

¹М. С. КУКУРУДЗЯК, д. т. н. ²Ю. Г. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ

Україна, м. Чернівці, ¹ЦКБ Ритм;

²Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

E-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com

КРЕМНІЄВИЙ $p-i-n$ -ФОТОДІОД ІЗ ПІДВИЩЕНОЮ ІМПУЛЬСНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ

Представлено розрахунок і граничні вимоги для виробництва кремнієвих $p-i-n$ -фотодіодів із підвищеною чутливістю, проведено узгодження теоретичних параметрів із реальними фотодіодами, виготовленими згідно з розрахунком. Описано особливості конструкції чотириелементного сегментного $p-i-n$ -фотодіода з охоронним кільцем та технології, які дозволили створити прилад з імпульсною монохроматичною чутливістю 0,48 А/Вт.

Ключові слова: фотодіод, кремній, імпульсна чутливість.

Напівпровідникові фотоелектричні прилади з $p-n$ -переходами знайшли широке застосування в різних галузях науки та техніки, зокрема в автоматичній та телемеханіці, контрольно-вимірювальному обладнанні, системах стеження, наведення та ін. Поява досконаліх джерел монохроматичного випромінювання, модульованого частотами в сотні й тисячі мегагерц, сприяє вдосконаленню відомих та розробці нових типів фотоелектричних приладів, які перетворюють світловий сигнал в електричний. Це робить реальним втілення низки нових завдань електроніки, в тому числі оптоелектроніки. Для виконання цих завдань потрібні фотоприймачі із підвищеними характеристиками — високою токовою монохроматичною чутливістю, в тому числі імпульсною, мінімальною ємністю, низькими темновими струмами фоточутливого елемента (ФЧЕ).

До найбільш широкоживаних приладів фотоелектроніки відносяться кремнієві $p-i-n$ -фотодіоди (ФД). Головна сфера їх застосування — в об'єктах, що використовують лазерні промені ближньої інфрачервоної області спектру оптичного випромінювання, зокрема на довжині хвилі $\lambda = 1060$ нм. Хвилі такої довжини випромінюють лазери на ітрій-алюмінієвому гранаті (YAG), які широко застосовуються в різних областях, серед яких вимірювання відстані (лазерні далекоміри), застосування в науці (лазери з модульованою добротністю) та ін.

Фотоприймачі з $p-i-n$ -структурою являють собою дві тонкі низькоомні p - та n -області, між якими розташовано достатньо широкий високоомний, збіднений вільними носіями i -шар. Якщо до такої структури не прикладено зовнішньої електричної напруги, поле в i -шарі є малим, і генеровані носії будуть рухатись лише в результаті дифузії. При зворотному зміщенні $p-i-n$ -структури вся напруга буде падати на високоомний i -шар, а носії заряду, які генеруватимуться

під дією сильного поля, будуть пролітати i -область, не встигаючи рекомбінувати [1].

Провідні світлові конструктори та технологи в сфері фотоелектроніки активно займаються розробкою та створенням ФД із $p-i-n$ -структурою з параметрами, які забезпечуватимуть вимоги ринку. Зокрема, в [2] досліджено можливості підвищення рівня чутливості $p-i-n$ -фотодіодів до випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 1,06$ мкм. Авторами запропоновано використання двошарового просвітлюючого покриття, що складається з плівок SiO_2 і Si_3N_4 товщиною 40 та 88 нм відповідно, та отримано ФД з імпульсною чутливістю $S_{\text{имп}} = 0,44$ А/Вт. Науковці зазначають, що отримані результати вказують на те, що перехід до двошарового просвітлюючого покриття призводить до помітного підвищення рівня монохроматичної імпульсної чутливості та до збільшення виходу придатних виробів.

В [3] розглянуто основну номенклатуру вимог, що пред'являються до чотириканального фотоприймального пристрою (ФПП) на основі квадрантного кремнієвого $p-i-n$ -фотодіода для координатних систем, приведено одну з можливих концепцій побудови електронного тракту ФПП. Автори вказують, що у ФПП необхідно використовувати $p-i-n$ -фотодіоди з мінімальними значеннями міжелементних зазорів (для збільшення крутості пеленаційної характеристики), струмів витоку та власної ємності. Виходячи з цього, у ФПП був застосований кремнієвий $p-i-n$ -фотодіод з зазором між ФЧЕ 50 мкм, діаметром фоточутливої площадки 3,0 мм (з метою досягнення мінімальних значень струмів витоку та ємності), що має струмову імпульсну чутливість $S_{\text{имп}} \geq 0,4$ А /Вт при значенні робочої напруги 200 В.

