

УДК 539.2:648.75

БАГАТОПЕРЕХІДНІ КРЕМНІЄВІ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЯК СЕНСОРИ У СИСТЕМАХ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ

М. В. Кіріченко, В. Р. Копач, Р. В. Зайцев, Н. В. Куца, К. Ю. Крикун

Національний технічний університет «ХПІ»
21, вул. Фрунзе, м. Харків, 61002, Україна
e-mail: kirichenko_mv@mail.ru

БАГАТОПЕРЕХІДНІ КРЕМНІЄВІ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЯК СЕНСОРИ У СИСТЕМАХ ОПТИЧНОЇ ЛОКАЦІЇ

М. В. Кіріченко, В. Р. Копач, Р. В. Зайцев, Н. В. Куца, К. Ю. Крикун

Анотація. Наведені результати експериментального та теоретичного дослідження можливості використання багатоперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) як сенсорів у системах оптичної локації. Експериментально встановлено, що досліджуваним багатоперехідним ФЕП притаманний лінійний характер спаду залежності напруги холостого ходу $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ та струму короткого замикання $J_{KЗ}^{норм}(\alpha)$ зі збільшенням величини кута α надходження випромінювання до їх фотоприймальної поверхні. Запропоновані напрямки подальшого удосконалення конструкції багатоперехідних ФЕП, реалізація яких дозволить полегшити реєстрацію сигналу від сенсора вимірювальним приладом та більш гнучко керувати характером спаду залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ за рахунок спрямованого регулювання часу життя неосновних носіїв заряду у базових кристалах.

Ключові слова: фотоперетворювач, рефлектор, кут падіння світла, коефіцієнт відбиття, параметри

MULTIJUNCTION SILICON PHOTOCONVERTERS AS SENSORS IN OPTICAL LOCATION SYSTEMS

M. V. Kirichenko, V. R. Kopach, R. V. Zaitsev, N. V. Kucaya, K. U. Krikun

Abstract. The results of theoretical and experimental researches of using multijunction silicon photo-voltaic converters (PVC) as sensors in optical location systems are presented. It is established, that investigated multijunction PVC has linear character of for increase of PVC efficiency is necessary to achieve the increased values of minority charge carriers lifetime in their base crystals and reflection coefficient from metal/Si interfaces inside multijunction PVC, while for using such PVC in systems for direction of radiation propagation determination the forced reduction of these values is reasonable.

Keywords: photoconverter, reflector, light incidence angle, reflection coefficient, parameters

МНОГОПЕРЕХОДНЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КАК СЕНСОРЫ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ

М. В. Кириченко, В. Р. Копач, Р. В. Зайцев, Н. В. Куца, К. Ю. Крикун

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований возможности использования многопереходных кремниевых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) как сенсоров в системах оптической локации. Экспериментально уста-

новлено, что исследованным многопереходным ФЭП присущ линейный характер спада зависимости напряжения холостого хода $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ и тока короткого замыкания $J_{КЗ}^{норм}(\alpha)$ с увеличением величины угла α поступления излучения на их фотоприемную поверхность. Предложены направления дальнейшего усовершенствования конструкции многопереходных ФЭП, реализация которых позволит облегчить регистрацию сигнала от сенсора измерительным прибором и более гибко управлять характером спада зависимости $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ за счет целенаправленного регулирования времени жизни неосновных носителей заряда в базовых кристаллах.

Ключевые слова: фотопреобразователь, рефлектор, угол падения света, коэффициент отражения, параметры

Вступ

Попередні дослідження чутливості багатоперехідних кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (БП Si-ФЕП) з вертикальними діодними комірками (ВДК) до кута α надходження сонячного випромінювання відносно їх фотоприймальної поверхні показали [1], що на характер залежності напруги холостого ходу U_{XX} таких приладів від α визначальний вплив справляє час життя неосновних носіїв заряду $\tau_{n,p}$ у базовому кристалі Si-ФЕП, а коефіцієнт відбиття R від меж метал/Si всередині Si-ФЕП впливає на величину U_{XX} . Теоретично обґрунтована при цьому можливість реалізації для БП Si-ФЕП практично лінійної залежності $U_{XX}(\alpha)$ надає перспективності використанню подібних приладів у якості енергонезалежних сенсорів в системах оптичної локації. Такі сенсори, на відміну від традиційних, не потребують зовнішнього джерела енергії, а при використанні плівкових рефлекторів Al/n⁺-ІТО на вертикальних межах ВДК технологічно цілком досяжною є величина R на рівні до 90 %, що забезпечить збереження основної переваги БП Si-ФЕП — високих значень U_{XX} та суттєво полегшить реєстрацію корисного сигналу від таких сенсорів. Використання n⁺-ІТО ще й у якості бар'єроутворюючого матеріалу є шляхом і до спрощення технології виготовлення БП Si-ФЕП за рахунок відмови від термодифузійного формування випрямляючих p-n переходів всередині ВДК.

