

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ ЮРІЙ

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

<https://orcid.org/0000-0002-1248-3615>e-mail: y.dobrovolsky@chnu.edu.ua**ЛІПКА ВОЛОДИМИР**

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

Акціонерне товариство «Центральне конструкторське бюро «Ритм»

<https://orcid.org/0000-0002-5899-6213>e-mail: lipka.volodymyr@chnu.edu.ua**КРЕМНІЄВИЙ ФОТОДІОД ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ (FSO) З ПІДВИЩЕНОЮ ШВИДКОДІЄЮ ТА ЧУТЛИВІСТЮ НА ДОВЖИНІ ХВИЛІ 980 НМ**

В роботі наведено результати створення кремнієвого фотодіоду для телекомунікації, зокрема для Free Space Optics (FSO). Існуючі фотодіоди не у повній мірі відповідають вимогам при роботі на довжині хвилі 980 нм (довжина хвилі vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL)). Оптимізація конструкції фотодіоду здійснюється з урахуванням рівномірної генерації фотоструму при рівномірній густині об'ємного заряду усередині кристала при прийомі випромінювання з робочою довжиною хвилі. Проведено порівняльні дослідження партії створених фотодіодів та серійних фотодіодів ФД-255А, які показали, що запропонований фотодіод має струмову монохроматичну чутливість на довжині хвилі 980 нм не менше 0,55 А/Вт. При цьому його час наростання зменшено з 50 нс до 20 нс. порівняно з серійним фотодіодом ФД-255А. Отримані результати показують, що подальші дослідження мають проводитись у напрямку покращення технологічних процесів виготовлення фотодіоду.

Ключові слова: фотодіод; телекомунікація, FSO; кремній; 980 нм; область просторового заряду; чутливість, час наростання.

DOBROVOLSKY YURIY

Chernivtsi National University name Yuriy Fedkovych

LIPKA VOLODYMYR

Chernivtsi National University name Yuriy Fedkovych

Joint-stock company "Central design bureau "Rythm"

SILICON PHOTODIODE FOR TELECOMMUNICATIONS (FSO) WITH INCREASED SPEED AND SENSITIVITY AT 980 nm

One of the basic elements of Free Space Optics is a photodiode, which must have a high level of sensitivity to radiation in the range of 0.8-1 μm , and be fast-acting. In our case, the chosen wavelength is 980 nm, which corresponds to the wavelength of a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL). The optimization of the photodiode design is carried out taking into account the uniform generation of the photocurrent with a uniform volume charge density inside the crystal when receiving radiation with a working wavelength. The current of the photo signal in the external circuit, in this case, depends on the modulation frequency, the width of the space charge region (SCR), the mobility of minor charge carriers and the amount of bias at the p-n junction. This allows you to significantly manipulate the rise time of the transient characteristic of the photodiode, and the use of double passage of the radiation beam throughout the SCR, you can obtain a significant increase in sensitivity.

The subject is the construction of a photodiode, which at a wavelength of 980 nm has small values of the rise time and high values of current monochromatic sensitivity.

The goal is to substantiate and create a design of a photodiode with increased current monochromatic sensitivity and reduced rise time at 980 nm wavelengths for operation in FSO.

Task: To analyze the factors affecting the sensitivity and rise time of the photodiode when working at a wavelength of 980 nm, as well as to develop the design of the photodiode and investigate it.

Methods: mathematical analysis of photoelectric parameters of a photodiode taking into account the mechanism of generation of minor charge carriers.

Modeling of the photodiode design. A planar technology for silicon was used to manufacture the photodiode. The technical solution is based on the optimization of the modulation frequency, the width of the SCR, the mobility of minor charge carriers and the amount of displacement at the p-n junction, as well as ensuring the double passage of radiation through the photodiode crystal. The result was also achieved by etching the mesastructure from the reverse side of the photodiode, the area of which is the projection of the photosensitive element of the photodiode, and the width of the silicon plate above the mesastructure should be about 50 μm .

Results: Factors affecting the current monochromatic sensitivity of the photodiode and its rise time were determined and taken into account. A new photodiode design with increased sensitivity and reduced rise time has been created. Comparative studies of the manufactured batch of created photodiodes and FD-255A photodiodes were conducted, which showed that the proposed photodiode really has a current monochromatic sensitivity at a wavelength of 980 nm of at least 0.55 A/W. At the same time, its rise time was reduced from 50 ns to 20 ns. compared to the serial photodiode FD-255A.

Keywords: photodiode; telecommunications, FSO; silicon; 980 nm; space charge area; sensitivity, rise time.

Постановка проблеми

Оптичні канали зв'язку сьогодні є безперечними лідерами у порівнянні із дротовою вітою парою та радіоканалом (Bluetooth, Wi-Fi) у сфері телекомунікації. Але і серед різновидів оптичних каналів є технологія FSO – Free Space Optics – вільний оптичний простір [1]. За її допомогою забезпечується бездротовий високошвидкісний канал зв'язку на відстані до 8 км. При цьому швидкість передачі даних досягає при цьому до 10 Гбіт/с [2]. Ця технологія використовується на заміну кабельним каналам, коли їх прокладка є високо коштовною і трудомісткою. Вимога існує лише одна – приймач та передавач оптичного сигналу мають

знаходиться у межах прямої видимості. Ще одна перевага FSO – діапазон довжин хвиль, який вона використовує, не регламентується законодавчо і не потребує ліцензування. Тому її розгортання здійснюється набагато швидше, ніж розгортання систем, що використовують радіочастоти. Також важливо, що FSO може забезпечувати практично усі існуючі протоколи та стандарти зв'язку (IP, SDH, PDH G.703/E1 ... E4, Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, STM-1, STM-4).

Розробники технології FSO віддають перевагу поверхнево-випромінюючими лазерами з вертикальним резонатором (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) [3]. VCSEL забезпечують швидкість передачі даних до 10 Гб/с [4].

Найбільш поширені VCSEL випромінюють в діапазоні спектру оптичного випромінювання 750-980 нм, який відповідає спектральному діапазону чутливості кремнієвих р-і-n фотодіодів, оскільки в них максимум спектральної чутливості припадає саме на згаданий діапазон довжин хвиль. Отже, оскільки фотодіод є однією з основних складових систем FSO разом із VCSEL, він повинні мати високий рівень чутливості до випромінювання у діапазоні 0,8 – 1 мкм, а саме до 980 нм, та бути швидкодіючими [5].

Відомо, що найбільш швидкодіючими та чутливими є лавинні фотодіоди. Їхня робота супроводжується високою напругою зміщення у сотні вольт. Але вони є недостатньо стабільні в часі.

Досить швидкодіючими є р-і-n фотодіоди. Працюючи у режимі повного збіднення вони мають невеликі темнові струми, високу чутливість та швидкодію. Такі фотодіоди можуть бути реалізовані на основі різних напівпровідникових матеріалів. Але, незважаючи на наявність великої кількості матеріалів, що перекривають близький інфрачервоний діапазон, саме технологія кремнієвих фотодіодів є найбільш економічною, має високий рівень відтворності, на відміну від, наприклад, технології германію, а самі фотодіоди не потребують складних систем охолодження, як, наприклад прилади на основі InSb та сполук CdHgTe.

