

А.В. ГЕТЬМАН, Р.М. КОРКІШКО, В.П. КОСТИЛЬОВ, д-р физ.-мат. наук

ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНІЄВИХ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Вступ

Стрімкий розвиток напівпровідникової техніки і мікроелектроніки, обчислювальної техніки, інформатики, телекомунікаційних технологій в значній мірі сприяли тому, що в зарубіжних космічних програмах все більшу питому вагу з середини вісімдесятих років почали набувати малі космічні апарати класу мікросупутник, здатні вирішувати більшість традиційних задач космонавтики, спрямованих на проведення наукових досліджень, дистанційне зондування Землі, вивчення природних ресурсів, розвиток електрозв'язку, інформатики, телекомунікацій, космічної навігації, набагато простішими і дешевшими засобами, ніж раніше. Останнім часом набирає популярності розробка космічних апаратів класу наносупутник, з габаритними розмірами $10 \times 10 \times 10$ см і вагою до 1,33 кг (стандарт CubeSat, розроблений на факультеті аеронавтики й астронавтики Стенфордського університету). Природньо, що вимоги до техніко-економічних показників і надійності систем енергозабезпечення космічних апаратів нового покоління стали більш жорсткими і вибагливими, особливо в частині їх питомої енерговіддачі на одиницю маси, надійності, ресурсу роботи, масо-габаритних параметрів. Первинним джерелом енергії для космічних апаратів залишаються фотоелектричні панелі на основі напівпровідникових фотоперетворювачів сонячної енергії, зокрема кремнію та арсеніду галію.

У цій роботі детально досліджено в широкому діапазоні зміни рівня освітленості вольт-амперні (ВАХ) та спектральні характеристики фотоперетворювачів (ФП) космічного призначення на основі монокристалічного кремнію. ФП призначені для комплектації фотоелектричних панелей першого українського студентського телекомунікаційного наносупутника у форматі CubeSat – PolyITAN-1 [1 – 4], запущеного на орбіту 19 червня 2014 року ракетою-носієм «Дніпро».

Визначено основні фотоенергетичні параметри ФП в умовах АМ0 та параметри еквівалентної схеми. Визначено також ефективну довжину дифузії неосновних носіїв заряду в базі ФП із спектральної залежності квантової ефективності. Показано, що фотоперетворювачі характеризуються високими значеннями струму короткого замикання та напруги розімкненого кола, коефіцієнта заповнення, низькими значеннями послідовного та великими значеннями шунтуючого опорів, що забезпечує високі експлуатаційні параметри фотоелектричних панелей супутника PolyITAN-1. Визначено напрями подальших робіт для покращення експлуатаційних параметрів ФП.

Зразки і методика досліджень

Зразки ФП були розроблені і виготовлені молодими науковцями та інженерами факультету електроніки НТУУ «КПІ» [3]. Як відомо, у реальних СЕ основними джерелами втрат є: оптичні втрати на відбивання і неповне поглинання світла, рекомбінаційні втрати в базовій області і легованих n^+ – і p^+ – шарах, рекомбінаційні втрати на фотоприймальній поверхні, під контактами й в області об'ємного заряду, омичні втрати на опорах базової області і контактних шин металевих електродів.

Основна увага приділялася розробці такого технологічного процесу виготовлення ФП, що забезпечував би істотне підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) за рахунок зменшення оптичних і рекомбінаційних втрат енергії, а саме:

- текстурування і просвітлення фронтальної (освітлюваної) поверхні;
- зменшення глибини залягання збираючого n^+ - p - переходу;

- оптимізації профілю розподілу домішок у високолегованій області n^+ - p -переходу і зменшення швидкості поверхневої рекомбінації на її освітлюваній поверхні;
- створення ізотипного p - p^+ переходу на тильній поверхні, що знижує ефективну швидкість рекомбінації неосновних носіїв струму поблизу неосвітлюваного струмоз'ємного електрода;
- оптимізації характеристик верхнього і нижнього струмоз'ємних електродів вибором їхньої раціональної топології;
- зниження рекомбінаційних втрат на контактах зменшенням площі контактних площадок.