Для створення ФД із підвищеною імпульсною чутливістю потрібно попередньо вирішити ряд технологічних та конструкційних питань. Зокрема, попе-

редньо розрахувати основні параметри, вибрати матеріал підкладки та домішкові елементи, визначити, яка конструкція максимально забезпечить всі технічні вимоги, адже чутливість ФД залежить як від фізичних обмежень, пов'язаних із вибором матеріалу підкладки, так і від його конструкції.

Метою цієї роботи було створення чотириелементного сегментного $p-i-n$ -фотодіода на основі високоомного кремнію p -типу з підвищеною імпульсною чутливістю на довжині хвилі YAG-лазера, з малою ємністю та мінімальними темновими струмами.

Для виготовлення високочутливих фотоприймачів необхідно встановити основні критерії вибору кремнію, зокрема, для оцінювання потенційних параметрів ФД при використанні матеріалу із різними вихідними показниками питомого опору та часу життя неосновних носіїв заряду, а також визначити оптимальну конструкцію кристалу приладу — глибину залягання $p-n$ -переходів, товщину шарів тощо, базуючись на сформованих критеріях та припущеннях.

Розрахункова частина

Для правильності вибору конструкції приладу та вірності сформованих граничних критеріїв щодо вибору кремнію та мінімізації похибки при розрахунках основних параметрів необхідно оцінити можливу чутливість ФД.

Оцінка струмової імпульсної чутливості проводиться за формулою [4]

$$S_{\text{имп}} = \frac{\lambda}{1,234} (1-R)(1-T)\eta, \quad (1)$$

де R — коефіцієнт відбивання;
 T — коефіцієнт пропускання;
 η — квантова ефективність.

Для кремнію з просвітлюючим покриттям, виготовленим з ізотермічно вирошеного двоокису кремнію (SiO_2), реально можна досягнути значення R близько 0,1. Для цього потрібно забезпечити умову мінімуму відбивання [5]:

$$\lambda_p/4 = nd_{\text{SiO}_2}, \quad (2)$$

де λ_p — робоча довжина хвилі;
 nd — оптична товщина просвітлювальної плівки;
 n — коефіцієнт заломлення ($n = 1,42$ для SiO_2);
 d_{SiO_2} — товщина просвітлювальної плівки.

Звідси можемо знайти, що $d_{\text{SiO}_2} = 0,187$ мкм, і при виконанні цієї умови коефіцієнт відбивання $R \rightarrow 0$.

Оптичні властивості кремнію є такими, що 90% ІЧ-випромінювання з довжиною хвилі понад 1000 нм поглинається в ньому на глибині близько 1 мм [6]. Кремнієві $p-i-n$ -фотодіоди мають металевий омичний контакт з боку кристала, протилежного до ФЧЕ. Він виконує роль дзеркала, яке відбиває значну частину

випромінювання робочої довжини хвилі, що не поглинається об'ємом кристала фотодіода та доходить до контакту зі зворотного боку. З урахуванням цього чинника товщина кристала фотодіода вибирається 400—500 мкм. Використання відбивання оптичного випромінювання тильним контактом дозволяє забезпечити подвійне проходження оптичного випромінювання в об'ємі кристала фотодіода й збільшити кількість фотогенерованих носіїв. За таких умов випромінювання з $\lambda_p = 1060$ нм повністю поглинається, тому коефіцієнт пропускання $T \approx 0$.

Квантова ефективність для такої довжини хвилі, згідно з [7], теоретично може досягати 60%. У [8] досягнуто квантову ефективність близько 58%. Для наших розрахунків приймемо $\eta = 52\%$.

Підставивши ці дані в формулу (1), отримаємо значення імпульсної чутливості $S_{\text{имп}} = 0,4$ А/Вт.

На практиці, струмова монохроматична імпульсна чутливість може бути дещо вище розрахованої завдяки вдосконаленій технології, яка може забезпечити більш високу величину квантового виходу та менший за 0,1 коефіцієнт відбивання.

Для оцінки ємності $p-n$ -переходу, отриманого методом дифузійно-планарної технології, скористаємось формулою [9]

$$C = A_{\text{ФЧЕ}} \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 q N_d}{2(\phi_k - U_p)}}, \quad (3)$$

де ϵ, ϵ_0 — діелектричні сталі для кремнію та вакууму відповідно;

q — заряд електрона;

ϕ_k — висота потенціального бар'єра, $\phi_k = 0,5$ еВ;

U_p — напруга зміщення, $U_p = -120$ В;

N_d — концентрація домішки в підкладці;

$A_{\text{ФЧЕ}}$ — ефективна площа ФЧЕ (однієї фоточутливої площадки), $A_{\text{ФЧЕ}} = 0,385$ см².