Основні, загальні принципи конструювання цих фотодіодів були розроблені ще у 70-х роках минулого століття. Але сьогодні тема розробки надійних кремнієвих р-і-n фотодіодів все ще залишається актуальною внаслідок унікальних властивостей кремнію. Особливість р-і-n фотодіода полягає у тому, що він має область власної провідності (*i*- область, від того і назва р-і-n фотодіод), яка утворюється внаслідок розширення області просторового заряду (ОПЗ) від р-n переходу (базис) в об'єм кремнію. Просторовий заряд утворюється внаслідок електричного зміщення на р-n переході. Збільшуючи величину зміщення на р-n переході можливо розширити області спектральної чутливості звичайного р-n фотодіода.

Вперше про теоретичну можливість розширення спектральної характеристики на кремнії в інфрачервоній області за 1 мкм повідомлялось у [6]. Для цього пропонувалось використання р-і-n структур на кремнії з питомим опором на рівні 2000 Ом·см. Зміна напруги на р-і-n фотодіоді та оптимізація товщини кристала фотодіода, веде до зсуву спектральної характеристики у близьку інфрачервону область спектра. Таким чином досягається збільшення чутливості кремнієвого фотодіода на довжині хвилі близько 1 мкм.

Оптимальною є конструкція, в якій товщина кристала фотодіода дорівнює глибині поглинання випромінювання, що приймається [5]. Збіднена область р-і-n фотодіодів, оптимізованих для реєстрації довжин хвиль біля 1 мкм, звичайно розтягнута на весь об'єм кристалу фотодіода таким чином, що нейтральна область практично відсутня і нею можна нехтувати. Але, крім згаданих загально відомих чинників, що впливають на величину чутливості та швидкодію фотодіоду, існує ще декілька, пов'язаних з особливістю технологічних процесів, за допомогою яких виготовляються сучасні кристали р-і-n фотодіодів. А саме, створення областей рекомбінації фотогенерованих носіїв заряду на:

- поверхні розподілу кремнію – оксид кремнію, та в області виходу р-n переходу на поверхню кристала;
- торцевій поверхні кристала;
- зворотному боці кристала.

Іншими словами, вся зовнішня поверхня кристала р-і-n фотодіода може бути джерелом областей рекомбінації зарядів та джерелом додаткових шумів.

Аналіз останніх джерел

Шляхів, які дозволяють збільшувати чутливість р-і-n фотодіоду, є декілька. Про відповідність товщини області просторового заряду та глибини поглинання робочої довжини хвилі, товщині кристалу фотодіоду мова йшла вище [5, 7]. Також, враховуючи негативний вплив області рекомбінації заряду на поверхнях кристалу фотодіоду та у його об'ємі, варто зменшувати такі області як конструктивно, так і технологічно [8]. При цьому забезпечується лінійний відгук при яскравому світлі. Власне це завдання вирішує створення р-n переходу за допомогою іонної імплантації з дозою імплантації 10^{14} іонів/см² та дією фемтосекундного імпульсного лазера [9], або мілісекундним імпульсним лазером з довжиною хвилі 1064 нм. [10]. Нажаль, іонна імплантація, як і лазерне гетерування вимагають здійснювати подальший тривалий відпал отриманої фотодіодної структури при високих температурах. Що стає причиною збільшення зворотних струмів.

Конструктивні зміни також здатні покращити чутливість фотодіоду. Наприклад у [11] запропоновано використання двошарового просвітлюючого покриття, що складається з плівок SiO₂ і Si₃N₄ товщиною 40 нм та 88 нм відповідно, що дозволило отримати імпульсну чутливість (S_{imp}) 0,44 А/Вт на довжині хвилі 1,064 мкм. Однак, слід врахувати, що плівки такої товщини (40 нм) є нестійкі у часі, особливо, при дії потужних лазерних імпульсів.

Кращому оптичному поглинанню, а від так і збільшенню чутливості, сприяє вбудова між металічним контактом (Cu) та напівпровідником (р-Si) тонкої плівки Ce-WO₃, що забезпечило чутливість 20,61 мА/Вт у діапазоні до 400 нм [12]. Однак, така чутливість на довжині хвилі 0,4 мкм не є рекордна.

Завдяки оптимізації технології вдається досягти рівня імпульсної струмової монохроматичної чутливості на довжині хвилі 1064 нм 0,41-0,44 А/Вт, що близько дог теоретичної межі [13]. У [14] описана конструкція фотодетектора на основі Au/Si/Ag з асиметричними переходами Шоттки у поєднанні з асиметричними геометричними контактами. Вона демонструє високу чутливість 424,3 мА/Вт на довжині хвилі 980 нм з напругою зміщення 0 В. А у [15] зменшено втрати через відбиття та рекомбінацію з'єднанням завдяки поєднанню наноструктурованої поверхні з оптимізованим імплантованим з'єднанням. Досягнуто значного покращення чутливості (0,15–0,30 А/Вт) на довжинах хвиль від 200 до 1000 нм. Час наростання виявляється на подібному рівні.

За останнє десятиліття було досягнуто значного прогресу у створенні надшвидкодійних р-і-п фотодіодів, які мають наднизький наростаючий фронт фотовідгуку (час наростання перехідної характеристики) і з точки зору погодження точності [16].

Отже бачимо, що існує багато сучасних технологій для підвищення чутливості та швидкодії фотодіодів, призначених для роботи у ближній інфрачервоній області спектру оптичного випромінювання. Але в нашому випадку слід створити конструкції фотодіода, яка би відповідала меті дослідження - підвищеною струмовою монохроматичною чутливістю та зменшеним часом наростання на довжині хвилі 980 нм для роботи у телекомунікації, зокрема FSO.

Кращим рішенням, на нашу думку, є оптимізація конструкції фотодіода з врахуванням особливостей його роботи, як це зроблено нами раніше при створенні фотодіодів для роботи на довжині хвилі 1,06 мкм [17] та на довжині хвилі 0,254 мкм [18].

Щодо швидкодії р-і-п фотодіода, то вона визначається або високим значенням граничної частоти або мінімальним значенням часу наростання перехідної характеристики [1].

Розглянемо час наростання перехідної характеристики фотодіода. Її визначають як час, необхідний вихідному сигналу, щоб зрости від рівня 0,1 до 0,9 від усталеного максимального значення за умови, що на вхід подаються прямокутні імпульси світла великої тривалості. Цей час залежить від геометрії фотодіода, матеріалу, напруженості електричного поля в слабологованій області, температури. Зі збільшенням частоти модуляції вхідних оптичних імпульсів максимальне значення фотоструму зменшується.