При розробці ФП враховані також результати оптимізації конструктивно-технологічних параметрів. З метою отримання високих значень часу життя неосновних носіїв заряду у базі використані пластини, вирізані з зливків високочистого кремнію p -типу провідності марки КДБ-3-9 з орієнтацією (100), питомим опором близько 3 Ом·см, що відповідає концентрації легуючої домішки (бору) $N_a = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Глибина залягання розділяючого p - n -переходу обрана $x_n = (0,6-0,8) \cdot 10^{-4} \text{ см}$, рівень легування емітера фосфором $N_d = 10^{19}-10^{20} \text{ см}^{-3}$, товщина ФП становила $1,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}$. Топологія верхньої контактної металізації являє собою систему паралельних смужок, з'єднаних більш товстими замикаючими шинами, що проходять через їх середини та біля країв, причому ступінь затінення поверхні становила менше 7%. Для зменшення втрат на відбивання на фронтальній поверхні був створений пірамідальний рельєф методом спонтанного текстурування в водному розчині гідроксиду калію КОН з додаванням ізопропилового спирту і нанесено одношарове антивідбиваюче покриття із суміші оксидів індію та олова (ІТО) товщиною 75 – 80 нм і показником заломлення $n = 1.96$. Оскільки ІТО є прозорим провідним оксидом [4 – 6], то окрім зменшення коефіцієнта відбивання від поверхні ФП ще одночасно забезпечувалось зменшення величини його послідовного опору R_s . Геометричні розміри ФП складали $3.2 \times 3.2 \text{ см}^2$.

Зовнішній вигляд розроблених високоефективних ФП на основі монокристалічного кремнію зі структурою n^+ - p - p^+ , при розробці технологічного маршруту виготовлення яких були використані перераховані вище операції, наведено на рис. 1.

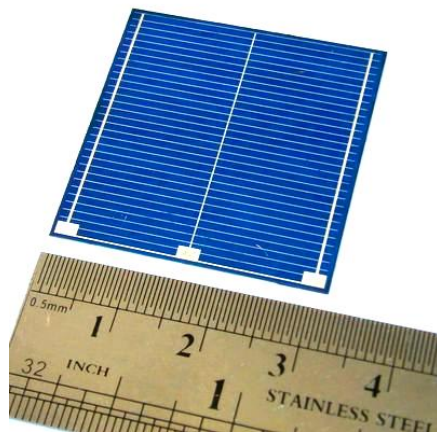


Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджених ФП

На описаних зразках ФП досліджувалися світлові вольт-амперні характеристики (СВАХ) в стандартних умовах АМ0 при енергетичній освітленості поверхні ФП $1365 - 1380 \text{ Вт/м}^2$ і температурі $T = 25^\circ\text{C}$, залежності фотоструму короткого замикання $I_{\text{кз}}$ від напруги розімкненого кола $V_{\text{рк}}$ при зміні рівня енергетичної освітленості в діапазоні від $2 \cdot 10^{-4}$ до 2000 Вт/м^2 . спектральні залежності фотоструму короткого замикання і зовнішньої квантової ефективності EQE в діапазоні довжин хвиль $400 - 1200 \text{ нм}$, які вимірювались в режимі автоматичного підтримання постійного рівня монохроматичної енергетичної

освітленості зразка або постійного рівня падаючого на його поверхню потоку квантів. Також було досліджено температурні коефіцієнти фотоелектричних параметрів – напруги розімкненого кола, струму короткого замикання, коефіцієнта форми СВАХ FF та коефіцієнта корисної дії в температурному діапазоні 25 – 60°C.