Формулу (3) можна спростити до вигляду (для несиметричних $p-n$ -переходів)

$$C = \frac{326 A_{\text{ФЧЕ}}}{\sqrt{\rho(\phi_k - U_p)}}, \quad (4)$$

де ρ — питомий опір кремнію.

У цій формулі одиниці вимірювання $A_{\text{ФЧЕ}}$ — мм², C — пФ.

У виробництві використовується кремній з різним питомим опором: 16, 18 та 20 КОм·см. В ході експериментів було виявлено, що внаслідок термічних операцій питомий опір кремнію може зменшуватися приблизно у два рази (в окремих випадках і більше). Тому для оцінювального розрахунку кінцевої ємності $p-n$ -переходу значення питомого опору слід вважати вдвічі меншими за наведені у сертифікаті.

Розрахунок за формулою (4) ємності фотодіоду з площею ФЧЕ 0,385 см², створеного на основі крем-

нію з $\rho \approx 20$ кОм·см, показує, що у такому випадку ємність ФЧЕ складатиме 11,5 пФ, при $\rho \approx 18$ кОм·см $C = 12,1$ пФ, при $\rho \approx 16$ кОм·см $C = 12,8$ пФ.

Для виробництва ФД з підвищеною імпульсною чутливістю обрано кремній із $\rho \approx 18$ кОм·см, оскільки матеріал із вищим опором може викликати збільшення зарядових станів, які впливають на величину темнових струмів ФД, а при $\rho \leq 15$ кОм·см можемо отримати ФД із великою ємністю.

Розглянемо теоретично можливі значення темнового струму ФЧЕ при використанні кремнію з $\rho \approx 18$ кОм·см.

Сумарний темновий струм складається із трьох складових — дифузійної $I_{Т\text{ диф}}$, генераційно-рекомбінаційної $I_{Т\text{ ген-рек}}$ та поверхневої $I_{Т\text{ пов}}$ [6]:

$$I_T = I_{Т\text{ диф}} + I_{Т\text{ ген-рек}} + I_{Т\text{ пов}} \quad (5)$$

Згідно з [7], густина дифузійної складової струму $I_{Т0\text{ диф}} = 2 \cdot 10^{-9}$ А/см², тоді при $A_{\text{ФЧЕ}} = 0,385$ см²

$$I_{Т\text{ диф}} = A_{\text{ФЧЕ}} I_{Т0\text{ диф}} = 0,57 \cdot 10^{-9} \text{ А} \quad (6)$$

Густина генераційно-рекомбінаційної складової темнового струму складає $I_{Т0\text{ ген-рек}} = 0,6 \cdot 10^{-9}$ А/см² [9], і тоді

$$I_{Т\text{ ген-рек}} = A_{\text{ФЧЕ}} I_{Т0\text{ ген-рек}} = 0,231 \cdot 10^{-9} \text{ А} \quad (7)$$

Поверхнева складова темнового струму згідно [8] визначається як

$$I_{Т\text{ пов}} = \sigma_{ss} N_{ss} A_{p-n} \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

де σ_{ss} — площа перерізу захоплення;
 N_{ss} — густина поверхневих станів;
 A_{p-n} — площа p - n -переходу.

Площа, яка робить внесок в поверхневу складову темнового струму, визначається за формулою [10]

$$A_{p-n} = W_i P_{p-n}, \quad (9)$$

де W_i — ширина області просторового заряду (ОПЗ);
 P_{p-n} — периметр p - n -переходу.

Ширину ОПЗ можна розрахувати за формулою [11]

$$W_i = \frac{1}{3} \sqrt{\rho U_{\text{роб}}} \approx 490 \text{ мкм} \quad (10)$$

В такому випадку периметр p - n -переходу $P_{p-n} = 2,5$ см, і тоді знайдемо його площу за формулою (9): $A_{p-n} = 1,225 \cdot 10^{-3}$ см².

Площа перерізу захоплення $\sigma_{ss} = 10^{-15}$ см². Густину поверхневих станів, яка визначається технологією, вибираємо рівною $N_{ss} = 5 \cdot 10^{11}$ см⁻²·еВ⁻¹.