Покращення швидкодії фотодіода згідно з нашими дослідженнями [17, 19], базується в тому числі на факторах, які пов'язані з механізмом генерації неосновних носіїв заряду у певному фотодіоді за певних зовнішніх умов.

Мета дослідження

Аналіз відомих літературних джерел показує, що існують загальні технічні рішення, щодо підвищення чутливості р-і-п фотодіодів та зменшення їх часу наростання. Вони є трансформовані для розв'язання зазначеної задачі для певних довжин хвиль ближній інфрачервоній області спектра. Але вони не враховують фактори, пов'язані з особливостями генерації фотоструму, які, в залежності від глибини поглинання оптичного випромінювання, частоти його модуляції, величини зміщення на р-п переході та рухливості неосновних носіїв заряду можуть суттєво впливати на величину фотосигналу. Також слід відмітити, що у літератури немає аналізу факторів, що впливають на чутливість та час наростання фотодіода, який працює на довжині хвилі 980 нм для роботи у FSO. У зв'язку з цим метою дослідження є обґрунтування та створення конструкції фотодіода, з підвищеним значенням струмової монохроматичної чутливості та зменшеним часом наростання на довжині хвилі 980 нм для роботи у FSO з врахуванням вище зазначених факторів.

Для досягнення поставленої мети дослідження потрібно розв'язати ряд завдань, а саме:

1. Теоретичне обґрунтування конструкції фотодіода з точки зору оптимізації його часу наростання при прийомі модульованого оптичного випромінювання з довжиною хвилі 980 нм.
2. Теоретичне обґрунтування конструкції фотодіода з точки зору оптимізації його струмової монохроматичної чутливості при прийомі модульованого оптичного випромінювання з довжиною хвилі 980 нм.
3. На основі виконання перших двох завдань розробити конструкцію фотодіода з малим часом наростання та високими значеннями струмової монохроматичної чутливості при прийомі модульованого оптичного випромінювання з довжиною хвилі 980 нм, у порівнянні із існуючим аналогом.
4. Провести дослідження фотоелектричних параметрів розробленої конструкції фотодіода у порівнянні із аналогом. А саме – абсолютної спектральної характеристики чутливості та часу наростання.
5. Провести аналіз отриманих результатів.

Виклад основного матеріалу

У якості моделі розглянемо випадок роботи р-і-п фотодіода на основі кремнію р-типу провідності, який має питомий опір близько 10 кОм·см, забезпечує рівномірну генерацію фотоструму при рівномірній густині об'ємного заряду усередині кристала при прийманні оптичного випромінювання ближньої інфрачервоної області спектру (у нашому випадку довжина хвилі 980 нм) і має рівномірно леговану базу, яка при напрузі зміщення забезпечує ширину області просторового заряду (ОПЗ), рівну товщині кристала.

Теоретичне обґрунтування конструкції фотодіода з точки зору оптимізації його часу наростання при прийомі модульованого оптичного випромінювання з довжиною хвилі 980 нм.

Розглянемо питання оптимізації часу наростання р-і-п фотодіода, який має працювати з модульованим оптичним випромінюванням з довжиною хвилі 980 нм з врахуванням особливостей генерації фотоструму, описаних вище.

Швидкодія фотодіоду є похідною від його частотної характеристики і залежить від багатьох факторів. Основним з них є механізм генерації неосновних носіїв заряду при роботі зі зміщенням. Тобто - у фотодіодному режимі. У [21-22] показана методика оцінки частотних характеристик фотодіода, яка доводить, що коли частотні характеристики визначаються тільки часом прольоту носіїв заряду через ОПЗ, при модульованому потоці оптичного випромінювання, збільшення струму I в зовнішньому колі (струму, зумовленому оптичним випромінюванням) можна оцінити згідно (1):

$$d_x d_x' I = \frac{E_x(x)}{\int_0^{x_0} E_x(x) dx} \cdot \sin \omega \left(t - \int_{x'}^x \frac{d\bar{x}''}{\bar{E}_x''(x)\bar{\mu}} \right) \cdot \frac{\partial I_0}{\partial x'} \cdot dx' \cdot dx, \quad (1)$$

де: $\bar{E}_x(x)$ - вектор напруженості електричного поля в точці з координатою x ;

$\bar{\mu}_x$ - усереднена рухливість цих носіїв заряду в точці з координатою x ;

I_0 - ефективна (внутрішня) амплітуда змінної складовою фотоструму, що генерується;

dx', dx - товщина двох елементарних шарів у вигляді плоских областей, паралельних межах ОПЗ усередині неї і проходять, відповідно, в околицях точок з координатами x' і x ;

Вираз (1) означає, що струм в зовнішньому колі визначається двома функціями, залежними від координат:

- напруженості електричного поля;
- густини генерації струму фотосигналу,

а величина цього струму I_0 залежить від конкретного виду цих функцій:

$$I_0 = \int_v \frac{\bar{e}_0 \cdot \gamma(v)}{\eta v} \cdot \frac{\partial \Phi_0}{\partial v} \cdot \delta v \quad (2)$$

де \bar{e}_0 - заряд одного носія заряду даного типу з своїм знаком;

$\gamma(v)$ - квантовий вихід на заданій довжині хвилі;

$h v$ - енергія одного поглиненого кванта;

Φ_0 - амплітуда змінної складової поглиненого потоку оптичного випромінювання;

v - швидкість дрейфу заряду.

Залежність вихідного струму фотосигналу в зовнішньому колі від частоти модуляції (ω), конструктивних параметрів, а саме від товщини ОПЗ (x_0) та рухливості неосновних носіїв заряду (μ), режиму експлуатації (зміщенням на p-n переході V_0) і величини генерованого струму (I_0), визначають як:

$$I = \frac{I_0 \cdot V_0 \mu}{\omega x_0^2} \cdot \sin \frac{\omega x_0^2}{2V_0 \mu} \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x_0^2}{2V_0 \mu} \right), \quad (3)$$

де t - час прольоту носіїв заряду через ОПЗ.

В нашому випадку маємо рівномірну генерацію фотоструму при рівномірній густині об'ємного заряду усередині кристала. Така ситуація виникає при прийманні порівняно короткохвильового випромінювання фотодіодом з рівномірно легованою базою при напрузі зміщення, що забезпечує ширину області об'ємного заряду, рівну в точності товщині кристала при даному ступені його легування. В цьому випадку гранична частота для фотодіоду, виготовленого з кремнію p-типу провідності визначається як [22]:

$$f_{cp}^{(p)} = \frac{\omega_{cp1}}{2\pi} = 2,577 \frac{2V_0 \mu_p}{2\pi x_0^2}, \quad (4)$$

Відомо, що гранична частота f_{gr} та час наростання τ згідно зв'язані між собою як $2\pi f_{gr} \tau = 1$. Відповідно $\tau = 1/2\pi f_{gr}$. З урахуванням (4) час наростання τ у випадку що розглядається, буде визначатись виразом (5):

$$\tau = 0,194 \frac{x_0^2}{V_0 \mu_p}, \quad (5)$$

Вираз (5) показує, що час наростання фотодіоду, який працює в умовах рівномірної генерації фотоструму при рівномірній густині об'ємного заряду усередині кристала буде визначатись товщиною ОПЗ (x_0), режимом експлуатації, а саме зміщенням на p-n переході V_0 та рухливістю неосновних носіїв заряду (μ_p), в нашому випадку – дірками і розрахованим коефіцієнтом 0,194.