Дослідження характеристик ФП проводилось на стендовій базі Центру випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. Центр випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних є єдиною в Україні атестованою Державним підприємством УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ на підставі Закону України „Про метрологію і метрологічну діяльність” вимірювальною лабораторією, акредитованою на технічну компетентність і незалежність з правом проведення вимірювань фотоелектричних, фотоенергетичних, фототехнічних і спектральних характеристик сонячних елементів, модулів і батарей [7].

Стендова база Центру дозволяє проводити випробування з використанням як штучних імітаторів сонячного випромінювання, так і в натурних умовах при природному сонячному освітленні і являє собою унікальне метрологічно атестоване обладнання, розроблене і виготовлене спеціалістами Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України та Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з дослідним виробництвом Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України.

Результати досліджень і їх обговорення

Типові світлові вольтамперні характеристики (СВАХ) виготовлених за розробленою технологією ФП для позаатмосферних умов АМ0 (Енергетична освітленість $E = 1370 \text{ Вт/м}^2$, температура $T = 25^\circ\text{C}$) наведені на рис. 2.

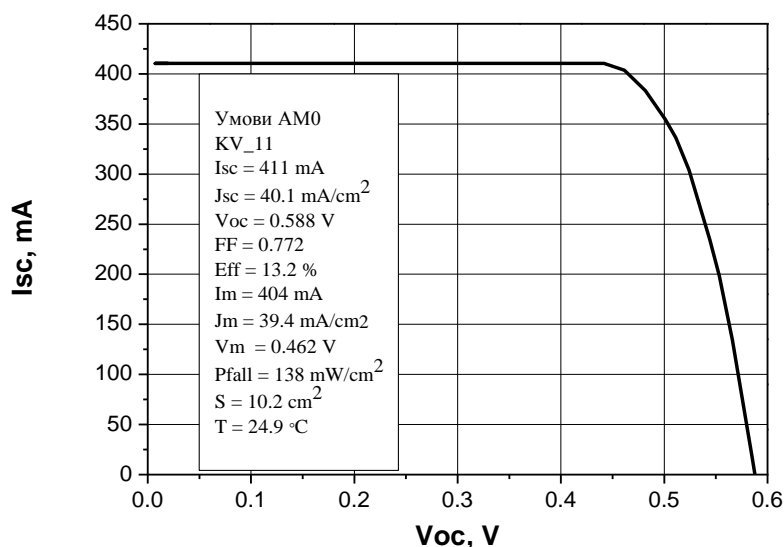


Рис. 2. Світлова вольт-амперна характеристика і фотоенергетичні параметри (в рамці) зразка KV_11

З представлених на рис. 2 даних можна бачити, що розроблені ФП в умовах АМ0 характеризуються високими фотоенергетичними параметрами: густиною струму короткого замикання $I_{кз} = 40,1 \text{ мА/см}^2$; напругою розімкненого кола $V_{рк} = 0,590 \text{ В}$; коефіцієнтом заповнення СВАХ $K = 0,772$; питомою електричною потужністю у навантаженні $P_{ел} = 180 - 190 \text{ Вт/м}^2$, коефіцієнтом корисної дії ККД = 13 – 14%. Послідовний опір, визначений методом двох інтенсивностей, складає $R_s = 0,86 \text{ Ом/см}^2$ і вказує на необхідність оптимізації топології контактної сітки і рівня легування емітера .

Спектральні залежності ампер-ватної фоточутливості I_{photo} (крива 1) і зовнішнього квантового виходу EQE (кількість зібраних електронно-діркових пар на один квант падаючого світла – крива 2) досліджених ФП наведені на рис. 3.

