткості ($\tau_c \approx 110-120$ мкс, $\tau_{30} \approx 170-190$ мкс, $\tau_{60} \approx 210-230$ мкс, $\tau_{120} \approx 240-270$ мкс), але зростання часу травлення сприяє і збільшенню кількості поверхневих станів за рахунок утворення розвиненої поверхні та збільшення ефективної площі ФЧЕ. В такому випадку поверхнева складова темнового струму [58] переважає над об'ємною та робить значний внесок в загальний темновий струм. У випадку ФД_{Е30}, міра його структурування суттєво не впливає на зростання темнового струму, відповідно вказаний зразок володів найнижчими I_m .

Насичення імпульсної чутливості, як і в попередньому випадку спостерігалось при різних напругах зміщення (Рис. Д59), що також свідчило про різну міру геттерування та різне значення кінцевого ρ та τ фотодіодів. ФД_{Е30} володів найвищою максимальною S_{imn} , оскільки володів найвищим T (і відповідно R) при $\lambda = 1,05$ мкм (Рис. Д60). При збільшенні шорсткості збільшення різниці T відносно неструктурованого Si при збільшенні λ , що свідчить про можливість використання такої морфології кремнію для виготовлення детекторів з $\lambda > 1,05$ мкм.

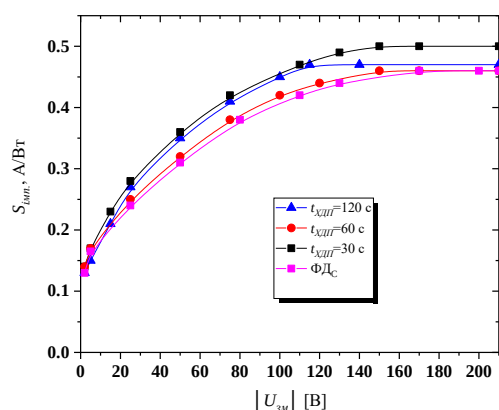


Рис. Д59 Графік залежності
 $S_{inn}(|U_{3M}|)$ ФД_с та ФД_е.

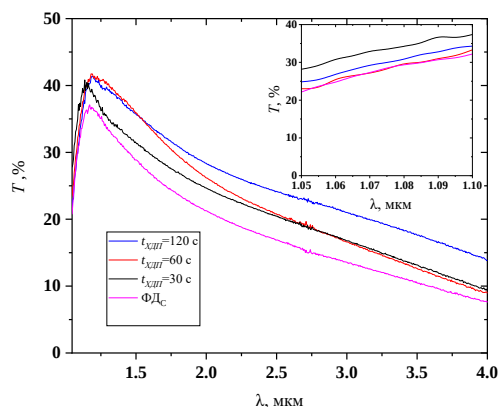


Рис. Д60. Спектр пропускання

кристалів ФД_с та ФД_е без Cr-Au на
тиловій стороні.

Також встановлено, що досліджувані ФД володіли різними значеннями максимумів спектральної характеристики чутливості при $|U_{3M}|=2\text{В}$ (Рис. Д61). Вигляд спектральної характеристики чутливості ФД визначається в першу чергу залежністю коефіцієнта збирання носіїв заряду від довжини хвилі. Даний параметр характеризує рекомбінаційні втрати, та являє собою частину генерованих носіїв заряду, які беруть участь в утворенні фотоструму. При збільшенні ρ (а, відповідно, і W_i) та τ при однаковій напрузі зміщення коефіцієнт збирання довгохвильового випромінювання зростає, а відповідно і зростає довгохвильова чутливість фотодіода та відбувається зміщення максимуму спектральної характеристики в сторону більших довжин хвиль [89, 90]. Зауважимо, що форма спектральних характеристик структурованих зразків була більш селективна із «гострішим» піком, на відміну від серійного ФД, що свідчило про менший вплив фонового випромінювання на корисний сигнал фотоприймача.

При збільшенні напруги зворотного зміщення, максимум спектральної характеристики зміщується в сторону більших довжин хвиль. Форма та максимум спектральних характеристик всіх ФД при $|U_{3M\max}|$ була однаковою (Рис. Д61 вставка), лише даний максимум для кожного ФД сягав при різних

значеннях зміщення $|U_{зм\ max}|$.