Підставивши вказані дані в формулу (8), отримаємо значення поверхневої складової темнового струму ФД:

$$I_{Т\text{ пов}} = 61,3 \cdot 10^{-9} \text{ А}.$$

Таким чином, сумарний темновий струм ФД буде дорівнювати

$$I_T = 62,1 \cdot 10^{-9} \text{ А}.$$

Звідси можна визначити значення статичного темнового опору R_c при нульовому зміщенні ($U_{зм} \leq 10$ В):

$$R_c = U_{зм} / I_T = 16,1 \text{ кОм} \quad (11)$$

Аналогічно можна отримати значення темнового струму $I_{ок}$ для охоронного кільця з ефективною площею $A_{ок} = 0,1385$ см² та периметром p - n -переходу $P_{ок\text{ } p-n} = 9,232$ см:

$$I_{ок} = 2,36 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Отримані значення темнових струмів характеризують квазіідеальний ФД. Звісно, що в розрахунках нереально врахувати всі фактори впливу на цей параметр. До таких факторів відносяться зарядові стани на поверхні кристалу, неконтрольовані домішки, структурні дефекти, рівні Тамма та Шоклі, вплив периферії кристалу, зокрема дрейф носіїв заряду з периферії до ФЧЕ під дією електричних полів тощо [12]. Ці явища були враховані вже при створенні ФД, тому, відповідно, допустимі значення темнового струму реального ФЧЕ є більшими, ніж отримані в розрахунку.

Експериментальна частина

Виготовлення ФД із підвищеною імпульсною чутливістю здійснювалось за стандартною дифузійно-планарною технологією [13]. Спочатку кремнієві підкладки окислювалися, і у вікна двоокису кремнію, створені фотолітографією, проводилась дифузія фосфору для створення n^+ -шару. Зі зворотної сторони кремнієвої підкладки створювався омичний p^+ -шар та напильовався шар золота з підшаром хрому методом термічного розпорощення у вакуумі. Так само створювались контакти золота з підшаром хрому до ФЧЕ та охоронного кільця.

Конструкцію описаного фотодіода зображено на **рис. 1**.

Як йшлося вище, для виробництва ФД використовувався кремній p -типу із питомим опором 18 кОм·см.

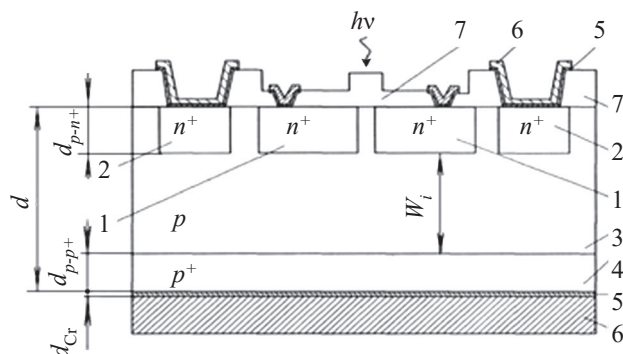


Рис. 1. Переріз кристалу фотодіода:

1 — фоточутлива площадка; 2 — охоронне кільце; 3 — i -область; 4 — область, гетерована бором; 5 — шар хрому; 6 — шар золота; 7 — шар SiO_2

Важливим параметром кремнію є час життя τ неосновних носіїв заряду. В ході досліджень використовувався матеріал із $\tau = 1\text{—}1,8$ мс. Було виявлено, що при використанні кремнію із $\tau \leq 1,4$ мс максимальна імпульсна чутливість серійних фотодіодів за умов використання однієї технології сягала $0,36\text{—}0,38$ А/Вт, що є замало для сучасних вимог. Відповідно, умовою тривалості часу життя неосновних носіїв заряду є $\tau \geq 1,4$ мс.

Товщину підкладки з кремнію можна оцінити наступним чином:

$$d = W_i + d_{p-n^+} + d_{p-p^+} \quad (14)$$

де d_{p-n^+} , d_{p-p^+} — глибина залягання, відповідно, $p-n^+$ - та $p-p^+$ -переходів.

Згідно з [11], при виготовленні ФД прагнули робити ОПЗ максимальної ширини, а шари p^+ та n^+ — мінімальної (відповідно, поз. 4, 2 на рис. 1), щоб вона повністю поглинала все світло, що падає. Це необхідно тому, що ефективною є взаємодія випромінювання тільки з i -шаром 3, оскільки в p^+ - та n^+ -областях воно значною мірою поглинається, а дифузійний струм, що виникає, має велику інерційність і погіршує швидкодію. З технологічних міркувань обрано $d_{p-n^+} = 7\text{—}9$ мкм, $d_{p-p^+} = 3\text{—}4$ мкм. Таким чином, враховуючи, що ширина ОПЗ $W_i = 490$ мкм, отримаємо кінцеву товщину підкладки у межах $d = 500\text{—}513$ мкм.

Вище були вказані припущення та параметри кристалу, направлені на отримання максимальної імпульсної чутливості ФД, але, як відомо, збільшення товщини бази фотодіода збільшує час пробігу носіїв заряду, зменшуючи швидкість його фотовідгуку. Тому, оскільки $p-i-n$ -фотодіоди належать до швидкодійних приладів фотоелектроніки, при їх виготовленні намагаються обирати оптимальну товщину підкладки, яка б забезпечувала вимоги і до чутливості, і до швидкодії.