Тому з урахуванням вищевикладеного метою даної роботи було визначення реальної можливості використання БП Si-ФЕП як сенсорів нової генерації для систем оптичної локації шляхом експериментального дослідження залежності $U_{XX}(\alpha)$ та густини струму короткого замикання $J_{КЗ}(\alpha)$ виготовлених нами БП

Si-ФЕП на основі ВДК зі структурою Al/n⁺-ІТО/p-Si/p⁺-Si:Al/n⁺-ІТО/Al.

1. Об'єкти та методи дослідження

У зв'язку з викладеним було виготовлено серію зразків ВДК на основі пластин кремнію марки КДБ-7,5 товщиною 150 ± 20 мкм та діаметром 44 мм, на поверхнях яких методом магнетронного розпилення та термовакуумного осадження послідовно формувались шари ІТО та Al товщиною близько 0,5 мкм. Для запобігання утворенню зустрічно увімкнених бар'єрів Шоттки одна з поверхонь пластин перед нанесенням ІТО додатково підлеговувалась Al. Вирізані з таких пластин ВДК із планарними розмірами 6 мм × 2 мм зістиковувались по 10 штук у БП Si-ФЕП із площею фотоприймальної поверхні 10 мм².

Схематичне зображення вертикального перерізу досліджуваних ФЕП відповідає наведеному на рисунку 1.

Визначення величин густини струму короткого замикання $J_{КЗ}$ та напруги холостого ходу U_{XX} досліджуваних ФЕП проводилось шляхом вимірювання та наступного аналітичного опрацювання навантажувальних світлових вольт-амперних характеристик (НС ВАХ).

Режим випромінювання АМ0 аналогічно до [2] імітувався ксеноновою лампою-спалахом. Ступінь концентрації випромінювання на фотоприймальній поверхні ФЕП складав 160. Для зміни кута α досліджуваний БП Si-ФЕП встановлювався на гоніометричному пристрої, що дозволяв змінювати цей кут в межах від 0° до 360° з точністю до 0,01°. Вимірювання НС ВАХ проводилось у діапазоні кутів α від 0° до 75° з кроком 5° при освітленні спочатку випрямляючого, а потім ізотипного переходів досліджу-

ваних ФЕП. Такий вибір діапазону кутів α обумовлений тим, що при перевищенні куту α величини кута Брюстера, що складає $74,5^\circ$ для кремнію, вирішальний вплив на кутові залежності вихідних параметрів ФЕП починає справляти різко зростаючий коефіцієнт відбиття від фронтальної поверхні ФЕП, а не особливості його конструкції. Температура зразків 25°C під час вимірювання НС ВАХ підтримувалась за допомогою термостату. Аналітичне опрацювання НС ВАХ здійснювалось подібно до [3].

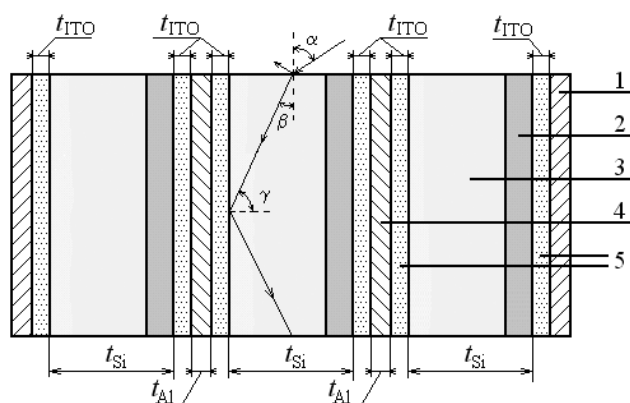


Рис. 1. Схематичне зображення перерізу БП Si-ФЕП з рефлекторами з ІТО у складі ВДК з бар'єрами Шоттки: 1 — суцільний металевий електрод; 2 — шар кремнію p^+ -типу провідності товщиною менше 1 мкм; 3 — шар кремнію p -типу провідності товщиною $t_{Si} \approx 160$ мкм; 4 — прошарок алюмінію товщиною $t_{Al} \approx 0,5$ мкм; 5 — рефлектори з ІТО товщиною $t_{ITO} \approx 0,5$ мкм