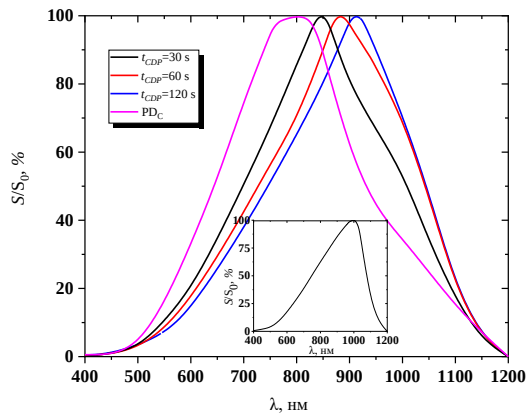
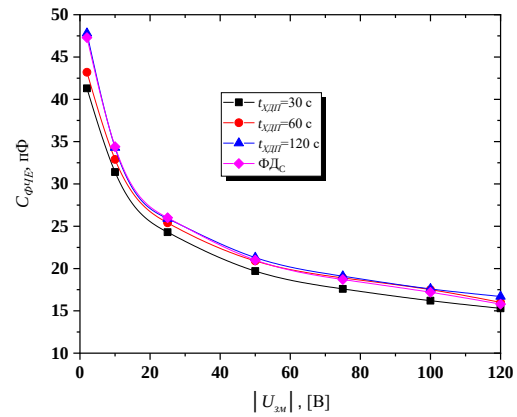


Рис. Д61. Спектральні характеристики чутливості фотодіодів при $|U_{зм}| = 2\text{ В}$ (вставка $|U_{зм}| = |U_{зм\ max}|$ для кожного



ФД).
Рис. Д62. Графік залежності $C_{ФЧЕ}(|U_{зм}|)$ ФД_С та ФД_Е.

Щодо бар'єрної ємності ФЧЕ (Рис. Д62), то в ФД з тривалістю травлення $t_{хдп} \geq 60\text{ с}$ спостерігалось незначне збільшення $C_{ФЧЕ}$ внаслідок збільшення ефективної площі ФЧЕ (як за рахунок заглиблення ФЧЕ та і за рахунок структурування), оскільки *p-i-n* ФД фактично являє собою плоский конденсатор, де обкладинками є леговані n^+ - та p^+ -області, а діелектриком *i*-область, відповідно при збільшенні площі обкладинки зростає ємність ФЧЕ.

Висновки до Додатку 1

В фотоприймачах на основі *p-i-n* структур особливу увагу варто приділяти структурній досконалості високоомної *i*-області, в якій відбуваються процеси рекомбінації-генерації фотогенерованих носіїв заряду, оскільки через наявність дефектної структури у вигляді кластерів структурних дефектів або дислокацій в забороненій зоні з'являються глибокі рівні, що провокують погіршення фотоелектричних параметрів ФП. Також наявність структурних дефектів провокує погіршення електрофізичних характеристик кремнію. Наявність дефектів в як в *i*-області так і в поверхневих n^+ - або p^+ -

шарах може прокувати зростання темнових струмів чи пробої p - n переходів. В цьому розділі досліджено вплив кристалографічних дефектів на поверхні та в об'ємі p - i - n фотодіодів на їх фотоелектричні параметри. Під час досліджень зроблені наступні висновки:

1. Дефекти структури часто розміщуються на пластинах нерівномірно і спричиняють нерівномірність параметрів по чутливих елементах багатоелементних фотодіодів. Причинами нерівномірного розподілу дислокацій по поверхні ФД є нерівномірний розподіл точкових дефектів, що утворилися в результаті окиснення, наявність мікродефектів, утворених під час механічного або хіміко-динамічного полірування, а також неоднорідність точкових чи лінійних дефектів (ростових) в об'ємі злитка (відповідно, в об'ємі пластини).

2. Лінійні дефекти часто перетинають всю пластину, утворюючи центри рекомбінації в області просторового заряду фотодіода. Наявність рекомбінаційних центрів зменшує час життя і довжину дифузії неосновних носіїв заряду, в результаті чого погіршуються параметри, пов'язані із заданими характеристиками.

3. Виявлено динаміку дислокацій по поверхні структур Si-SiO_2 з інверсійними шарами в напрямку периферії кристала під час ізотермічного відпалу, що сприяло значному зниженню густини структурних дефектів на поверхні чутливих елементів. Описане явище рекомендовано використовувати для отримання високолегованих бездефектних кремнієвих структур. Запропонованим методом вдається знизити густину дислокацій в ФЧЕ на 2–3 порядки.

4. Запропоновано метод зниження густини поверхневих структурних дефектів шляхом проведення операції Хіміко-динамічне полірування в зонах чутливих елементів після термічного окислення. Метод дозволяє ліквідувати структурні дефекти утворені під час окиснення, які є центрами генерації дислокацій під час дифузійних операцій. Хіміко-динамічне

полірування з використанням маскування за допомогою SiO_2 формує структуровану поверхню, яка геттерує генераційно-рекомбінаційні центри в об'ємі кристалу та зменшує коефіцієнт відбивання випромінювання від поверхні ФД. Запропонованим методом вдається отримати фотодіоди із зниженими значеннями темнових струмів та підвищеною фоточутливістю.

Список використаної літератури в Додатку 1

Д1 Sirtl E., Adler A. Chromsäure-Flußsäure als spezifisches System zur Ätzgrubenentwicklung auf silizium. *International Journal of Materials Research*. 1961. Vol. 52, No. 8. P. 529-531.

