

ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 621.315.592

МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ З НЕОМІЧНИМ ТИЛОВИМ КОНТАКТОМ

А. П. Горбань, В. П. Костильов, А. В. Саченко, В. В. Черненко

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України
Проспект Науки, 41, Київ, 03028, Україна
тел/факс +38 (044) 525-5788, тел. +38 (044) 525-5734 і 525-5043,
e-mail: apg38@svitonline.com, kost@isp.kiev.ua, sach@isp.kiev.ua, vvch@isp.kiev.ua

МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КРЕМНІЄВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ З НЕОМІЧНИМ ТИЛОВИМ КОНТАКТОМ

А. П. Горбань, В. П. Костильов, А. В. Саченко, В. В. Черненко

Анотація. Проведене експериментальне і теоретичне моделювання нерівноважних фотоелектричних процесів в дифузійних кремнієвих сонячних елементах (СЕ) з немонотонними (з максимумом) залежностями напруги розімкненого кола V_{oc} від енергетичної освітленості P_L , які виникають в умовах, коли під тиловим металевим електродом СЕ існує шар виснаження або інверсії. Експериментальне моделювання проводилось за допомогою двох близьких за параметрами ввімкнених назустріч один одному СЕ, один з яких частково затінювався. Показано, що експериментально отримані залежності $V_{oc}(P_L)$ для запропонованої моделі є кривими з максимумом. Розрахунки залежностей $V_{oc}(P_L)$, виконані на основі теоретичної двох-експоненціальної моделі, добре співпадають з експериментально отриманими результатами та дозволяють промоделювати відповідні залежності для кремнієвих СЕ з неомічним тиловим контактом.

Ключові слова: кремнієвий сонячний елемент, неомічний тиловий контакт, фотоелектричні характеристики

PHOTOELECTRIC PROCESS MODELLING IN NONOHMIC BACK CONTACT SILICON SOLAR CELLS

A. P. Gorban, V. P. Kostylyov, A. V. Sachenko, V. V. Chernenko

Abstract. Were carried out the experimental and theoretical modelling of nonequilibrium photoelectric processes in diffusion silicon solar cells (SC) with non monotone (with a maximum) dependencies of a open circuit voltage V_{oc} versus irradiance of SC front surface P_L which arise in conditions, when under a SC back metal electrode there is a depletion or inversion layer. The experimental modelling was carried out with the help of two close on parameters included towards one to another SC, one of which was partially blacked out. Is shown, that the experimentally received $V_{oc}(P_L)$ dependencies for the offered model represent curves with a maximum. The theoretical modelling results of $V_{oc}(P_L)$ dependencies, executed on the basis of two-exponential theoretical models, agree

well with the experimentally received results and allow to simulate $V_{oc}(P_L)$ dependencies for nonohmic back contact silicon solar cells.

Keywords: silicon solar cell, nonohmic back contact, photoelectric characteristics

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КРЕМНИЕВЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ С НЕОМИЧЕСКИМ ТЫЛОВЫМ КОНТАКТОМ

А. П. Горбань, В. П. Костылёв, А. В. Саченко, В. В. Черненко

Аннотация. Проведено экспериментальное и теоретическое моделирование неравновесных фотоэлектрических процессов в диффузионных кремниевых солнечных элементах (СЭ) с немонотонными (с максимумом) зависимостями напряжения холостого хода V_{oc} от энергетической освещенности P_L , которые возникают в условиях, когда под тыловым металлическим электродом СЭ существует слой истощения или инверсии. Экспериментальное моделирование проводилось с помощью двух близких по параметрам включенных навстречу один другому СЭ, один из которых частично затемнялся. Показано, что экспериментально полученные зависимости $V_{oc}(P_L)$ для предложенной модели представляют собой кривые с максимумом. Расчеты зависимостей $V_{oc}(P_L)$, выполненные на основе теоретической двух-экспоненциальной модели, хорошо совпадают с экспериментально полученными результатами и позволяют промоделировать соответствующие зависимости для кремниевых СЭ с неомическим тыловым контактом.