Варто зазначити, що кремнієві пластини перед термічним окисленням обробляють методом хімікодинамічного полірування (ХДП) в розчині $\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH} = 9:2:4$, знімаючи шар кремнію товщиною близько $40\text{—}50$ мкм. Також, перед створенням омичного $p-p^+$ -переходу дифузиею бора зі зворотної сторони пластини стравлюють SiO_2 в розчині $\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:10$ та знову проводять ХДП, знімаючи шар товщиною близько $20\text{—}25$ мкм. Відповідно, початкова товщина підкладки має сягати $560\text{—}588$ мкм для забезпечення максимальної ширини ОПЗ, а відповідно, і чутливості.

Дифузію фосфору для створення ФЧЕ (поз. 1, 2 на рис. 1) проводили з твердотільних джерел, отримуючи поверхневий опір $\rho_s = 2,7\text{—}2,5$ Ом/□, який вимірювали чотиризондовим методом. При ρ_s більше ніж $2,7$ Ом/□ спостерігалось зростання I_T вище заданих значень. Поверхневий опір зі зворотної сторони підкладки після дифузії бору сягав $30\text{—}40$ Ом/□.

Як відомо [12], підшар хрому 5, який напилюється для покращення адгезії золота 6, при збільшенні товщини може поглинати до 90% оптичного випромінювання, що спричиняє значне погіршення чутливості. Тому його товщину d_{Cr} намагались робити мінімальною, у діапазоні $0,10\text{—}0,15$ мкм. При зменшенні d_{Cr} , як показує досвід, погіршується адгезія золота.

Результати досліджень та їх обговорення

На основі оцінювальних розрахунків було виготовлено серію чотириелементних сегментних ФД з площею ФЧЕ $0,385$ см² на основі високоомного кремнію p -типу, параметри яких наведено у табл. 1.

Всі вимірювання проводились згідно з ГОСТ 1772-88 [14].

Таблиця 1

Параметри виготовлених фотодіодів, отримані при $U_p = 120$ В, $\lambda_p = 1,06$ мкм та тривалості імпульсу $\tau_i = 500$ нс

Параметр	Величина
Темновий струм ФЧЕ, I_T , мкА/см ²	0,26—0,52
Темновий струм охоронного кільця, $I_{ок}$, мкА/см ²	18,1—23,1
Струмова статична чутливість на модульованому потоці, $S_{л}$, А/Вт	0,49 — 0,5
Імпульсна монохроматична чутливість, $S_{имп}$, А/Вт	0,44—0,48
Ємність ФЧЕ, $C_{ФЧЕ}$, пФ	12,0—13,3

Отримані результати повністю відповідають попередньо заданим параметрам ФД. Значення вказаних в таблиці параметрів добре верифікуються із теоретичними розрахунками. Підвищений рівень темнових струмів відносно обчисленого свідчить про неможливість врахування всіх факторів впливу на зростання зворотних характеристик. Імпульсна монохроматична чутливість отриманих фотодіодів дещо більше теоретичних значень, що свідчить про досконалість технології, доречність зроблених при розрахунках припущень, а також вказує на те, що сформульовані критерії отримання фотодіодів з підвищеною чутливістю забезпечують досягнення заданих параметрів. Ці умови можна записати в вигляді системи

$$\left\{ \begin{array}{l} 16 \leq \rho \leq 20 \text{ Ом} \cdot \text{см} \text{ — питомий опір кремнієвої підкладки;} \\ \tau \geq 1,4 \text{ мс} \text{ — час життя неосновних носіїв заряду;} \\ d = W_i + d_{p-n^+} + d_{p-p^+} \text{ — товщина підкладки при мінімальних } d_{p-n^+} \text{ та } d_{p-p^+}; \\ 30 \geq \rho_s \geq 40 \text{ Ом/}\square \text{ — поверхневий опір після дифузії бору;} \\ d_{Cr} = 0,10\text{—}0,15 \text{ мкм} \text{ — товщина підшару хрому;} \\ 2,7 \geq \rho_s \geq 2,5 \text{ Ом/}\square \text{ — поверхневий опір після дифузії фосфору.} \end{array} \right.$$

Результати порівняльних досліджень створеного ФД з аналогами

Параметр	Величина параметра ФД різних виробників					
	Створений ФД*	ФД 344 (НВО «Оріон», РФ) [15]	ФД-125К (ЦКБ «Ритм», Україна) [16]	S15137 (Hamamatsu photonic, Японія) [17]	YAG-444-4 (Excelitas Technologies Corp., Taiwan) [18]	QP154-Q (First Sensor AG, Німеччина) [19]
Питомий темновий струм ФЧЕ, I_{τ} , нА/мм ²	5,2	500	250	0,5	4	1
Статична чутливість на модульованому, $S_{\text{Д}}$, А/Вт	0,5	0,3	0,2	0,44	0,44	—
Імпульсна монохроматична чутливість, $S_{\text{імп}}$, А/Вт	0,48	—	—	—	—	0,45
Ємність ФЧЕ, $C_{\text{ФЧЕ}}$, пФ	12	40	120	10	12	20
Робоча напруга, В	120	120	135	100	180	150

*Параметри створеного ФД вимірювалися на довжині хвилі $\lambda_p = 1,06$ мкм при тривалості імпульсу $\tau_i = 500$ нс.