Д2. Abdullin F.A., Pautkin V.E., Pecherskaya E.A., Pecherskiy A.V., Artamonov D.V., Nikolaev K.O. Application of the Selective Silicon Etching Methods for Estimation of the Wafers Quality in the Micromechanical Sensors. 2019 *International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. IEEE; 2019 April. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798467>

Д3. Haynes W.M. *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press; 2016.

Д4. Ponath P., Posadas A.B., Demkov A.A. Ge (001) surface cleaning methods for device integration. *Applied Physics Reviews*. 2017. Vol. 4, No. 2. <https://doi.org/10.1063/1.4984975>

Д5. Yamamura K., Takiguchi T., Ueda M., Deng H., Hattori A.N., Zettsu N. Plasma assisted polishing of single crystal SiC for obtaining atomically flat strain-free surface. *CIRP annals*. 2011. Vol. 60, No. 1. P. 571-574. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.072>

Д6. Павлов С.М., Войцеховська С.М. Технологія мікроелектронних засобів: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ; 2017.

Д7. Гвоздієвський Є.Є., Денисюк Р.О., Томашик В.М., Томашик З.Ф. Травлення монокристалів CdTe, $Zn_xCd_{1-x}Te$ і $Cd_xHg_{1-x}Te$ водними розчинами HNO_3 – HI –гліцерин. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2017. Vol. 18, No. 1. P. 117-121. <https://doi.org/10.15330/pcss.18.1.117-121>

Д8. Abdullin F.A., Pautkin V.E., Pecherskaya E.A., Pecherskiy A.V., Artamonov D.V., Nikolaev K.O. Application of the Selective Silicon Etching Methods for Estimation of the Wafers Quality in the Micromechanical Sensors. 2019 *International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED)*. IEEE; 2019 April. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/SED.2019.8798467>

Д9. Li X., Gao Y., Yin Y., Wang L., Pu T. Experiment and theoretical prediction for surface roughness of PV polycrystalline silicon wafer in electroplated diamond wire sawing. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 49. P. 82-93. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.022>

Д10. McClish M., Farrell R., Myers R., Olschner F., Entine G., Shah K.S. Recent advances of planar silicon APD technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2006. Vol. 567, No. 1. P. 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.05.055>

Д11. Rahim A., Goyvaerts J., Szelag B., Fedeli J.M., Absil P., Aalto T., ... Baets R. Open-access silicon photonics platforms in Europe. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2019. Vol. 25, No. 5. P. 1-18. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2019.2915949>

Д12. Zhang S., Yao Y., Hu D., Lian W., Qian H., Jie J., ... Xie L. Application of silicon oxide on high efficiency monocrystalline silicon PERC solar cells. *Energies*. 2019. Vol. 12, No. 6. Article 1168. <https://doi.org/10.3390/en12061168>

Д13. Gerlach G., Maser K. A Self-Consistent Model for Thermal Oxidation of Silicon at Low Oxide Thickness. *Advances in Condensed Matter Physics*. 2016. Vol. 2016, No. 1. Article 7545632. <https://doi.org/10.1155/2016/7545632>

Д14. Sah C.T., Sello H., Tremere D.A. Diffusion of phosphorus in silicon oxide film. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 1959. Vol. 11, No. 3-4. P. 288-298. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(59\)90229-X](https://doi.org/10.1016/0022-3697(59)90229-X)

Д15. Khan S.B., Irfan S., Zhuanghao Z., Lee S.L. Influence of refractive index on antireflectance efficiency of thin films. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 9. Article 1483. <https://doi.org/10.3390/ma12091483>

Д16. Milton K.L., Durrant T.R., Cobos Freire T., Shluger A.L. Difference in structure and electronic properties of oxygen vacancies in α -quartz and α -cristobalite phases of SiO₂. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 4. Article 1382. <https://doi.org/10.3390/ma16041382>

Д17. Dai F., Zhang L. Simulating changes of packing structures, locally loading states and mechanical behaviors for Si lattices with double vacancies at elevated temperatures. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2023. Vol. 153. Article 107187. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.107187>

Д18. Tognato R. On the formation of swirl defects in silicon and germanium. *Physica Status Solidi (a)*. 1986. Vol. 98, No. 2. P. K133-K136. <https://doi.org/10.1515/9783112501825-048>

Д19. Middelmann T., Walkov A., Bartl G., Schödel R. Thermal expansion coefficient of single-crystal silicon from 7 K to 293 K. *Physical Review B*. 2015. Vol. 92, No. 17. Article 174113. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.174113>

Д20. Yang D., Ma X. Defects and Impurities in Silicon Materials. In: *Handbook of Integrated Circuit Industry*. 2023. P. 1677-1695. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2836-1_76

Д21. Solovyev A. A., Rybin V. V., Kulagin A. V. Influence of DC Current on Movement of Dislocations in P-Silicon Single Crystals in Field of Internal Stresses. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 975-980. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.975>

Д22. Chen H., Levitas V. I., Xiong L., Zhang X. Stationary dislocation motion at stresses significantly below the Peierls stress: Example of shuffle screw and 60° dislocations in silicon. *Acta Materialia*. 2021. Vol. 206. Article 116623. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116623>