З вище наведених міркувань видно, що величиною часу наростання перехідної характеристики фотодіода можна суттєво маніпулювати, у тому числі і в бік зменшення.

Теоретичне обґрунтування конструкції фотодіода з точки зору оптимізації його струмової монохроматичної чутливості при прийомі модульованого оптичного випромінювання з довжиною хвилі 980 нм.

Розглянемо питання оптимізації струмової монохроматичної чутливості фотодіоду, який працює з модульованим оптичним випромінюванням з довжиною хвилі 980 нм.

Чутливість фотодіоду в нашому випадку буде визначатись величиною фотоструму, який, згідно [17, 21] залежить від частоти модуляції (ω), повного часу прольоту носіїв обох знаків крізь ОПЗ, або час наростання τ і величини генераційного струму (I_0), визначуваного, в основному, потужністю і довжиною хвилі випромінювання, що поглинається.

Частота модуляції має бути незмінна і враховується як константа. Час наростання τ розглянутий вище. На потужність випромінювання фотодіод не впливає, але з її зростанням фотострум збільшується. При цьому чутливість не змінюється. Довжиною хвилі випромінювання, що поглинається, а саме глибиною, на якій вона поглинається (α^{-1}), наприклад у кремнії, може бути визначена товщина кристалу фотодіоду.

Ця глибина визначається через коефіцієнт поглинання α як [23]:

$$\alpha = 4k\pi/\lambda, \quad (6)$$

де k - коефіцієнт гасіння оптичного випромінювання;

λ – довжина хвилі випромінювання.

Інтенсивність випромінювання, що поглинає кремній, зменшується згідно [23] за виразом:

$$E = E_0 e^{-\alpha x}, \quad (7)$$

де E_0 – інтенсивність випромінювання, що падає на поверхню;

x – глибина проникнення випромінювання у кремній.

Оптичне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 980$ нм, як відомо [23], поглинається у кремнії (втрачає падаючу інтенсивність випромінювання у e -раз) на глибині біля 100 мкм.

Як що забезпечити умови подвійного проходження променя випромінювання скрізь ОПЗ, то можна отримати суттєве збільшення чутливості. Пропорційно залишкової інтенсивності випромінювання, яка залишається після її поглинання при проходженні променя від поверхні до тильної сторони кристалу фотодіоду, як це показано на рисунку 1. Для реалізації згаданого ефекту для підвищення струмової монохроматичної чутливості слід забезпечити товщину кристала в цій області (області фоточутливого елемента) у два рази меншу, ніж глибина поглинання α^{-1} . Це, відповідно, близько 50 мкм.

Попередній аналіз показує, що запропонований підхід дозволить збільшити чутливість фотодіоду саме на величину, пропорційну інтенсивності оптичного випромінювання, відбитого від зворотного боку кристалу фотодіоду. Теоретично, можливо досягти збільшення чутливості в 1,4 рази (e -раз). При цьому товщина кристалу зменшиться в області ФЧЕ у два рази, що позитивно вплине на ємність фотодіоду (вона, за таких умов має, зменшитись). А також, посприє зменшенню генераційної складової темного струму, яка, як відомо, залежить між іншими факторами, від товщини ОПЗ.

Результати і обговорення

Конструкція фотодіоду. На основі проведеного дослідження запропонований р-і-п фотодіод на основі високоомного кремнію (питомий опір не менше 20 КОм) р- типу провідності. Саме на такому кремнії реалізуються серійні швидкодіючі р-і-п фотодіоди, які працюють при зміщенні на р-п переході у 100 і вище Вольт. Перелік таких фотодіодів досить широкий. Це QP154-Q компанії First Sensor (Німеччина) [24], FD 342M [27], YAG-555-4 [25]. Усі перелічені фотодіоди можуть працювати на довжині хвилі 980 нм. Найближчим аналогом створюваного фотодіоду обраний FD-255A [26], виробництва Rhythm Optoelectronics Shareholding Company (Україна), який має паспортну струмову монохроматичну чутливість 0,4 А/В та час наростання напрузі зміщення 250 В 50 нс.

Враховуючи (5), очікуване значення часу наростання запропонованого фотодіоду можна оцінити, виходячи з таких факторів. Товщина ОПЗ x_0 становитиме 50 мкм, зміщення на фотодіоді, може бути до 100 В, а рухливість неосновних носіїв заряду для кремнію згаданого типу є константою. За таких умов час наростання перехідної характеристики фотодіода має дорівнювати $\tau \approx 5/\mu_p$. У звичайних р-і-п фотодіод на основі високоомного кремнію р- типу провідності товщина ОПЗ визначається в основному глибиною поглинання робочої довжини хвилі і дифузійною довжиною неосновних носіїв заряду [27]. Тобто приблизно 100 мкм для довжини хвилі 980 нм. За таких умов час наростання перехідної характеристики звичайного фотодіода має дорівнювати $\tau \approx 20/\mu_p$. Це означає, що запропонований фотодіод повинен мати час наростання перехідної характеристики приблизно у чотири рази менше, ніж у аналогічних фотодіодів відомих конструкцій.

Враховуючи вищезазначене, запропонована конструкція фотодіода, яка для забезпечення необхідної механічної міцності в об'ємі кристала завтовшки 300 мкм, передбачає зі зворотного боку витравлення мезаструктури. Площа перетину мезаструктури повинна бути проекцією фоточутливого елемента фотодіода. При цьому товщина кремнієвої пластини над мезаструктурою має бути близько 50 мкм.

Решта елементів конструкції запропонованого фотодіоду загалом подібна до відомих фотодіодів, але співвідношення розмірів відповідних областей і ділянок розроблено у відповідності до запропонованої конструкції.

На рисунку 1 показано зовнішній вигляд запропонованого фотодіода. На рисунку 2 – схематичне зображення перетину кристала фотодіода.