На рис. 2 наведено усереднені графіки залежності струмової імпульсної монохроматичної чутливості фотодіода від робочої напруги за різної товщини підкладки, а відповідно, і ОПЗ (використано кремній з однаковим питомим опором та застосовано однако-ву технологію виробництва).

Як видно з рисунку, максимальну чутливість мають ФД із $W_i = 490$ мкм (крива 1). У міру зменшення ширини ОПЗ чутливість спадає, адже в ширшій області просторового заряду при поглинанні оптичного випромінювання генерується більша кількість носіїв заряду. При розширенні ОПЗ на всю товщину підкладки чутливість $S_{\text{імп}}$ виходить в насичення, що свідчить про настання збіднення i -шару на носії заряду. При зменшенні W_i насичення настає за нижчих напруг зміщення, адже збіднення також настає при нижчих напругах.

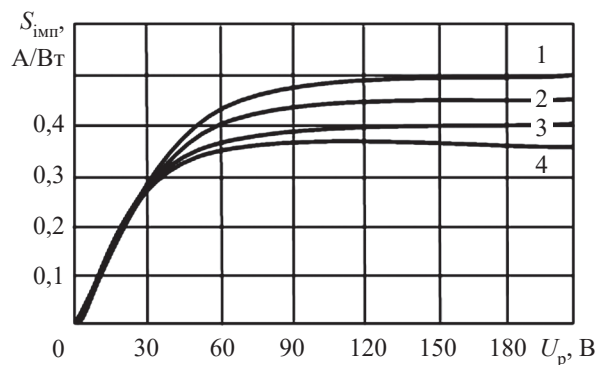


Рис. 2. Залежність струмової імпульсної монохроматичної чутливості від робочої напруги фотодіода при різних товщинах підкладки, або ширини ОПЗ W_i (у мкм):

1 — 490; 2 — 440; 3 — 390; 4 — 340

У табл. 2 для порівняння наведено параметри створеного ФД та його аналогів — квадрантних ФД відомих у світі виробників. Як видно, за величиною питомого темнового струму створені ФД суттєво (на порядок) поступаються лише фотодіодам S15137 (Hamamatsu photonic), а з YAG-444-4 (Excelitas Technologies) та QP154-Q (First Sensor AG Corp.) знаходяться на одному порядковому рівні. Статична чутливість на модульованому потоці на довжині хвилі 1,06 мкм та імпульсна монохроматична чутливість новостворених фотодіодів є найкращими серед відомих аналогів. Ємність фоточутливих елементів всіх порівнюваних фотодіодів знаходиться на одному рівні, що свідчить про приблизно однаковий опір вихідного кремнію, з якого створені усі ці фотодіоди. При цьому, при меншому зміщенні на p - n -переході запропонований ФД має кращу ємність, ніж аналоги.

Висновки

Таким чином, проведені дослідження дозволили створити фотодіоди, які не поступаються світовим аналогам, а за величиною статичної чутливості на модульованому потоці на довжині хвилі 1,06 мкм є кращими серед відомих аналогів. Їхня імпульсна монохроматична чутливість складає 0,48 А/Вт, що вище, ніж чутливість серійних виробів відомих закордонних виробників. Досягнуті результати свідчать про досконалість технології та доречність зроблених при розрахунках припущень.

Відпрацьована технологія виробництва високо-чутливих фотодіодів дозволила досягнути значення відсотку виходу придатних біля 70% для приладів з імпульсною чутливістю $S_{\text{імп}} \geq 0,42$ А/Вт, 30% із $S_{\text{імп}} \geq 0,45$ А/Вт та 5% із $S_{\text{імп}} \geq 0,48$ А/Вт. Варто зазна-