2. Результати та їх обговорення

Залежності $U_{XX}^{norm}(\alpha)$ при опромінюванні як випрямляючого, так і p^+ - p переходу БП Si-ФЕП нової генерації, розраховані за експериментальними даними у такий спосіб:

$$U_{XX}^{norm}(\alpha) = \frac{U_{XX}(\alpha)}{U_{XX}(\alpha=0)}, \text{ — представлено на рисунку 2а.}$$

Залежності $J_{KZ}^{norm}(\alpha)$ при опромінюванні як випрямляючого, так і p^+ - p переходу БП Si-ФЕП нової генерації, розраховані за експериментальними даними величин у такий спосіб:

$$J_{KZ}^{norm}(\alpha) = \frac{J_{KZ}(\alpha)}{J_{KZ}(\alpha=0)} \text{ — представлено на рисунку 2б.}$$

Розраховані за методикою, описаною у [5], кутові залежності коефіцієнтів оптичного відбиття R_1 та R_2 від меж розділу метал/Si для БП Si-ФЕП нової генерації наведено на рисунку 3. Як видно з рисунку 2а, дослідженим приладам

притаманний лінійний характер спаду залежності $U_{XX}^{norm}(\alpha)$ зі збільшенням величини кута α , причому практично відсутня різниця між характером спаду $U_{XX}^{norm}(\alpha)$ при опроміненні випрямляючого та p^+ - p -переходів. Аналогічний характер спаду — лінійний, мають і залежності $J_{KZ}^{norm}(\alpha)$ (рисунк 2б), причому для них також спостерігається практична відсутність різниці між характером спаду $J_{KZ}^{norm}(\alpha)$ при опроміненні випрямляючого та p^+ - p -переходів.

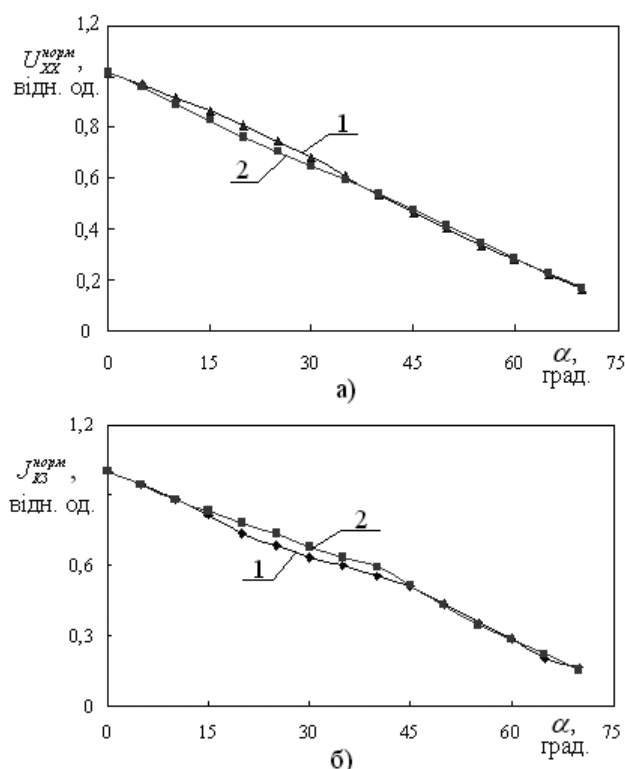


Рис. 2. Залежності $U_{XX}^{norm}(\alpha)$ (а) та $J_{KZ}^{norm}(\alpha)$ (б) у випадках опромінення БП Si-ФЕП нової генерації з боку p^+ - p переходу (1) та з боку випрямляючого переходу (2)

У порівнянні з цим для БП Si-ФЕП першої генерації, згідно з [1], залежність $U_{XX}^{norm}(\alpha)$ практично не зазнає спаду аж до досягнення значень кутів α , що відповідають куту Брюстера для кремнію. Залежність $J_{KZ}^{norm}(\alpha)$ для БП Si-ФЕП першої генерації добре описується тригонометричною функцією $\cos\alpha$, хоча цій залежності і притаманна помітна розбіжність у характері спаду при опроміненні ФЕП з боку p^+ - p переходу та з боку n^+ - p переходу.