Д23. Zhou N., Wei X., Zhou L. Formation of dislocations in the growth of silicon along different crystallographic directions—A molecular dynamics study. *Crystals*. 2018. Vol. 8, No. 9. Article 346. <https://doi.org/10.3390/cryst8090346>

Д24. Moayedfar M., Assadi M. K. Various types of anti-reflective coatings (ARCS) based on the layer composition and surface topography: a review. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2018. Vol. 53, No. 2. P. 187-205. <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0013>

Д25. Rajan G., Karki S., Collins R. W., Podraza N. J., Marsillac S. Real-time

optimization of anti-reflective coatings for CIGS solar cells. *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 19. Article 4259. <https://doi.org/10.3390/ma13194259>

Д26. Zhang F., Jiang M., Sun S., Sun W., Monka P. P. Research on laser multi-focal scribe cutting of silicon wafer based on spatial light modulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. P. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.239>

Д27. Kainth S., Sharma P., Diwan P. K., Pandey O. P. Shaping the Future: Innovations in Silicon Wafer Production and Finishing. *Silicon*. 2024. Vol. 16, No. 18. P. 6479-6497. <https://doi.org/10.1007/s12633-024-03168-5>

Д28. Kurniawan R., Chen S., Teng H., Ko T. J., Han P. W., Kim G. S., Kiswanto G. Reverse Engineering of Commercial Ultrasonic Saw Blade Cutter for Cutting Semiconductor Material. In: *Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XXII 2024*. Khairun University; 2024. P. 387-391. <https://doi.org/10.71452/590754>

Д29. Zhang T., Iqbal S., Zhang X. Y., Wu W., Su D., Zhou H. L. Recent advances in highly efficient organic-silicon hybrid solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2020. Vol. 204. Article 110245. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110245>

Д30. Yadav H. N. S., Das M. The evolution of morphology and chemistry in fused silica surface after medium-pressure plasma processing. *Journal of Micromanufacturing*. 2025. Vol. 25165984251315233. <https://doi.org/10.1177/25165984251315233>

Д31. Таланін І. Є., Левінзон Д. І., Таланін В. І. Дослідження трансформації ростових мікроефектів у кремнії після іонної імплантації. *Укр. фіз. журн.* 2000. Т. 45, № 8. С. 963-966.

Д32. Solovyev A. A., Rybin V. V., Kulagin A. V. Influence of DC Current on Movement of Dislocations in P-Silicon Single Crystals in Field of Internal Stresses. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. Pp. 975-980. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.975>

Д33. Chen H., Levitas V. I., Xiong L., Zhang X. Stationary dislocation motion

at stresses significantly below the Peierls stress: Example of shuffle screw and 60° dislocations in silicon. *Acta Materialia*. 2021. Vol. 206. Article 116623. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116623>

Д34. Zhou N., Wei X., Zhou L. Formation of dislocations in the growth of silicon along different crystallographic directions—A molecular dynamics study. *Crystals*. 2018. Vol. 8, No 9. Article 346. <https://doi.org/10.3390/cryst8090346>

Д35. Павлик Б. В., Кушлик М. О., Слободзян Д. П., Лис Р. М. Перебудова дефектної структури та центрів дислокаційної люмінесценції у приповерхневих шарах р-Si. *Журнал фізичних досліджень*. 2017. Т 21, № 1-2. С. 1601-1.

Д36. Srivastava S. K., Kumar D., Singh P. K., Kar M., Kumar V., Husain M. Excellent antireflection properties of vertical silicon nanowire arrays. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2010. Vol. 94, No 9. Pp. 1506-1511. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.02.033>

Д37. Ayvazyan G., Hakhoyan L., Ayvazyan K., Aghabekyan A. External gettering of metallic impurities by black silicon layer. *physica status solidi (a)*. 2023. Vol. 220, No 5. Article 2200793. <https://doi.org/10.1002/pssa.202200793>

Д38. Pasanen T. P., Laine H. S., Vähänissi V., Schön J., Savin H. Black silicon significantly enhances phosphorus diffusion gettering. *Scientific reports*. 2018. Vol. 8, No 1. Article 1991. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20494-y>