чити, що близько 95% виготовлених приладів цього типу мають імпульсну чутливість вище 0,4 А/Вт, а основне відбракування відбувається за значеннями темного струму або опору взаємозв'язку, але не за чутливістю.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Сенько В. І., Панасенко М. В., Сенько Є. В. та ін. *Електроніка і мікросхемотехніка. Т. 4: Силова електроніка*. Кн. 2. Київ, Каравела, 2013. 316 с.
2. Будтолаев А. К., Либерова Г. В., Хижняк В. И. Повышение чувствительности кремниевых *p-i-n*-фотодиодов к излучению с длиной волны 1,06 мкм. *Прикладная физика*, 2018, №5, с. 47–49.
3. Боровков П. М., Казарин Л. Н., Потапов А. В., Фролов Н. В. Четырехканальное ФПУ на основе квадрантного кремниевого фотодиода для координатных систем. *Успехи прикладной физики*, 2013, т. 1, №5, с. 621–624.
4. Сизов, Ф. Ф. *Фотозлектроника для систем видения в невидимых участках спектра*. Киев, Академперіодика, 2008, 459 с.
5. Литвиненко В. *Физика и технология полупроводниковых диодов: монография для специалистов обл. технологии пр-ва и эксплуатации полупроводник. приборов*. Херсон, Вишемирський В. С., 2018, 183 с.
6. Зи С. *Физика полупроводников*. Кн.1, Москва, Мир, 1984, 456 с.
7. Нойкин Ю. М., Махно П. В. *Физические основы оптической связи: электронное учебное пособие*. Ростов-на-Дону, ЮФУ, 2011, 355 с.
8. Кукурудзяк М. С., Андреева О. П., Ліпка В. М. *p-i-n*-фотодіод на основі високоомного кремнію р-типу з підвищеною чутливістю на довжині хвилі 1060 нм. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2020, № 5–6, с. 16–19. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2020.5-6.16>
9. Якушенков Ю. Г. *Основы теории расчета оптико-электронных приборов*. Москва, Советское радио, 1971, 336 с.
10. Секев К., Томпсет М. *Приборы с переносом заряда*. Москва, Мир, 1978, с. 148.
11. Брук В. А., Гаршенин В. В., Курносоев А. И. *Производство полупроводниковых приборов*, Москва, Высшая школа, 2006, 264 с.
12. Золочевский Ю.Б., Романов В.П., Соколов А.Ю. Исследование нейтрализации заряда подвижных ионов в области межфазовой границы диоксид кремния – кремний структуры Мо – SiO₂ – Si. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016, №6 (ч.4), с. 651–656.
13. Готра С. Ю. *Технология электронной техники: учеб. пособие в 2 т.* Изд-во Львовской политехники, 2010, т. 1, 884 с.
14. *ГОСТ 17772-88. Приемники излучения. Полупроводниковые фотозлектронические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотозлектронических параметров и определение характеристик*.
15. Бараночников М. *Приемники и детекторы излучений. Справочник*. Москва, Издательство “ДМК Пресс”, 2012.
16. Паспортные данные на ФД-125К. <http://ckb-rhythm.narod.ru/tablpin.htm>
17. Data Sheet S15137. <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/index.html>
18. Data Sheet YAG-444-4. <https://www.excelitas.com/product/yag-444-4-series-quadrant-photodiodes-si-pin-113mm>
19. Data Sheet QP154-Q. <https://www.first-sensor.com/en/products/optical-sensors/detectors/quadrant-pin-photodiodes-qp/>

Дата надходження рукопису до редакції 26.03 2021 р.

DOI: 10.15222/ТКЕА2021.1-2.61

UDC 535.23:628.98:535.31:621.383.52:537.312.51:631.382

M. S. KUKURUDZIAK¹, Yu. G. DOBROVOLSKY²

Ukraine, Chernivtsi,

¹Rhythm Optoelectronics Shareholding Company,

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

E-mail: mykola.kukurudzyak@gmail.com

THIGH PULSE RESPONSIVITY SILICON *p-i-n* PHOTODIODE

P-n junction semiconductor photodetectors are widely used in various fields of science and technology, including automation and telecontrol, instrumentation equipment, tracking systems, guidance, etc. The most demanded photoelectronic devices are silicon p-i-n photodiodes (PD). Their main field of application are installations using laser beams of near IR optical radiation spectrum, $\lambda = 1060$ nm, in particular.

The article provides considerations and limit requirements for production of high-responsivity silicon p-i-n photodiodes and making theoretical parameters consistent with real photodiodes made according to the design. Characteristic properties of technology, construction and final parameters of the manufactured four-element segment p-i-n photodiode with a guard ring are described.

The authors describe the criteria for choosing the material for making high-responsivity photodiodes. Results of the theoretical design for the capacitance of the photodiode based on the materials of different resistivity are presented. A theoretically possible value for the dark current of the responsive elements and the guard ring is considered for the silicon of 18 kOhm·cm. Criteria for the thickness of the PD crystal and the doped areas that provide for the maximum width of the space-charge region are presented. The dependence of the current pulse monochromatic responsivity from the operating voltage of the photodiode is shown for substrates with different thickness.