З рисунку 3 видно, що для БП Si-ФЕП нової генерації характерна незначна різниця у значеннях коефіцієнтів оптичного відбиття R_1 та R_2 при опроміненні з боку випрямляючого чи

p^+ -р переходу. Значення коефіцієнтів оптичного відбиття R_1 та R_2 знаходяться на рівні не менше 55 %, причому на залежностях $R_{1,2}(\alpha)$ спостерігається максимум при величині $\alpha = 45^\circ$, наявність якого може бути обумовлена тим, що, як вже згадувалось, через технологічні причини товщина шару ІТО у ІТО/Al рефлекторах на вертикальних границях діодних комірок складає 0,3 мкм замість теоретично обґрунтованих 1–2 мкм. Вірогідно дана обставина і обумовлює таку специфіку траєкторії світлових променів у ІТО/Al рефлекторах на вертикальних границях діодних комірок, при якій на залежностях $R_{1,2}(\alpha)$ спостерігається максимум.

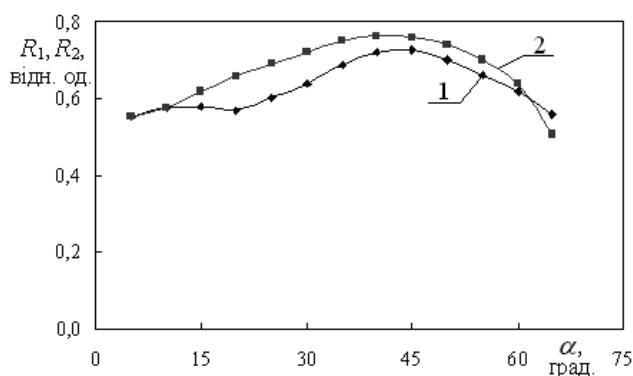


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів оптичного відбиття від кута α у випадках опромінення БП Si-ФЕП нової генерації з боку p^+ -р переходу — R_1 (1) та з боку випрямляючого переходу — R_2 (2)

Аналіз вищевикладеного підтверджує, що спостережений лінійний характер спаду залежностей $J_{K3}^{норм}(\alpha)$ та $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ робить перспективним використання досліджуваного приладу як сенсора у системах оптичної локації. Причому, згідно з результатами досліджень доцільним є зосередження уваги саме на залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$, оскільки вихідна величина U_{XX} при $\alpha = 0$ для досліджуваних БП Si-ФЕП знаходиться на рівні 1,3 В в умовах опромінення АМ0, у той час, як величина J_{K3} у цих же умовах опромінення не перевищує десятків мікроампер. Тому обрання реєструємим параметром саме U_{XX} дозволить спростити вимірювальну схему за рахунок або повної відмови від підсилюючих сигнал приладів, або їх суттєвого спрощення через відсутність необхідності істотного (у десятки та тисячі разів у випадку реєстрації J_{K3}) підсилення сигналу, що реєструється.

Експериментальні результати даної роботи добре співпадають з наведеними на рисунку 4

результатами чисельного моделювання залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha) \approx 1 + \frac{\ln[f(R, \alpha) \cos \alpha]}{2,3 \Delta \xi}$ одержаними у [1]. При порівнянні рисунків 2а та 4 видно, що експериментальна залежність $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ якісно повторює залежність $U_{XX}^{норм}(\alpha, \Delta \xi)$ при $R = 0,6$ та $\Delta \xi = 1-2$.

Як видно з рисунку 4, величина $R = 0,6$, що практично досягнута у досліджених БП Si-ФЕП є цілком прийнятною з точки зору забезпечення легкості реєстрації залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$, оскільки у даному випадку значення $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ лише на 20 % менші, ніж при $R = 1,0$. Користуючись цими результатами роботи [1] можна пояснити наявність у досліджуваних БП Si-ФЕП лінійної залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ у такий спосіб.

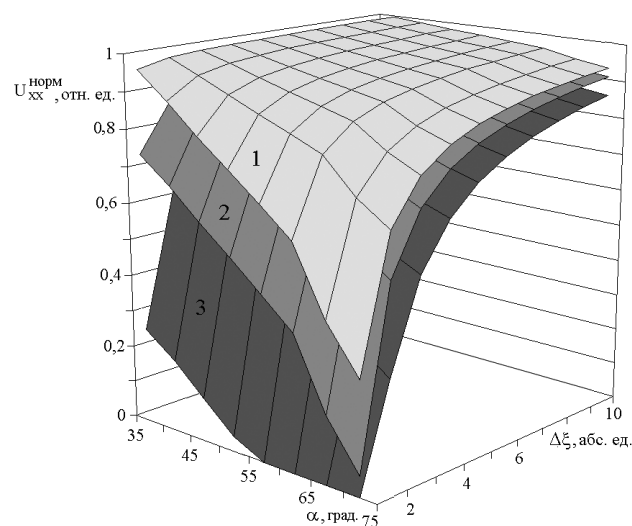


Рис. 4. Теоретичні значення $U_{XX}^{норм}$ в залежності від α та $\Delta \xi$ для БП Si-ФЕП при значеннях коефіцієнта відбиття світла від меж метал/кремній: 1 — $R = 1$; 2 — $R = 0,6$; 3 — $R = 0,2$