Додаток 2. Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

1. Kukurudziak M. S. 1064 nm wavelength pin photodiode with low influence of periphery on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 1. P. 01023-1 – 01023-4. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(1\).01023](https://doi.org/10.21272/jnep.14(1).01023) (Scopus).
2. Kukurudziak M. S. Formation of dislocations during phosphorus doping in the technology of silicon p-i-n photodiodes and their influence on dark currents. *Journal of nano- and electronic physics*. 2022. Vol. 14, No. 4. P. 04015-1 – 04015-6. [https://doi.org/10.21272/jnep.14\(4\).04015](https://doi.org/10.21272/jnep.14(4).04015) (Scopus).
3. Kukurudziak M. S. Diffusion of phosphorus in technology for manufacturing silicon p-i-n photodiodes. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2022. Vol. 25, No. 4. P. 385-393. <https://doi.org/10.15407/spqeo25.04.385> (WoS, Scopus).
4. Kukurudziak M. S. Influence of surface resistance of silicon p-i-n photodiodes n^+ -layer on their electrical parameters. *Physics and chemistry of solid state*. 2022. Vol. 23, No. 4. P. 756-763. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.756-763> (WoS, Scopus).
5. Kukurudziak M. S. Problems of Masking and Anti-Reflective SiO₂ in Silicon Technology. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 2. P. 289-295. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-2-33> (WoS, Scopus).
6. Kukurudziak M. S. Isolation of Responsive Elements of Planar Multi-Element Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 3. P. 434-440. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-48> (WoS, Scopus).

7. Кукурудзяк М. С. Дослідження морфології макропористого Si, одержаного металом стимульованим щавленням за допомогою Au. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2023. Т. 21, №. 3. С. 605-616. <https://doi.org/10.15407/nnn.21.03.605> (Scopus).
8. Kukurudziak M. S., & Lipka V. M. Influence of silicon characteristics on the parameters of manufactured photonics cells. *East European Journal of Physics*. 2023. No. 4. P. 197-205. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-4-24> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Ліпка В. М.: обговорення результатів). (WoS, Scopus).
9. Kukurudziak M. S. The influence of the structure of guard rings on the dark currents of silicon p-i-n photodiodes. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2023. Vol. 24, No. 4. P. 603-609. <https://doi.org/10.15330/pcss.24.4.603-609> (WoS, Scopus).
10. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Study of the Charge Carrier Collection Coefficient of Silicon p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 1. P. 386-392. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-1-39> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, розрахунки, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В. : вимірювання спектрів пропускання легованих шарів, обговорення результатів) (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).
11. Kukurudziak M. S. Effect of Structural Defects on Parameters of Silicon Four-Quadrant p-i-n Photodiodes. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 2. P. 345-352. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-2-41> (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS)
12. Kukurudziak M. S., Lipka, V. M., & Ryukhtin, V. V. Silicon p-i-n

Mesa-Photodiode Technology. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 3 P. 385-389. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-3-47> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Ліпка В. М. та Рюхтін В. В.: обговорення результатів) (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).

13. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., & Koziarskyi I. P. Influence of Boron Diffusion on Photovoltaic Parameters of n+-p-p+ Silicone Structures and Based Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2024. No. 4. P. 289-296. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2024-4-31> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: вимірювання спектрів пропускання легованих шарів, обговорення результатів; Козярьський І. П.: вимірювання фотоелектричних параметрів). (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).

14. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Methods of Correction of Spectral Characteristics of Silicon Photodetectors. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 1. P. 290-294. <https://doi.org/290-294.10.26565/2312-4334-2025-1-34> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Рюхтін В. В.: обговорення результатів) (Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>; WoS).

Наукові праці у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

15. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Influence of chromium sublayer on silicon P-I-N photodiodes responsivity. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Fifteenth International Conference on Correlation Optics*. 2021, December. Vol. 12126. P. 511-518. <https://doi.org/10.1117/12.2616170>. ISSN: 0277-786X. (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті, доповідь; Майструк Е. В.: обговорення результатів, вимірювання спектрів пропускання зразків з різною товщиною хрому). (WoS, Scopus).

16. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. High-responsivity silicon p-i-n mesa-photodiode. *Semiconductor Science and Technology*. 2023. Vol. 38, No. 8. P. 085007. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/acdf14> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: обговорення результатів) (WoS; Scopus Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=27191&tip=sid&clean=0>).

17. Kukurudziak M. S. A method of increasing the interquadrant resistance of four-quadrant p-i-n photodiodes. *Journal of Instrumentation*. 2024. Vol. 19, No. 9, P. P09006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/19/09/P09006>. (WoS, Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=4900152808&tip=sid&clean=0>).

18. Kukurudziak M. S., Maistruk E. V., Yatskiv R., Koziarskyi I. P., & Koziarskyi D. P. Silicon p-i-n photodiode with reduced crystallographic defect density and structured surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025. Vol. 58, No. 16. P. 165106. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/adbd4d> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: вимірювання часу життя неосновних носіїв заряду, обговорення результатів; Яцків Р.: СЕМ; Козярьський І. П. та Козярьський Д. П.: вимірювання спектрів пропускання) (WoS, Scopus Q2 –

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

19. Кукурудзяк М. С. Вплив хімічної обробки на товщину просвітлюючого SiO₂ в кремнієвій технології. *Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка*: тези доповідей на VII Міжнародній науково-практичній конференції: 14-16 травня, 2022 р. Кременчук, 2022. С. 18-19. URL: https://drive.google.com/file/d/1l6LZMdaehKpjnbeE9BEoZapmBXCXq_QL/view