Ключевые слова: кремниевый солнечный элемент, неомический тыловой контакт, фотоэлектрические характеристики

Вступ

Результати проведених у роботі [1] експериментальних досліджень показали, що в деяких випадках залежності напруги розімкненого кола V_{oc} від енергетичної освітленості P_L , отримані на експериментальних зразках кремнієвих сонячних елементів (СЕ) дифузійно-польового типу, виявляються немонотонними, тобто величина V_{oc} спочатку зростає зі збільшенням P_L , проходить через максимум і починає зменшуватись. Як правило, ефективність процесів фотоелектричного перетворення енергії в таких аномальних СЕ виявляється більш низькою, ніж у зразках звичайного типу, в яких V_{oc} монотонно збільшується зі збільшенням P_L за логарифмічним законом.

В роботі [1] висловлене припущення, що максимуми на залежностях $V_{oc}(P_L)$ виникають в умовах, коли під металевим електродом, локалізованим на тилівій (неосвітлений) поверхні СЕ, існує шар виснаження або інверсії. Для встановлення механізмів впливу параметрів цього шару на форму залежностей $V_{oc}(P_L)$ в даній роботі проведено експериментальне і теоретичне моделювання нерівноважних фотоелектричних процесів за допомогою двох

ввімкнених назустріч один одному СЕ з близькими фотоелектричними параметрами, один з яких частково затінювався для імітації впливу надлишкової концентрації неосновних носіїв заряду на вигин енергетичних зон в ОПЗ під тилівим контактом.

Методика експериментів

Експериментальні дослідження були проведені на двох ввімкнених назустріч один одному кремнієвих СЕ зі структурою p^+-n-n^+ , які мали геометричні розміри $5 \times 5 \text{ мм}^2$ і алюмінієву контактну металізацію. Тиліві контакти на цих СЕ були суцільними, а фронтальні являли собою ряд тонких штрихів, які замикалися на більш товсту центральну шину. Емітерні p^+ -області створювалися за допомогою дифузії бору. Для зменшення оптичних втрат на фронтальну поверхню СЕ було нанесене двошарове антивідбиваюче покриття $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2$. На зазначеній модельній збірці з двох СЕ досліджувалися залежності напруги розімкненого кола від енергетичної освітленості при зміні останньої в широкому діапазоні. При цьому імітація впливу на V_{oc} тилового неомічного контакту здійс-

нювалась шляхом затінення поверхні одного з двох СЕ модельної збірки за допомогою нейтральних фільтрів з коефіцієнтами пропускання $K = 4,5, 14,3$ та 35% , відповідно. Крім того, на кожному СЕ в режимі автоматичної підтримки постійного рівня енергетичної освітленості були проведені вимірювання спектральних залежностей струму короткого замикання I_{SC} в діапазоні довжин хвиль $\Delta\lambda = 400 - 1200$ нм, а також залежностей струму короткого замикання від напруги розімкненого кола $\ln(I_{SC}) = f(V_{OC})$ шляхом зміни енергетичної освітленості в широких межах. Для вимірювання напруги розімкненого кола використовувався вольтметр В7-45 з високим значенням вхідного опору, а енергетична освітленість визначалась по величині струму короткого замикання атестованого еталонного СЕ. Виміри спектральних залежностей проводились на установці для визначення відносних спектральних характеристик фотоперетворювачів в Центрі випробувань фотоперетворювачів та батарей фотоелектричних ІФН ім.В.Є. Лашкарьова НАН України, атестованому органами Держспоживстандарту України.