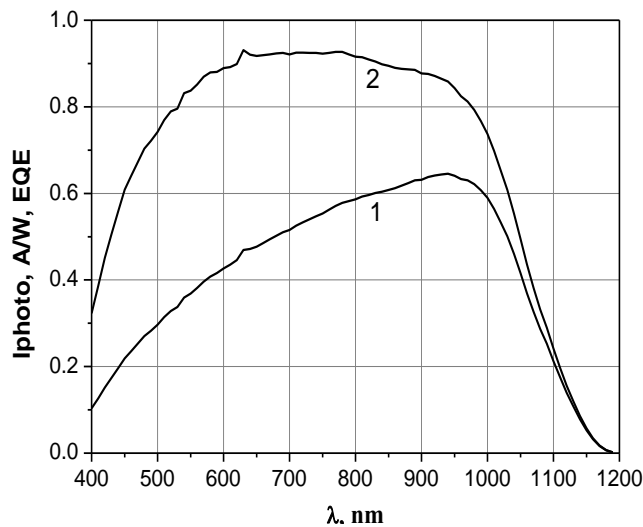


Рис. 3. Спектральні залежності ампер-ватної фоточутливості I_{photo} (1) і зовнішнього квантового виходу EQE (2) зразка KV_11

З представлених даних можна бачити, що розроблені ФП характеризуються високими значеннями зовнішнього квантового виходу в широкій спектральній області 500 – 1100 нм. Ефективна довжина дифузії неосновних надлишкових носіїв заряду в базі, визначена з спектральних залежностей внутрішнього квантового виходу, склала близько 600 мкм, що відповідає часам життя надлишкових носіїв заряду близько 120 мікросекунд. Це свідчить про низькі рекомбінаційні втрати в базовій області і високу якість ФП. Разом із тим, необхідно відзначити, що має місце помітний спад зовнішнього квантового виходу в короткохвильовій області для довжин хвиль $\lambda < 500$ нм, обумовлений як рекомбінаційними втратами на фронтальній поверхні (поверхнева та Оже рекомбінація), так і оптичними втратами на відбивання. Оптимізація товщини і рівня легування фронтальної n^+ – області дозволить зменшити рівень ефективною поверхневою рекомбінації і підвищити струм короткого замикання і напругу розімкненого кола [8 – 10].

На рис. 4 представлені залежності струму короткого замикання $I_{кз}$ від напруги розімкненого кола $V_{рк}$, виміряні при зміні рівня освітленості в межах 7 порядків – від $2 \cdot 10^{-4}$ до 2000 Вт/м^2 (точки) і результати підгонки двохекспоненціальної теоретичної моделі (1) під експериментальні дані (лінія).

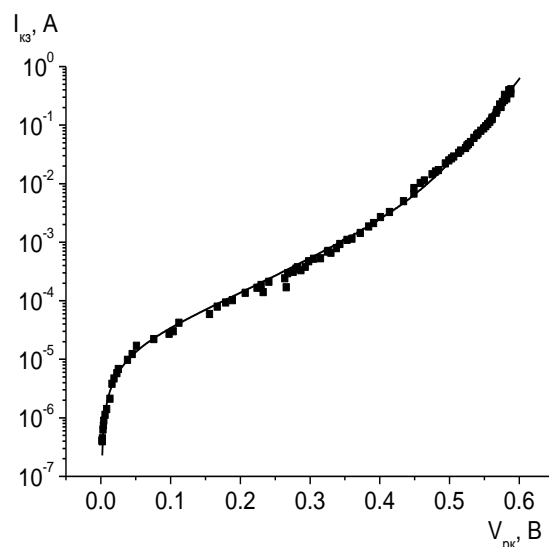


Рис. 4. Залежність $I_{кз}$ від $V_{рк}$, зразок KV_11. Точки – експериментальні значення, лінія – теоретична модель

$$I = I_{\phi} - I_{01} \left[\exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A_1 \cdot kT}\right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp\left(\frac{q(V + I \cdot R_s)}{A_2 \cdot kT}\right) - 1 \right] - \frac{I \cdot R_s + V}{R_{sh}} \quad (1)$$

Тут I_{ϕ} – фотострум, I_{01} , I_{02} – струми насичення зворотно-зміщеного $p-n$ -переходу, A_1 і A_2 – фактори неідеальності $p-n$ -переходу, R_{sh} і R_s – шунтуючий і послідовний опір ФП, k – стала Больцмана, q – заряд електрона, T – абсолютна температура, I, V – струм і напруга на контактах ФП.