Як видно з рисунку 4, ситуація з лінійною або квазілінійною залежністю $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ реалізується у випадку, коли $\Delta \xi = 1-2$, тобто коли густина діодного струму насичення та густина фотоструму приладу відрізняються не більше, ніж на два порядки величини. А, оскільки для виготовлення досліджуваних БП Si-ФЕП було обрано такі екземпляри ВДК, що мали J_0 на рівні $10^{-6}-10^{-8}$ А/см², при тому, що величини J_{K3} , а отже і J_ϕ досліджуваних приладів не перевищували $10^{-5}-10^{-6}$ А/см², то у даному випадку реалізувалася саме ця ситуація, завдяки чому і реалізується лінійний характер залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$.

Відповідно до вищевикладеного можна заключити, що на даному етапі технологічної еволюції БП Si-ФЕП нової генерації можуть бути використаними як сенсори у системах оптичної локації. Втім слід зазначити, що роботи, спрямовані на зниження діодного струму насичення і збільшення фотоструму та максимального наближення до одиниці коефіцієнтів відбиття світла вертикальними межами діодних комірок, не будуть зайвими і в разі використання даного приладу як сенсора. Так, наближення до одиниці коефіцієнтів відбиття світла вертикальними межами діодних комірок дозволить полегшити реєстрацію сигналу від сенсора вимірювальним приладом. А оптимізація діодної структури такого сенсору дозволить більш гнучко керувати характером спаду залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ за рахунок спрямованого регулювання часу життя неосновних носіїв заряду.

Висновки

Результати експериментального та теоретичного дослідження можливості використання БП Si-ФЕП як сенсорів у системах оптичної локації показали, що для таких приладів на характер залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ визначальний вплив справляє величина часу життя неосновних носіїв заряду $\tau_{n,p}$ у базовому кристалі ФЕП, у той час як коефіцієнт відбиття R від меж метал/Si всередині ФЕП впливає на абсолютну величину U_{XX} . Показано, що цілеспрямоване заниження величини $\tau_{n,p}$ та підвищення величини R дозволить створити БП Si-ФЕП із практично лінійною та легко реєструємою залежністю $U_{XX}^{норм}(\alpha)$. Експериментально встановлено, що досліджуваним БП Si-ФЕП нової генерації притаманний лінійний характер спаду залежності напруги холостого ходу $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ та струму короткого замикання $J_{KЗ}^{норм}(\alpha)$ зі збільшенням

величини кута α . Показано, що для досліджуваних БП Si-ФЕП практично відсутня різниця між характером спаду $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ та $J_{KЗ}^{норм}(\alpha)$ у випадку опромінення випрямляючого чи p^+ - p переходу. Це в свою чергу пов'язано з незначною різницею значень коефіцієнтів оптичного відбиття R_1 при опроміненні з боку p^+ - p переходу та R_2 — з боку випрямляючого переходу, котра не перевищує 17 %.

Вищезазначене дозволяє стверджувати, що БП Si-ФЕП нової генерації, подібні до досліджуваних, можуть бути використані як сенсори у системах оптичної локації.

Запропоновані напрямки подальшого удосконалення конструкції БП Si-ФЕП нової генерації, реалізація яких дозволить полегшити реєстрацію сигналу від сенсора вимірювальним приладом та більш гнучко керувати характером спаду залежності $U_{XX}^{норм}(\alpha)$ за рахунок спрямованого регулювання часу життя неосновних носіїв заряду у базових кристалах шляхом створення додаткових рекомбінаційних центрів.

Література

1. Kirichenko M. V., Kopach V. R., Zaitsev R. V., et al. Sensitivity of silicon photovoltaic converters to the light incidence angle on their receiving surface // *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. — 2009. — No. 3. — P. 22–26
2. Keogh W., Cuevas A. Simple flashlamp I-V testing of solar cells // *Proceedings. 26th Photovoltaic Solar Energy Conference, Anaheim, CA.* — 1997. — P. 199–202.
3. E. Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens, *Proc. 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference (Barcelona, Spain, 1997)*, p. 2438.
4. Kopach V. R., Kirichenko M. V., Shramko S. V., et al. / New approach to the efficiency increase problem for multi-junction silicon photovoltaic converters with vertical diode cells // *Functional Materials*. — 2008. — Vol. 15. — No. 2. — P. 253–258.