Результати досліджень і їх обговорення

На рис. 1 і 2 наведені залежності напруги розімкненого кола модельної збірки з двох кремнієвих СЕ V_{OC} від енергетичної освітленості P_L в умовах затінення фотоприймальної поверхні першого (рис. 1) або другого (рис. 2) сонячних елементів нейтральними оптичними фільтрами. Оскільки при послідовному з'єднанні сонячних елементів у збірці величина V_{OC} залежить не тільки від величини, але і від знаку напруг розімкненого кола першого і другого СЕ, то при різних рівнях енергетичної освітленості їх поверхонь на залежностях $V_{OC}(P_L)$ дійсно з'являються екстремуми у вигляді максимуму (рис. 1), або мінімуму (рис. 2). Величини V_{OC} в екстремумах і положення екстремумів на шкалі P_L виявились залежними від різниці величин енергетичної освітленості поверхні кожного з СЕ збірки. Так, при затіненні поверхні першого СЕ напруга розімкненого кола збірки V_{OC} досягала максимальної величини $250-350$ мВ при значеннях енергетичної освітленості його поверхні $P_L \sim 10^{-1}-10^{-2}$ Вт/м², рис.1, а при затіненні фільтрами другого СЕ V_{OC} змінювалось в межах від -50 до -180

мВ при значеннях $P_L \sim 10^{-2}-10^{-3}$ Вт/м²), рис.2. У другому випадку при $P_L > 10$ Вт/м² напруга розімкненого кола моделі навіть змінювала свій знак на протилежний, що пояснюється відмінністю фотоелектричних параметрів СЕ, використаних у модельній збірці.

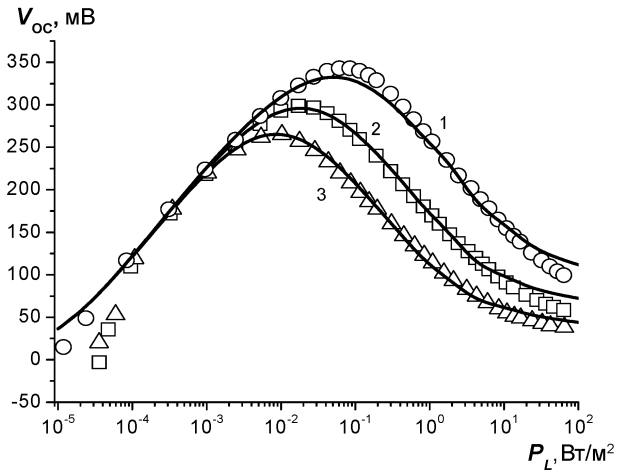


Рис. 1. Залежності напруги розімкненого кола модельної збірки з двох включених назустріч один одному кремнієвих сонячних елементів від енергетичної освітленості їх поверхні в умовах, коли фотоприймальна поверхня одного з них затінювалась нейтральними фільтрами з коефіцієнтами пропускання $K = 4,5\%$ (1), $14,3\%$ (2) та $35,0\%$ (3).

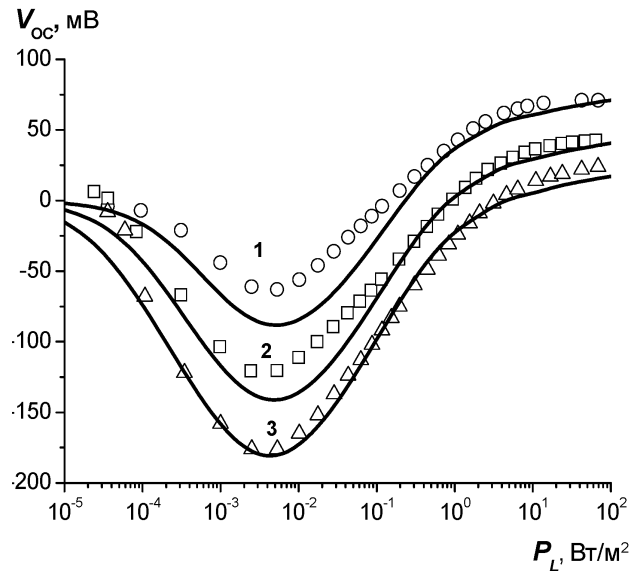


Рис. 2. Те саме, що на рис.1, але при затіненні за допомогою нейтральних фільтрів фотоприймальної поверхні іншого СЕ.