Рис. 1. Зовнішній вигляд запропонованого фотодіода

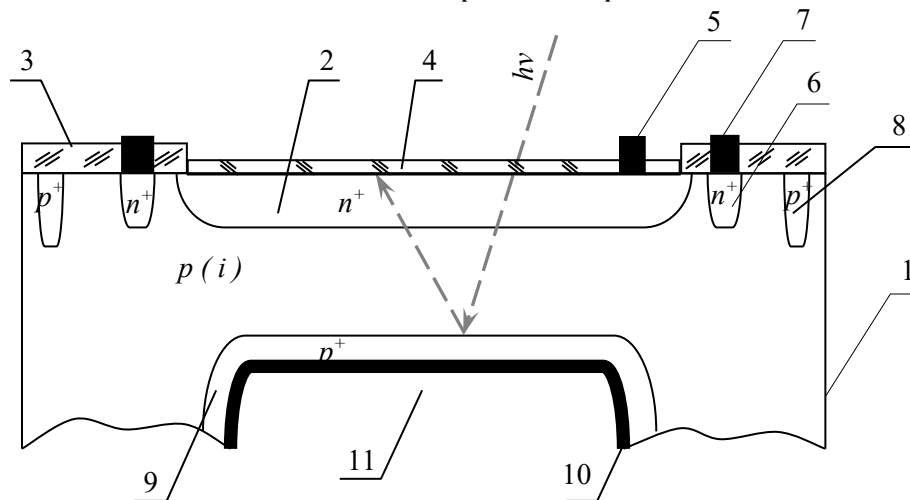


Рис. 2. Схематичне зображення конструкції кристала р-і-п фотодіода і хід проміння ($h\nu$) падаючого потоку оптичного випромінювання ($\lambda=980$ нм) у його об'ємі

Отже, фотодіод складається (рисунок 2) з кремнієвої підкладки (1) р-типу провідності з питомим опором не менше 20 кОм і товщиною 300 мкм. У об'ємі підкладки створено область n^+ - типу провідності (2), яка разом з областю р- типу підкладки формує р-п перехід. Область n^+ - типу провідності (2) обмежена від периферії кристала (1) шаром двоокису кремнію (3) завтовшки $\sim 0,5$ мкм і захищена просвітлювальним покриттям (4) з двоокису кремнію завтовшки $\sim 0,1$ мкм. Область n^+ - типу провідності (2) має омичний контакт із золота (5) завтовшки 0,5 – 1 мкм. Область фоточутливого елемента (область n^+ - типу провідності) оточена ізотопним до нього охоронним кільцем (6), яке має омичний контакт (7). Завданням охоронного кільця (6) є збирання на себе поверхневої складової темногового струму фоточутливого елемента (2). Для зменшення величини темногового струму охоронного кільця, зумовленого стягуваннями носіїв заряду з периферії кристала фотодіода через інверсійні канали на поверхні, довкола нього, сформовано область «стоп каналу» p^+ - типу провідності (8).

Зі зворотного боку кристала фотодіода створено область p^+ - типу провідності (9) для забезпечення омичного контакту (10) зі зворотного боку кристала. Омичний контакт із зворотного боку (10) виготовляють шляхом термічного випаровування золота. Товщина шару золота становить 0,5 – 1 мкм. У зворотному боці підкладки (1) створено мезаструктуру (11) завглибшки близько 250 мкм, площа якої є проекцією площі області n^+ - типу провідності (2) і співвісна до неї. Області (9) та (10) сформовано також на площині мезаструктури.

Омичний контакт із золота на зворотному боці кристала (10) є одночасно дзеркалом, що відбиває оптичне випромінювання робочої довжини хвилі (980 нм) назад, до р-п переходу і забезпечує подвійне проходження випромінювання через кристал фотодіода (рисунок 2). Це має сприяє збільшенню фотогенерованих неосновних носіїв заряду, які зумовлюють чутливість фотодіода.

Під час роботи фотодіода на р-п перехід подається зміщення такої величини, щоб розтягнути область просторового заряду на всю товщину кристалу (50 мкм).

Дослідження створеного фотодіода. Для дослідження створеного фотодіода здійснювалось разом із серійним фотодіодом типу ФД-255А [26]. Партії містили по 10 шт. фотодіодів. Для дослідження чутливості та часу наростання створених та серійних фотодіодів використано лазерний діод типу S83980XDCC-AL, який випромінює довжину хвилі 980 нм потужністю до 30 mW.

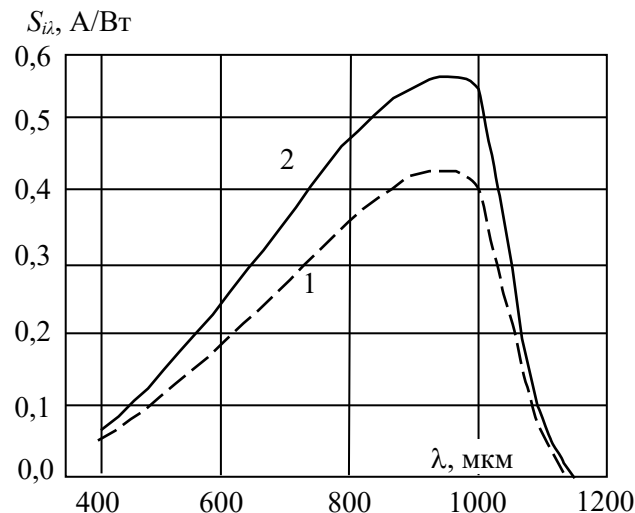


Рис.3. Усереднена спектральна харак-теристика чутливості серійних фотодіодів УФД15 (1) та створених фотодіодів (2)

Абсолютну спектральну характеристику чутливості фотодіодів S_{ii} досліджували за допомогою спектрального комплексу КСВУ-23. Струмову монохроматичну чутливість на довжині хвилі 980 нм досліджували за стандартними методиками за ГОСТ 17772, метод 1.22 та 1.10 [28] із такими уточненнями: зміщення на фотодіодах 135 В; резистор навантаження у колі фоточутливого елемента $10 \text{ кОм} \pm 1 \%$; резистор навантаження у колі охоронного кільця $100 \text{ Ом} \pm 1 \%$; частота модуляції 20 кГц ; потужність 30 мВт ; тривалість імпульсів $0,1 - 1,0 \text{ мкс}$. Межі допустимої відносної похибки вимірювання S_{ii} не перевищують $\pm 10 \%$.

Результати дослідження наведено на рисунку 3 у вигляді усереднених значень, отриманих на партіях фотодіодів по 10 шт. кожна. На рисунку 3 видно, що струмова монохроматична чутливість створеного фотодіода становить у середньому $0,57 \text{ А/Вт}$, а серійного ФД-255А $0,43 \text{ А/Вт}$.

Загалом спектральний діапазон чутливості становить $0,4 - 1,1 \text{ мкм}$.

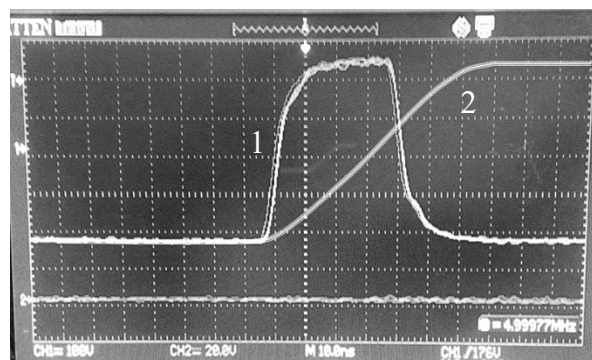


Рис.4. Типові осцилограми створеного (1) та серійного (2) фотодіодів.

