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 досконаліть 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), Hummamatsu (Японія) та ін. Кращі зразки кремнієвих *p*-*i*-*n* ФД, призначені для детектування ближнього ІЧ-випромінювання, володіють максимумом спектральної характеристики близько λ=1000 нм та монохроматичною струмовою чутливістю близько $S_{I\lambda}$≈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-SiO_2, що провокує зниження пору ізоляції чутливих елементів багатоелементних 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≈2,7-3 Ом/□, та R_S≈18

Ом/□ відповідно. Отримано ФД із темновими струмами I_m=28-36 нА та імпульсною чутливістю $S_{імп.}$=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 тилову 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 чотириквадрантних ФД шляхом розриву поверхневих інверсійних провідних каналів на межі розділу Si-SiO_2. 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 багатоелементиних 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 $Si\text{-}SiO_2$ 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 окислення. Метод дозволяє

ліквідувати структурні дефекти утворені під час окиснення, які є центрами генерації дислокацій під час дифузійних операцій. ХДП з використанням маскування за допомогою SiO_2 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-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 $S_{імп.} \approx 0{,}48\text{-}0{,}5$ А/Вт при $U_{зм}$=-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 λ=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 $N_{дис.}$≈4-6·10^6 $см^{-2}$ до $N_{дис.}$≈0,5-2·10^2 $см^{-2}$. Проведення ХДП з використанням маскування за допомогою SiO_2 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 λ≤850 нм на корисний сигнал ФД. Розроблено конструкцію світлофільтра, який забезпечує коефіцієнт пропускання випромінювання робочої довжини хвилі T≥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 ($S_{імп.}$=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-SiO_2 шляхом травлення тонкої оксидної плівки чи поверхневого шару кремнію, або утворення областей обмеження каналів витоку ізотипних із метеріалом 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-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-p^+-structures, as well as the improvement and manufacture of highly sensitive photodetectors - *p*-*i*-*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-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*-*i*-*n* PDs on the market is also provided.

The analysis of the properties of n^+-*p*-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*-*i*-*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*-*i*-*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 λ=1000 nm and a monochromatic current sensitivity of about $S_{I\lambda}$≈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-SiO_2 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 $R_S \approx 2.7\text{-}3$ Ω/□ and $R_S \approx 18\text{-}20$ Ω/□, 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-SiO_2 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-SiO_2 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 SiO_2 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-p^+-structures. The results of the dissertation were implemented in the Rhythm Optoelectronics Sareholding Companyin 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 $S_{pulse} \approx 0.48\text{-}0.5$ 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 $N_{dis} \approx 4\text{-}6 \cdot 10^6$

cm^{-2} to $N_{dis} \approx 0.5\text{-}2 \cdot 10^2$ 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 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-SiO_2 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 ≥20 MΩ (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 (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(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 SiO_2 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; Козярський 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; Козярський І. П. та Козярський 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 SiO_2 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 p-i-n 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 p-i-n 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 «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 p-i-n 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 p–i–n-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 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

37. Кукурудзяк М. Проблематика різання підкладок алмазованим диском в технології кремнієвих p-i-n 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 p-i-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 p-i-n фотодіодів на основі високоомного p-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 p-i-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; Козярський 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; Козярський Д. П.: вимірювання спектрів пропускання, розрахунки; Козярський І. П.: вимірювання електричних параметрів; Майструк Е. В.: обговорення результатів; Ілащук М.І: вимірювання та розрахунки кінетичних властиовстей; 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