Аналіз спектральних залежностей струму короткого замикання показав, що використані у збірці СЕ мають дуже близькі між собою спектральні залежності з достатньо високими

короткохвильовою і довгохвильовою чутливостями, рис. 3. Висока довгохвильова чутливість вказує на великі значення довжини дифузії неосновних носіїв заряду в базі цих СЕ, а висока короткохвильова чутливість обумовлена малою глибиною залягання р-п-переходу і низькими значеннями швидкості поверхневої рекомбінації.

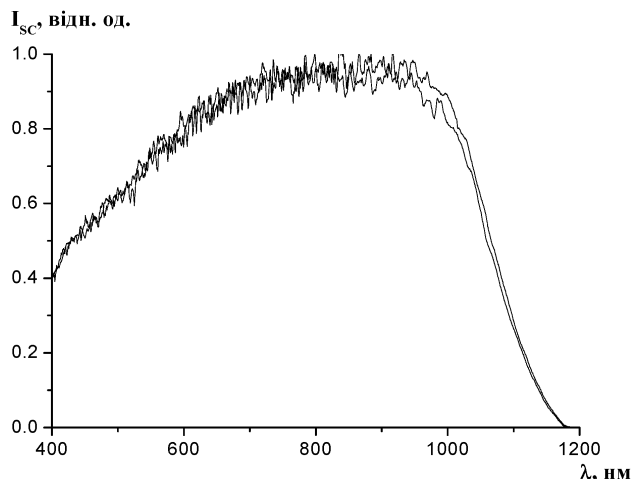


Рис. 3. Виміряні в умовах постійної потужності світлового потоку нормовані спектральні залежності струму короткого замикання від довжини хвилі для кремнієвих СЕ, використаних у модельній збірці.

Залежності струму короткого замикання від напруги розімкненого кола $\ln(I_{sc}) = f(V_{oc})$ для використаних у збірці зразків СЕ, показані на рис.4, а розраховані на їх основі в двохекспоненціальному наближенні коефіцієнти неідеальності ВАХ A_1-A_4 і густини струмів насичення $J_{s1}-J_{s4}$ наведені в таблиці 1.

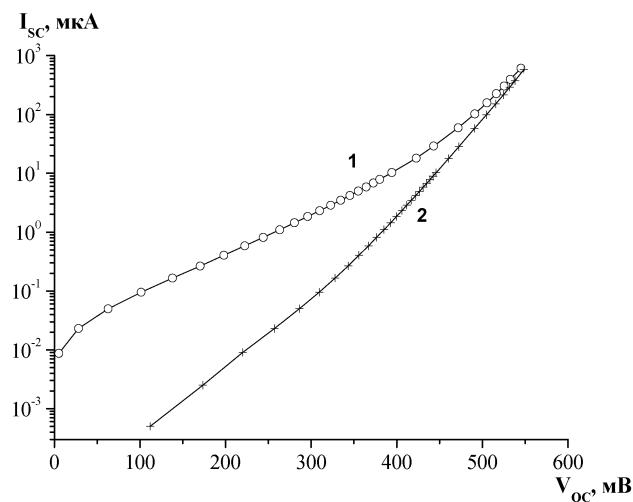


Рис. 4. Залежності струму короткого замикання від напруги розімкненого кола для використаних у модельній збірці СЕ №1 (крива 1) і №2 (крива 2), отримані при різних значеннях енергетичної освітленості.

Таблиця 1

Розраховані значення коефіцієнтів неідеальності ВАХ A_1-A_4 і густин струмів насичення $J_{s1}-J_{s4}$.