Вимірювання часу наростання (τ) здійснювалося із використанням випромінювача типу S83980XDCC-AL потужністю до 30 мВт згідно стандартної методики (ГОСТ 17772, метод 1.12 [28]). Тривалість імпульсу падаючого випромінювання з довжиною хвилі 980 нм 100 нс . Вимірювання здійснювались по осцилограмі вихідного сигналу фотодіоду як час, за який наростання імпульсу (τ) збільшується від рівня $0,1$ до рівня $0,9$ амплітуди. Зміщення на фотодіодах складало 135 В . Відносна похибка вимірювання τ перебуває в межах $\pm 10\%$.

Результати дослідження наведено на рисунку 4 у вигляді накладених типових осцилограм створеного та серійного фотодіодів. З рисунку 4 видно, що час наростання створеного фотодіода становить близько 20 нс , на відміну від серійного фотодіода, в якого цей параметр перебуває на рівні близько 75 нс .

Аналіз отриманих результатів

Результати дослідження струмової монохроматичної чутливості та часу наростання створеного фотодіоду та серійного фотодіоду ФД-255А показують наступне.

Теоретичний аналіз конструкції фотодіоду, який працює в умовах рівномірної генерації фотоструму при рівномірній густині об'ємного заряду усередині кристала, при прийомі випромінювання з робочою довжиною хвилі показав, що його чутливість може бути підвищена у $1,4$ рази за рахунок оптимізації конструкції. Час наростання фотодіоду може бути збільшено у чотири рази.

Однак, за результатами порівняльних досліджень параметрів серійного ФД-255А та створеного фотодіодів виявлено, що величину струмової монохроматичної чутливості вдалося підвищити лише на 12% .

Це можна пояснити тим, що у новоствореного фотодіода оптичний промінь поглинається на глибині близько 100 мкм, а оскільки товщина кристалу (підкладки) в площині фоточутливого елементу складає 50 мкм і зворотній бік кристалу має дзеркальний металевий контакт, то промінь двічі проходить крізь підкладку. У серійному фотодіоді ФД-255А товщина підкладки складає 500 нм, тому випромінювання робочої довжини хвилі поглинається в ньому на глибині близько 100 мкм і не здійснює повторний прохід через підкладку.

У запропонованій конструкції фотодіода вклад повторного проходження променя у величину фотосигналу становить лише 12 %, а не близько 40 %, як можна оцінити із формули (7). Це говорить, на нашу думку про те, що створена фотодіодна структура має певну кількість внесених дефектів у своєму об'ємі, які пов'язані із термічними операціями створення р-п переходу та операціями травлення мезоструктури.

Як видно з результатів вимірювання, запропонований фотодіод має час наростання у середньому у 3,7 разів менший, ніж у аналога ФД-255А. Слід зауважити, що паспортне значення часу наростання фотодіоду ФД-255А складає 50 нс при зміщенні 250В. У нашому випадку на фотодіоді подавалося зміщення 135В, відповідно, час наростання фотодіоду ФД-255А, як видно з формули (5), повинен збільшитися, що і спостерігається.

Щодо створеного фотодіоду, то згідно розрахунку за формулою (5), він має бути у чотири рази менше. З урахуванням похибки вимірювання часу наростання теоретичний та вимірний результати досить блиски.

Таким чином, з проведеного аналізу видно, що подальші дослідження мають проводитись у напрямку покращення технологічних процесів виготовлення фотодіоду.

Висновки

1. Визначено та враховано фактори, що впливають на струмову монохроматичну чутливість фотодіода та його час наростання в умовах рівномірної генерації фотоструму при рівномірній густині об'ємного заряду усередині кристала при прийомі випромінювання з робочою довжиною хвилі.

2. Створено нову конструкцію фотодіода з підвищеною чутливістю та зниженим часом наростання, яка базується на оптимізації частоти модуляції, товщини ОПЗ, рухливості неосновних носіїв заряду та величиною зміщення на р-п переході, а також забезпеченням подвійного проходження випромінювання через кристал фотодіоду. Результат досягнуто також шляхом витравлення мезоструктури зі зворотного боку фотодіоду, площа якою є проекцією фоточутливого елемента фотодіода, а товщина кремнієвої пластини над мезоструктурою має бути близько 50 мкм.

3. Проведено порівняльні дослідження виготовленої партії створених фотодіодів та фотодіодів ФД-255А, які показали, що запропонований фотодіод дійсно має струмову монохроматичну чутливість на довжині хвилі 980 нм не менше 0,57 А/Вт. При цьому його час наростання зменшено з 50 нс до 20 нс. порівняно з серійним фотодіодом ФД-255А.

4. Аналіз о триманих результатів показує, що значення струмової монохроматичної чутливості на довжині хвилі 980 нм у створеного фотодіоду вдалося збільшити лише на 12 %, а час наростання зменшити у 3,7 рази, що близько до розрахованої величини.

Література

1. ГОСТ 21934-83. Приймачі випромінювання. Напівпровідникові фотоелектричні та фотодетекторні прилади. Терміни та визначення: Чинний з 1985-01.05. М., Видавництво стандартів, 1985. 86 с. (Держстандарт СРСР).

2. Dobrovolskiy Yu. G., Clarifying coverages on the basis of tapes SnO₂, SiO₂, Si₃N₄ for photodiodes of ultraviolet and visible range / Dobrovolskiy Yu. G Perevertaylo V. L., Shabashceвич B. G., Pidkamin L. J. // SPIE Proc. 2009. Vol. 7388. — P. 63—69.

3. M. Grabherr, M. Miller, R. Jäger, D. Wiedenmann, R. King. In: Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers VIII, 5364, 174-182, Int. Soc. Opt. Photonics, 2004, June (2004).

4. J. Mikołajczyk, Z. Bielecki, M. Bugajski, J. Piotrowski, J. Wojtas, W. Gawron, D. Szabra, A. Prokopiuk. Analysis of Free-Space Optics Development, Metrol. Measur. Syst., 24, N 4 (2017) 653—674/ DOI: 10.1515/mms-2017-0060.

5. S.M. Sze, K.Ng. Kwok, Physics of Semiconductor Devices (John Wiley & Sons, Inc.: 2007).

6. I.A. Love, I.R. Sizilov. Improvement of spectral characteristics in Schottky photodiodes by change of voltage // Appl. Optics, 7(4), p.20 (1968).

7. p-i-n Photodiode Based on Silicon with Short Rise Time. Yu.G. Dobrovolsky, O.P. Andreeva, M.S. Gavrilyak, L.J. Pidkamin, G.V. Prokhorov // Journal of nano- and electronic physics-Vol. 10 No 4, 04019(5pp) (2018) [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10\(4\).04019](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10(4).04019).

8. Chunxiong Bao, Zhaolai Chen, Yanjun Fang, Haotong Wei, Yehao Deng, Xun Xiao, Lingliang Li, Jinsong Huang Low-Noise and Large-Linear-Dynamic-Range Photodetectors Based on Hybrid-Perovskite Thin-Single-Crystals. Adv Mater. 2017 Oct; 29(39). doi: 10.1002/adma.201703209.