Підгонка теоретичної залежності під експериментальні дані дозволила визначити параметри еквівалентної схеми ФП: $R_{sh} = 7754$ Ом, $A_1=1,05$, $A_2=2,714$, $I_{01}=1,34 \cdot 10^{-10}$ А, $I_{02}=6,818 \cdot 10^{-6}$ А. Необхідно відзначити велике значення шунтуючого опору, що сприятиме ефективній роботі ФП при зміні рівня освітленості в широких межах. Про високу якість $p-n$ -переходу ФП свідчать також значення факторів неідеальності $A_1=1,05$ та $A_2=2,714$, близькі до ідеальних значень 1,0 для дифузійної компоненти струму (база) та 2,0 для рекомбінаційної (область просторового заряду).

Важливими параметрами для ФП є температурні коефіцієнти (ТК) їх основних фотоенергетичних параметрів, оскільки робоча температура ФП може сильно відрізнятись від температури $T=25^{\circ}\text{C}$, яка прийнята для стандартних умов випробувань. Особливо сказане стосується ФП космічного призначення, для яких в умовах космічного простору є тільки один механізм охолодження – випромінювання на відміну від наземних ФП, які більш ефективно охолоджуються за рахунок додаткового механізму – конвекційного. Тому нами були проведені дослідження і визначені температурні коефіцієнти напруги розімкненого кола, струму короткого замикання, коефіцієнта форми СВАХ та ККД ФП. Результати цих досліджень узагальнені в таблиці і на рис. 5, де точками показано експериментальні дані, а лінії – регресійні залежності. Можна зробити висновок, що напруга розімкненого кола спадає зі швидкістю $-2,13910 \cdot 10^{-3}$ В/К, а струм короткого замикання – зростає зі швидкістю $0,758 \cdot 10^{-3}$ А/К. Температурний коефіцієнт коефіцієнта форми СВАХ дорівнює $-0,0012 \text{ K}^{-1}$, а ККД – відповідно $-0,053\%/K$.

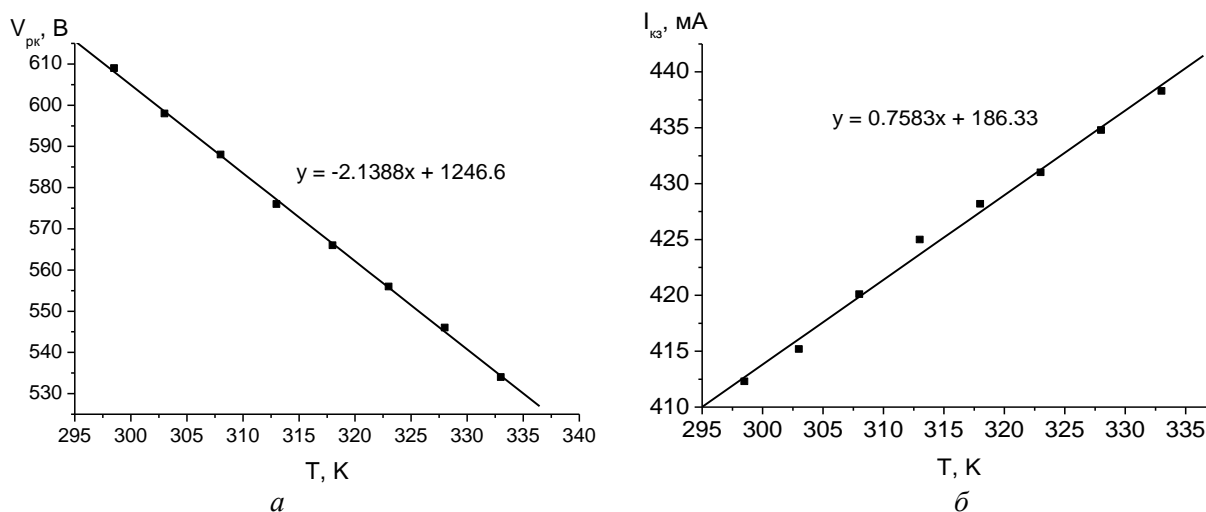


Рис. 5. Залежність напруги розімкненого кола (а) та струму короткого замикання (б) від температури зразка ФП KV_11