20. Кукурудзяк М. С. Дослідження спектральної характеристики чутливості р-і-п фотодіодів. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2022)*. Тези доповідей на VII Всеукраїнській науково-практичній конференції: 23-25 листопада 2022 р., м. Дніпро, 2022. С. 155-156. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2022.pdf>

21. Кукурудзяк М. С. Метод оцінки часу життя неосновних носіїв заряду кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем (MEICS-2023)*. Тези доповідей на VIII Всеукраїнській науково-практичній конференції: 22-24 листопада 2023 р., м. Дніпро, 2023. С. 191-192. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2023.pdf>

22. Кукурудзяк М. С. Залежність параметрів напівпровідникових приладів від їх розміщення на підкладці. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023. Харків : НТУ «ХПІ». С. 191-192. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/ea5b83c5-0561-47cb-a4d0-67aacd51c994>

23. Кукурудзяк М. С., Кукурудзяк А. М. Дефектоутворення на поверхні кремнієвих підкладок при термічному напиленні золота. *Сучасні*

інформаційні та електронні технології: *труди XXIV міжнародної науково-практичної конференції «СИЕТ-2023»*, 29-31 травня, 2023 р. Одеса, 2023. С. 101-102. URL: <https://old.tkea.com.ua/siet/archive/2023/01.pdf> (Особистий внесок автора: виготовлення та дослідження зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів; Кукурудзяк А. М.: обговорення результатів, написання тез).

24. Кукурудзяк М. С. Кремнієвий р-і-п фотодіод із зниженою кількістю поверхневих структурних дефектів. *Збірник тез конференції молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання – 2023» з міжнародною участю*, Київ, 4-5 квітня 2023 року. Україна. С. 51-52. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12751/1/22.pdf>

25. Kukurudziak M. S. Isolation of responsive elements of coordinate p-i-n photodiodes by p + -layer. *Proceedings of the 51th International School & Conference on the Physics of Semiconductors «Jaszowiec 2023»*: June 17–23, 2023. Szczyrk, Poland, 2023. P. 264. URL: <https://www.jaszowiec.edu.pl/2023/>

26. Кукурудзяк М. С. Утворення макропористого кремнію металостимульованим травленням за допомогою Cr. *9-та Українська наукова конференція з фізики напівпровідників: матеріали конференції*. – Ужгород: ТОВ "Рік-У", 2023. С. 324-325. URL: <https://drive.google.com/file/d/1M968vAoavH5bL16QUgsM5M9K7VmHaop3/view>

27. Кукурудзяк М. С. Фотодіод з абсорбційним кремнієвим фільтром. *IX Всеукраїнська науково-практична конференція «MEICS-2024»*: Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем, 27-29 листопада, 2024 р. Дніпро, 2024. С. 237-238. URL: <http://meics.dnure.dp.ua/files/MEICS-2024.pdf>

Наукові праці які додатково відображають наукові результати дисертації:

28. Kukurudziak M. S., Andreeva O. P., & Lipka V. M. High-resistivity p-type silicon-based p-i-n photodiode with high responsivity at the wavelength of 1060 nm. *Technology and Design in Electronic Equipment*. 2020. No 5-6. P. 16-19. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Андрєєва О. П.: хімічна обробка пластин; Ліпка В. М.: обговорення результатів).
29. Кукурудзяк М. С., & Добровольський Ю. Г. Кремнієвий р-і-п-фотодіод із підвищеною імпульсною чутливістю. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2021. № 1-2. С. 61-67. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.61> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Добровольський, Ю. Г.: обговорення результатів).
30. Кукурудзяк М. С. та Кукурудзяк А. М. Утворення дефектів на поверхні Si-підкладок в процесі термічного напилення золота. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*. 2023. № 3–4. С. 47–51. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2023.3-4.47> (Особистий внесок автора: виготовлення та дослідження зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Кукурудзяк А. М.: обговорення результатів).
31. Kukurudziak M. S., & Maistruk E. V. Features of diffusion doping and boron gettering of silicon p-i-n photodiodes. 2022 *IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022, October. P. 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916420> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Майструк Е. В.: обговорення результатів) (Scopus).

32. Kukurudziak M. S. Degradation of Silicon Resistivity During Thermal Operations in p-i-n Photodiodes Technology. 2023 *IEEE 13th International Conference on Electronics and Information Technologies (ELIT)*. 2023, September. P. 301-305. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ELIT61488.2023.10310993> (Scopus).
33. Kukurudziak M. S. Silicon p-i-n Photodiode with Reduced Background Radiation. 2023 *IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2023, October. P. 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312979> (Scopus).
34. Kukurudziak M. S. P-I-N Photodiode with Optical Concentrator for the Near-IR Region. *Proceedings - IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO*. 2024, May. P. 650-653. <https://doi.org/10.1109/ELNANO63394.2024.10756905> (WoS, Scopus).
35. Kukurudziak M. S., & Ryukhtin V. V. Low-voltage Silicon p-i-n Photodiode with Increased Collection Coefficient of Minority Charge Carriers and Responsivity. 2024 *IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2024, October. P. 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61434.2024.10878036> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, аналіз результатів, написання статті; Рюхтін В. В.: обговорення результатів). (Scopus).
36. Кукурудзяк М. С. Технологічні причини пробою р-п-переходу кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2022. Т. 27, № 3. С. 268299-1. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.me.268299>
37. Кукурудзяк М. Проблематика різання підкладок алмазованим диском в технології кремнієвих р-і-п фотодіодів. *Наукоємні технології*. 2022. Т. 54, № 2. С. 127-137. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.54.16750>
38. Kukurudziak M. Silicon four element p-i-n photodiode with improved characteristics. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 1. P. 92-100. <https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.07> (Scopus).