The photodiodes obtained during this study have the pulse monochromatic responsivity of 0.48 A/W, which is higher than that of commercial products of well-known foreign manufacturers. The results achieved demonstrate that this technology is effective and the assumptions made during the calculation stage are valid.

Keywords: photodiode, silicon, pulse responsivity.

REFERENCES

1. Sen'ko V. I., Panasenko M. V., Sen'ko E. V. et al. *Electronics and Microcircuitry. Vol. 4: Power Devices. Book 2*. Kyiv, Karavela, 2013, 316 p. [Ukr]
2. Budtolaev A. K., Liberova G. V., Khizhniak V. I. Increase in responsivity of silicon *p-i-n* photodiodes to the radiation of 1.06 μm wavelength. *Applied physics*, 2018, no. 5, pp. 47–49. [Rus]
3. Borovkov P. M., Kazarin L. N., Potapov A. V., Frolov N. V. A four-channel photodetector preamplifier module on the basis of a quadrant silicon photodiode for coordinate systems. *Uspekhi prikladnoi fiziki*, 2013, vol. 1, no. 5, pp. 621–624 [Rus]
4. Sizov F. F. *Photoelectronics for vision systems in invisible spectrum regions*. Kyiv, Academperiodika, 2008, 459 p. [Rus]
5. Litvinenko V. M. *Physics and technology of semiconductor diodes: a monograph for specialists in the region. semiconductor technology and operation. devices*. Kherson, Vyshemymyrskyi V. S., 2018, 183 p. [Ukr]
6. Zi S. [*Semiconductor physics*]. Moscow, Mir, 1984, 456 p. [Rus]
7. Noikin Yu. M., Mahno P. V. *Physical basis of optical communication*. Rostov-on Don, YuFU, 2011, 355 p. [Rus]
8. 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. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2020, no. 5–6, pp. 16–19. <https://doi.org/10.15222/TKEA2020.5-6.16>
9. Yakushenkov Yu. G. *Essentials of the theory for optoelectronic devices design*, Moscow, Sovetskoe radio, 1971, 336 p. [Rus]
10. Sequin C. H., Tompsett M. F. *Charge Transfer Devices*. Academic Press, N.Y., 1975, 148 p.
11. Bruk V. A., Garshenin V. V., Kurnosov A. I. *Production of semiconductor devices*. Moscow, Vysshaya shkola, 2006, 264 p. [Rus]
12. Zolochevskiy Yu.B., Romanov V.P., Sokolov A. Yu. Investigation of mobile ions charge neutralization at silicon dioxide – silicon – Mo – SiO₂ – Si interface. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2016, no. 6–4, pp. 651–656. [Rus]
13. Hotra Z.Yu. *Tekhnologiya elektronnoi tehniki*. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House, 2010, vol. 1, 884 p. [Ukr]
14. GOST 17772-88. [Photodetectors. Semiconductor photoelectric and photodetector preamplifier modules. Photoelectric parameters measuring methods and characteristics determination]. [Rus]
15. Baranochnikov M. *Priyemniki i detektory izlucheniya*. *Spravochnik* [Receivers and detectors of radiation. Directory]. Moscow, “DMK Press” Publishing House, 2012.
16. PD 125K certificate. Retrieved from: <http://ckb-rhythm.narod.ru/tablpin.htm>
17. Data Sheet S15137. Retrieved from: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/index.html>
18. Data Sheet YAG-444-4. Retrieved from: <https://www.excelitas.com/product/yag-444-4-series-quadrant-photodiodes-si-pin-113mm>
19. Data Sheet QP154-Q. Retrieved from: <https://www.first-sensor.com/en/products/optical-sensors/detectors/quadrant-pin-photodiodes-qp/>

Опис статті для цитування:

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>

Cite the article as:

Kukurudziak M. S., Dobrovolsky Yu.G. High pulse responsivity silicon *p-i-n* photodiode. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 1–2, pp. 61–67. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.1-2.61>

РЕЦЕНЗЕНТИ НОМЕРА

Большакова Инеса Антонівна, докт. техн. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»

Бондаренко Олександр Федорович, канд. техн. наук, докторант НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

Глушеченко Едуард Миколайович, канд. техн. наук, начальник відділку, НПП «Сатурн», м. Київ

Должиков Володимир Васильович, докт. фіз.-мат. наук, зав. кафедрою, Харківський національний університет радіоелектроніки

Дружинін Анатолій Олександрович, докт. техн. наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка»

Кондратенко Сергій Вікторович, докт. фіз.-мат. наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Невлюдов Ігор Шакирович, докт. техн. наук, професор, зав. кафедрою, Харківський національний університет радіоелектроніки

Сафронов Павло Сергієвич, канд. техн. наук, доцент, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