ТК $V_{\text{рк}}$, В/К	ТК $I_{\text{кз}}$, А/К	ТК FF 1/К	ТК ККД, %/К
$-2,13910 \cdot 10^{-3}$	$0,758 \cdot 10^{-3}$	-0,0012	-0,053%

З отриманих даних випливає, що при температурі $T = 70^{\circ}\text{C}$ (343 К), яка приблизно відповідає робочій температурі ФП на навколосемній орбіті при освітленості 1360 Вт/м^2 ККД ФП буде складати значення 11,5%.

Висновки

Детально досліджено в широкому діапазоні зміни рівня освітленості вольт-амперні (ВАХ) та спектральні характеристики ФП космічного призначення на основі монокристалічного кремнію. Досліджено також температурні коефіцієнти основних фотоенергетичних параметрів ФП.

Визначено основні фотоенергетичні параметри ФП в умовах АМ0 та параметри еквівалентної схеми. Визначено також ефективну довжину дифузії неосновних носіїв заряду в базі ФП із спектральної залежності квантової ефективності. Показано, що фотоперетворювачі характеризуються високими значеннями струму короткого замикання та напруги розімкненого кола, коефіцієнта заповнення, низькими значеннями послідовного та великими значеннями шунтуючого опорів, що забезпечує високі експлуатаційні параметри ФП. Разом із тим, оптимізація топології контактної сітки, рівня легування і глибини залягання p^+ – шару дозволить підвищити ККД ФП.

Список літератури: 1. <https://uk.wikipedia.org/wiki/PolyITAN-1>. 2. <http://polyitan-1.blogspot.com/> 3. http://censor.net.ua/resonance/296893/pervyyi_ukrainskiyi_nanosputnik_polyitan1_nauchnyyi_podvig_laboratorii_kpi 4. *Rupprecht, G.* Untersuchungen der elektrischen und lichtelektrischen Leitfähigkeit dünner Indiumoxydschichten // *Z. Phys.* – 1954. – V.139. №5. – P. 504-517. 5. *Balasubramanian, N. and Subrahmanyan, A.* Electrical and Optical Properties of Reactively Evaporated Indium Tin Oxide (ITO) Films – Dependence on Substrate Temperature and Tin Concentration // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 1989. – V. 22. – P. 206 – 209. 6. *Fan, J. C. C. and Goodenough, J. B.* X-Ray Photoemission Spectroscopy Studies of Sn doped Indium Oxide Films // *Journal of Applied Physics.* – 1977. – V.48. №8. – P. 3524 – 3531. 7. *Свідоцтво №ПТ-432/14* про атестацію Центра випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. Видане 08.12. 2014р. ДП «Укрметртестстандарт». 2014. 8. *Sachenko, A.V., Shkrebtii, A.I., Korkishko, R.M., Kostylyov, V.P., Kulish, N.R., Sokolovskyi, I.O.* Features of Photoconversion in Highly Efficient Silicon Solar Cells // *Semiconductors.* – 2015. – V. 49. №. 2. – pp. 264–269. 9. *Korkishko, R.M., Kostylyov, V.P., Prima, N.A. et al.* Analysis of features of recombination mechanisms in silicon solar cells // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* – 2014. – V. 17. N 1. – P. 14-20. 10. *Sachenko, A.V., Kostylyov, V.P., Kulish, M.R. et al.* New formalism for selfconsistent parameters optimization of highly efficient solar cells // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.* – 2014. – V. 17. N 2. – P. 134 -148.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»;
Інститут фізики напівпровідників
імені В.Є. Лашкарьова НАН України

Надійшла до редколегії 05.11.2015