39. Кукурудзяк М. С. Проблеми хіміко-динамічного полірування в технології кремнієвих р-і-n фотодіодів. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2023. Т. 14, № 1. С. 42-52. <https://doi.org/10.15407/hftp14.01.042> (Scopus).

40. Кукурудзяк М. С. Аналіз спектральної характеристики чутливості дифузійних р-і-n фотодіодів на основі високоомного р-Si. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2023. Т. 28, № 1. С. 275010-1 – 275010-6. <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.275010>

41. Кукурудзяк М. С. Метод «очищення» поверхні фоточутливих елементів кремнієвих р-і-n фотодіодів від дислокацій. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2023. Т. 14, № 2. С. 182-190. <https://doi.org/10.15407/hftp14.02.182> (Scopus).

42. Kukurudziak M. Technology of Silicon p-i-n Photodiodes with a Reduced Number of Thermal Operations. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*. 2023. Vol. 1, No. 1. P. 01002-01002. <https://doi.org/10.31861/sisiot2023.1.01002>

43. Kukurudziak M. S., Koziarskyi I. P., Solodkyi M. S., Maistruk E. V., Kopach V. V., Semeniuk Y. O., Pavliuk M. M. Photodetectors for x- and γ -ray scintillators. *East European Journal of Physics*. 2025. No. 2. P. 281-286. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-2-34> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, розрахунки, аналіз результатів, написання статті; Козярьський І. П.: вимірювання фотоелектричних параметрів; Солодкий М. М., Майструк Е. В., Копач В. В., Семенюк Ю. О., Павлюк М. М.: обговорення результатів). (WoS, Scopus Q3 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>)

44. Kukurudziak M.S., Koziarskyi D.P., Koziarskyi I.P., Maistruk E.V., Ilashchuck M.I., Kysil D.V. Electrical, Optical, and Structural Properties of Silicon n⁺-p Structure. *East European Journal of Physics*. 2025. № 3. С 336-342. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-3-32> (Особистий внесок автора: виготовлення зразків, аналіз результатів, написання статті; Козярьський Д.

П.: вимірювання спектрів пропускання, розрахунки; Козярський І. П.: вимірювання електричних параметрів; Майструк Е. В.: обговорення результатів; Глащук М.І: вимірювання та розрахунки кінетичних властивостей; Кусіль Д. П.: вимірювання спектрів відбивання). (WoS, Scopus Q3 –

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101018929&tip=sid&clean=0>

Патенти на корисну модель:

45. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб виготовлення *p-i-n* фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149890 Україна: МПК (2021.01) H01L 31/00, № *u* 202100503; заявл. 08.02.2021; опубл. 15.02.2021, Бюл. №50. *(Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М., Рюхтін В.В. та Федінчук І.І.: аналіз та обговорення результатів).*

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=279707>

46. Кукурудзяк М.С., Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Федінчук І.І. Спосіб виготовлення *p-i-n* фотодіода з підвищеною чутливістю: Пат. 149108 Україна: МПК (2021.01) H01L 31/00, № *u* 202101103; заявл. 05.03.2021; опубл. 20.10.2021, Бюл. №42. *(Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М.: обговорення результатів, Шимановський О.Б.: розробка конструкції фотодіода).*

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=278625>

47. Кукурудзяк М.С., Шимановський О.Б., Ліпка В.М. Спосіб виготовлення кристала кремнієвого *p-i-n* фотодіода з мезаструктурою: Пат. 151696 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № *u* 202107811; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35. *(Особистий внесок автора: виготовлення зразків, вимірювання фотоелектричних параметрів, написання патенту,*

Ліпка В.М. та Шимановський О.Б.: обговорення результатів та конструкції кристалу).

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282779>

48. Ліпка В.М., Рюхтін В.В., Перепелиця О.О., Сидор О.М., Кукурудзяк М.С. Кремнієвий *p-i-n* фотодіод із відрізаючим оптичним фільтром: Пат. 151697 Україна: МПК (2022.01) H01L 31/00, № u 202107818; заявл. 30.12.2021; опубл. 31.08.2022, Бюл. №35. (*Особистий внесок автора: вимірювання оптичних та фотоелектричних параметрів, написання патенту, Ліпка В.М. та Рюхтін В.В.: обговорення результатів, Перепелиця О.О. та Сидор О.М.: виготовлення зразків*).