9. Zhang, T., Liu, B., Ahmad, W. et al. Optical and Electronic Properties of Femtosecond Laser-Induced Sulfur-Hyperdoped Silicon N+/P Photodiodes. *Nanoscale Res Lett* 12, 522 (2017). <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2287-2>.

10. Liu, Hongxu; Jin, Guangyong; Wang, Di Research on responsivity of Si-based p-i-n quadrant photodiode detector interact with millisecond pulsed laser // Proceedings of the SPIE, Volume 11046, id. 1104636 4 pp. (2019). March 2019 . DOI:10.1117/12.2525612.
11. A. K. Budtolaev, G. V. Liberova, and V. I. Khizhnyak. Increasing the sensitivity of silicon p-i-n photodiodes to the 1.06 μm radiation. Applied Physics 2018.- № 5.- с. 47-49.
12. R. Marnadu, J. Chandrasekaran, S. Maruthamuthu, V. Balasubramani, P. Vivek, R. Suresh Ultra-high photoresponse with superiorly sensitive metal-insulator-semiconductor (MIS) structured diodes for UV photodetector application. Applied Surface Science. Volume 480, 30 June 2019, Pages 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.214>.
13. Kukuruziak M. Silicon four element p-i-n photodiode with improved characteristics. Radioelectronic and Computer Systems, n. 1, p. 92-100, mar. 2023. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.07>.
14. Qiuyue Wu, Guobiao Cen, Yujin Liu, Zhong Ji, Wenjie Mai. A simple-structured silicon photodetector possessing asymmetric Schottky junction for NIR imaging. Physics Letters A . 2021 Volume 412, 7 October 2021, 127586. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127586>.
15. Olli E. Setälä, Kexun Chen, Toni P. Pasanen, Xiaolong Liu, Behrad Radfar, Ville Vähänissi, and Hele Savin: Boron-Implanted Black Silicon Photodiode with Close-to-Ideal Responsivity from 200 to 1000 nm. ACS Photonics 2023, 10, 6, 1735–1741. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c01984>.
16. Hyun, M., Ahn, C., Na, Y. *et al.* Attosecond electronic timing with rising edges of photocurrent pulses. Nat Commun 11, 3667 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17460-6> <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17460-6>.
17. p-i-n Photodiode Based on Silicon with Short Rise Time. Yu.G. Dobrovolsky, O.P. Andreeva, M.S. Gavrilyak, L.J. Pidkamin, G.V. Prokhorov // JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS-Vol. 10 No 4, 04019(5pp) (2018) [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10\(4\).04019](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10(4).04019).
18. Dobrovolsky Yu.G. Photodiode on the basis of epitaxial phosphate gallium with increased sensitivity at a wavelength of 254 nm / Yu.G. Dobrovolsky, V.M. Lipka, V.V. Strebezhev, Yu.O. Sorokaty, M.O. Sorokaty, O.P. Andreeva // Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska. - №1. – 2020. – p.36-39 DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.910>.
19. Shabashkevich B.G./ Optical Sensor For Non-Selective Measurements Based on the Cadmium Antimonide/ Shabashkevich B.G., Dobrovolsky Yu.G., Pidkamin L.J.//Proceedings of Spie, 9809, ed. Angelsky O., Spie-Int Soc Optical Engineering, 2015.
20. Yu.Dobrovolsky/ Photodiodes on the basis of gallium phosphate with increased sensitivity at a wavelength of 254 nm/ Yu.Dobrovolsky L. Pidkamin and G. Prokhorov. // Proc. SPIE 8338, 83380N (2011).
21. Dobrovolskiy Yu.G. Estimation of the frequency characteristics descriptions of photodiode, determined by motion of transmitters of charge carriers in the space-charge region area of spatial charge / Yu.G. Dobrovolskiy, A.I. Danilyuk // Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics. -2006. -V. 9. -№ 3. -P. 40-43.
22. Dobrovolskiy Yu.G. Estimation of photodiode frequency characteristics determined by motion of charge carriers in the space charge region. The case of even generation of carriers / Yu.G. Dobrovolskiy, A.I. Danilyuk // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. - 2009. -V. 12, N 1. -P. 77-82.
23. Physics of Semiconductor Devices, 3rd by S.M. Sze and Kwok K. Ng. Copyright 2006 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. <https://doi.org/10.1002/9780470068328.ch13>.
24. Data Sheet QP154-Q TO. URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/313/QP154-Q_TO_3001386-1479679.pdf], FD 342M [Pasport FD 342M [Data Sheet PD 342M]. Available at: <https://orion-ir.ru/upload/iblock/ccb/ccb64e81f708470ee2c2e4699b9679e2.pdf> (accessed 14.07.2023).
25. Data Sheet YAG-555-4]. Available at: <https://www.excelitas.com/product/yag-555-4-series-quadrant-photodiodes-si-pin-141-mm> (accessed 14.07.2023).
26. Data Sheet FD-255. Available at: http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fdSipin_fd255.htm (accessed 14.07.2023).
27. Dobrovolsky Y., Sorokaty Y. Model and algorithm of creation of silicon photodiode with high sensitivity in the middle infrared area of the spectrum. Radioelectronic and Computer Systems. 2022,- no.4 (104), p. 98-107. doi: 10.32620/reks.2021.4.07.
28. ГОСТ 1772-88. Приймачі випромінювання. Напівпровідникові фотоелектричні пристрої та фотодетекторні модулі попереднього підсилення. Методи вимірювання фотоелектричних параметрів і визначення характеристик: Чинний з 1988-01-07. М., Видавництво стандартів, 1988. 158 с. (Держстандарт СРСР).

References

1. HOST 21934-83. Pryimachi vyprominiuvannya. Napivprovodnykovy fotoelektrychni ta fotodetektorni pryklady. Terminy ta vyznachennia: Chynnyi z 1985-01.05. М., Vydavnytstvo standartiv, 1985. 86 s. (Derzhstandart SRSR).
2. Dobrovolskiy Yu. G., Clarifying coverages on the basis of tapes SnO₂, SiO₂, Si₃N₄ for photodiodes of ultraviolet and visible range / Dobrovolskiy Yu. G Perevertaylo V. L., Shabashkevich B. G., Pidkamin L. J. // SPIE Proc. 2009.Vol. 7388.— P. 63—69.
3. M. Grabherr, M. Miller, R. Jäger, D. Wiedenmann, R. King. In: Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers VIII, 5364, 174-182, Int. Soc. Opt. Photonics, 2004, June (2004).
4. J. Mikołajczyk, Z. Bielecki, M. Bugajski, J. Piotrowski, J. Wojtas, W. Gawron, D. Szabra, A. Prokopiuk. Analysis of Free-Space Optics Development, Metrol. Measur. Syst., 24, N 4 (2017) 653—674/ DOI: 10.1515/mms-2017-0060.
5. S.M. Sze, K.Ng. Kwok, Physics of Semiconductor Devices (John Wiley & Sons, Inc.: 2007).

6. I.A. Love, I.R. Sizilov. Improvement of spectral characteristics in Schottky photodiodes by change of voltage // *Appl. Optics*, 7(4), p.20 (1968).
7. p-i-n Photodiode Based on Silicon with Short Rise Time. Yu.G. Dobrovolsky, O.P. Andreeva, M.S. Gavriyak, L.J. Pidkamin, G.V. Prokhorov // *Journal of nano- and electronic physics*-Vol. 10 No 4, 04019(5pp) (2018) [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10\(4\).04019](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10(4).04019).
8. Chunxiong Bao, Zhaolai Chen, Yanjun Fang, Haotong Wei, Yehao Deng, Xun Xiao, Lingliang Li, Jinsong Huang Low-Noise and Large-Linear-Dynamic-Range Photodetectors Based on Hybrid-Perovskite Thin-Single-Crystals. *Adv Mater.* 2017 Oct; 29(39). doi: 10.1002/adma.201703209.
9. Zhang, T., Liu, B., Ahmad, W. *et al.* Optical and Electronic Properties of Femtosecond Laser-Induced Sulfur-Hyperdoped Silicon N+/P Photodiodes. *Nanoscale Res Lett* 12, 522 (2017). <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2287-2>.
10. Liu, Hongxu; Jin, Guangyong; Wang, Di Research on responsivity of Si-based p-i-n quadrant photodiode detector interact with millisecond pulsed laser // *Proceedings of the SPIE*, Volume 11046, id. 1104636 4 pp. (2019). March 2019 . DOI:10.1117/12.2525612.
11. A. K. Budtolaev, G. V. Liberova, and V. I. Khizhnyak. Increasing the sensitivity of silicon p-i-n-photodiodes to the 1.06 μm radiation. *Applied Physics* 2018.- № 5.- c. 47-49.
12. R. Marnadu, J. Chandrasekaran, S. Maruthamuthu, V. Balasubramani, P. Vivek, R. Suresh Ultra-high photoresponse with superiorly sensitive metal-insulator-semiconductor (MIS) structured diodes for UV photodetector application. *Applied Surface Science*. Volume 480, 30 June 2019, Pages 308-322. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.214>.
13. Kukurudzkiak M. Silicon four element p-i-n photodiode with improved characteristics. *Radioelectronic and Computer Systems*, n. 1, p. 92-100, mar. 2023. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.07>.
14. Qiuyue Wu,Guobiao Cen,Yujin Liu,Zhong Ji,Wenjie Mai. A simple-structured silicon photodetector possessing asymmetric Schottky junction for NIR imaging. *Physics Letters A* . 2021 Volume 412, 7 October 2021, 127586. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127586>.
15. Olli E. Setälä, Kexun Chen, Toni P. Pasanen, Xiaolong Liu, Behrad Radfar, Ville Vähänissi, and Hele Savin Boron-Implanted Black Silicon Photodiode with Close-to-Ideal Responsivity from 200 to 1000 nm. *ACS Photonics* 2023, 10, 6, 1735–1741. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.2c01984>.
16. Hyun, M., Ahn, C., Na, Y. *et al.* Attosecond electronic timing with rising edges of photocurrent pulses. *Nat Commun* 11, 3667 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17460-6> <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17460-6>.
17. p-i-n Photodiode Based on Silicon with Short Rise Time. Yu.G. Dobrovolsky, O.P. Andreeva, M.S. Gavriyak, L.J. Pidkamin, G.V. Prokhorov // *JOURNAL OF NANO- AND ELECTRONIC PHYSICS*-Vol. 10 No 4, 04019(5pp) (2018) [http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10\(4\).04019](http://dx.doi.org/10.21272/jnep.10(4).04019).
18. Dobrovolsky Yu.G. Photodiode on the basis of epitaxial phosphate gallium with increased sensitivity at a wavelength of 254 nm / Yu.G. Dobrovolsky, V.M. Lipka, V.V. Strebezhev, Yu.O. Sorokaty, M.O. Sorokaty, O.P.Andreeva // *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. - №1. – 2020. – p.36-39 DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.910>.
19. Shabashkevich B.G./ Optical Sensor For Non-Selective Measurements Based on the Cadmium Antimonide/ Shabashkevich B.G., Dobrovolsky Yu.G., Pidkamin L.J.//*Proceedings of Spie*, 9809, ed. Angelsky O., Spie-Int Soc Optical Engineering, 2015.
20. Yu.Dobrovolsky/ Photodiodes on the basis of gallium phosphate with increased sensitivity at a wavelength of 254 nm/ Yu.Dobrovolsky L. Pidkamin and G. Prokhorov. // *Proc. SPIE* 8338, 83380N (2011).
21. Dobrovolskiy Yu.G. Estimation of the frequency characteristics descriptions of photodiode, determined by motion of transmitters of charge carriers in the space-charge region area of spatial charge / Yu.G. Dobrovolskiy, A.I. Danilyuk // *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*. -2006. -V. 9. -№ 3. -P. 40-43.
22. Dobrovolskiy Yu.G. Estimation of photodiode frequency characteristics determined by motion of charge carriers in the space charge region. The case of even generation of carriers / Yu.G. Dobrovolskiy, A.I. Danilyuk // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. - 2009. -V. 12, N 1. -P. 77-82.
23. *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd by S.M. Sze and Kwok K. Ng. Copyright 2006 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. <https://doi.org/10.1002/9780470068328.ch13>.
24. Data Sheet QP154-Q TO. URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/313/QP154-Q_TO_3001386-1479679.pdf, FD 342M [Pasport FD 342M [Data Sheet PD 342M]. Available at: <https://orion-ir.ru/upload/iblock/ccb/ccb64e81f708470ee2c2e4699b9679e2.pdf> (accessed 14.07.2023).
25. Data Sheet YAG-555-4]. Available at: <https://www.excelitas.com/product/yag-555-4-series-quadrant-photodiodes-si-pin-141-mm> (accessed 14.07.2023).
26. Data Sheet FD-255. Available at: http://www.ckb-rhythm.narod.ru/fdSipin_fd255.htm (accessed 14.07.2023).
27. Dobrovolsky Y., Sorokaty Y. Model and algorithm of creation of silicon photodiode with high sensitivity in the middle infrared area of the spectrum. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2022,- no.4 (104), p. 98-107. doi: 10.32620/reks.2021.4.07.
28. HOST 1772-88. Prymachy vprominiuvannia. Napivprovidnykovi fotoelektrychni prystroi ta fotodetektorni moduli poperednoho pidsylennia. Metody vymiriuvannia fotoelektrychnykh parametriv i vyznachennia kharakterystyk: Chynnyi z 1988-01-07. M., Vydavnytstvo standartiv, 1988. 158 s. (Derzhstandart SRSR).