<https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=282775>

Додаток 3. Відомості про апробацію матеріалів дисертації

Основні результати досліджень, викладених у дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на семінарах кафедри електроніки і енергетики, а також професійної та технологічної освіти і загальної фізики Навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а також на таких всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях :

1. The 15th International Conference on Correlation Optics, «Correlation Optics'17», 13 - 16 September 2021, Chernivtsi, Ukraine (SPIE); (заочна участь)
2. The 3rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 3-7 October 2022, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
3. The 4rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 2-6 October 2023, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
4. The 5rd KhPI Week on Advanced Technology, «KhPIWeek», 7-11 October 2024, Kharkiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
5. The 13th International Conference on Electronics and Information Technologies «ELIT», 26-28 September 2023, Lviv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
6. The 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology «ELNANO», 13-16 May 2024, Kyiv, Ukraine (IEEE); (онлайн доповідь)
7. Конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкарьовські читання 2023», 29– 31 травня 2021 р., Київ, Україна; (заочна участь)
8. VII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2022), 23– 25 листопада 2022 р, Дніпро, Україна; (заочна участь)
9. VII Міжнародна науково-практичній конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»

(НМІТФ), 14-16 травня 2022 р., Кременчук, Україна; *(заочна участь)*

10. VIII Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2023), 22– 24 листопада 2023 р, Дніпро, Україна; *(заочна участь)*

11. IX Всеукраїнська науково-практична конференція "Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних і комп'ютерних систем" (MEICS-2024), 27– 29 листопада 2024 р, Дніпро, Україна; *(заочна участь)*

12. The 51th Jaszowiec International School and Conference on the Physics of Semiconductors «Jaszowiec 2023», 17 – 23 June 2023, Szczyrk, Poland; *(онлайн доповідь)*

13. IX Українська наукова конференція з фізики напівпровідників «УНКФН–9», 22-26 травня 2023р. Ужгород, Україна; *(заочна участь)*

14. XXIV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та електронні технології» (CIET-2023), 29-31 травня 2023р. Одеса, Україна; *(заочна участь)*

15. XXXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2023), 17-20 травня 2023р. Харків, Україна. *(онлайн доповідь)*

Додаток 4. Впровадження результатів дисертаційної роботи

Акціонерне товариство
«Центральне конструкторське бюро
Ритм»

вул. Головна, 244, м. Чернівці, 58032, Україна
Тел.: (0372) 58-26-13, тел./факс: (0372) 53-26-33
e-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

Код ЄДРПОУ 14261388



Rhythm Optoelectronics
Shareholding
Company

244 Holovna Street, Chernivtsi 58032, Ukraine
Tel.: +380(372) 58-26-13, tel./fax: +380(372) 53-26-33
e-mail: rhythm@chv.ukrpack.net
Identification Code 14261388

Вих. № _____ "____" _____ 2025 р.

На № _____ "____" _____ 2025 р.

ПОГОДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

ЧНУ імені Юрія Федьковича

д. х. н., доцент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор – Головний конструктор

Акціонерного товариства

«Центральне конструкторське бюро

Ритм»


Юрій ХАЛАВКА
«03» червня 2025 р.



Володимир ЛІПКА
«03» червня 2025 р.


А К Т

впровадження результатів дисертаційної роботи

у виробництво

Даним актом стверджується, що результати дисертаційної роботи на тему «Фотоелектричні явища в кремнієвих планарних n^+p-p^+ - структурах та фізико-технічні аспекти виготовлення фотодіодів на їх основі», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія, виконаної Кукурудзяком Миколою Степановичем, впроваджені в Акціонерному товаристві «Центральне конструкторське бюро Ритм».

Впроваджувані результати являють собою кремнієвий $p-i-n$ фотодіод із відрізаючим оптичним фільтром (Патент на корисну модель № 151697). Прийнята до впровадження конструкція фотодіода дозволяє суттєво знизити вплив фонового короткохвильового випромінювання на корисний сигнал фотоприймача.

Економічний ефект впровадження полягає в збільшенні кількості реалізації продукції на 20% в 2024 році.

Завідувач науково-організаційного
відділу Науково-дослідної частини
ЧНУ ім. Ю. Федьковича к.ф.-м.н.

Руслан ЗАПЛІТНИЙ
«03» серпня 2025р.

Науковий керівник д.ф.-м. н., проф.
ЧНУ ім. Ю. Федьковича

Едуард МАЙСТРУК
«02» серпня 2025р.

Заступник директора
з наукової роботи ЦКБ Ритм

к.т.н.
Вячеслав РЮХТІН
«30» травня 2025р.

Начальник ІВК-1

ЦКБ Ритм
Руслан ГУДЗЬ
«30» травня 2025р.

Здобувач

Микола КУКУРУДЗЯК
«30» травня 2025р.