A_1	A_2	A_3	A_4	$J_{s1}, \text{A/cm}^2$	$J_{s2}, \text{A/cm}^2$	$J_{s3}, \text{A/cm}^2$	$J_{s4}, \text{A/cm}^2$
1	1.93	1.12	2.96	$2.1 \cdot 10^{-13}$	$9.3 \cdot 10^{-11}$	$3.2 \cdot 10^{-12}$	$3.4 \cdot 10^{-8}$

При теоретичному моделювання зображеної на рис.1 залежності $V_{oc}(P_L)$ напруга розімкненого кола збірки СЕ знаходилась з виразу

$$V_{oc} = V_{oc}^{(1)} - V_{oc}^{(2)}, \quad (1)$$

а значення $V_{oc}^{(1)}$ та $V_{oc}^{(2)}$ з розв'язку рівнянь

$$I_{gen} = I_{s1} \exp\left(\frac{qV_{oc}^{(1)}}{A_1 kT}\right) + I_{s2} \exp\left(\frac{qV_{oc}^{(1)}}{A_2 kT}\right) \quad (2)$$

для першого СЕ і

$$mI_{gen} = I_{s3} \exp\left(\frac{qV_{oc}^{(2)}}{A_3 kT}\right) + I_{s4} \exp\left(\frac{qV_{oc}^{(2)}}{A_4 kT}\right) \quad (3)$$

для другого СЕ. З іншого боку, при моделюванні показаної на рис.2 залежності $V_{oc}(P_L)$ з виразу (2) розраховувались значення mI_{gen} , а з виразу (3) — значення I_{gen} . Тут I_{gen} — генераційний струм, m — чисельний коефіцієнт, що дорівнює коефіцієнту пропускання відповідного фільтра,

індекси 1 і 2 відповідають першому, а індекси 3 і 4 — другому СЕ.

На рисунках 1 та 2 суцільними лініями показані результати теоретичного моделювання залежностей $V_{oc}(P_L)$ з використанням виразів (1) — (3) та параметрів, наведених в таблиці 1. Як видно з рисунків, узгодження між експериментальними та розрахованими залежностями $V_{oc}(P_L)$ достатньо добре, що свідчить про коректність зроблених у роботі [1] припущень стосовно взаємозв'язку між фактором неомічності тилового контакту і аномальним характером залежностей $V_{oc}(P_L)$ в кремнієвих СЕ.

Деякі відмінності між теоретичними кривими 1,2 (рис. 2) і експериментальними даними (точки на тому ж рис.) пояснюються наближеннями теоретичної моделі. Нами була використана двохекспоненціальна модель, яка дає гарне співпадіння з експериментом при

більших за 10^{-1} Вт/м² рівнях фотозбудження, рис.1 (криві 1,2,3) і рис.2 (крива 3). При менших рівнях фотозбудження ($P_L \leq 10^{-1}$ Вт/м²), рис.2 (криві 1,2) невеликі відмінності в величині максимуму $V_{oc}(P_L)$ при гарному співпадінні його положення пояснюються тим, що в цьому випадку необхідно використовувати більш ускладнену модель, наприклад, трьох-експоненціальну [2], яка враховує додатковий механізм струмопроходження. Цей механізм дає невеликий внесок в загальний струм і при більших рівнях фотозбудження ним можна знехтувати, при низьких рівнях фотозбудження його внесок стає помітнішим. Оскільки метою роботи було встановлення фізичної природи максимуму на залежності $V_{oc}(P_L)$ і її моделювання, то ми обмежилися двохекспоненціальною моделлю.

Висновки

Показано, що залежності напруги розімкненого кола від енергетичної освітленості для модельної збірки з двох включених назустріч один одному кремнієвих СЕ, один з яких частково затінюється за допомогою нейтральних

фільтрів, мають вигляд кривих з максимумом, або мінімумом. Результати теоретичного моделювання цих залежностей, виконаного в наближенні двох-експоненціальній моделі для світлових ВАХ, добре співпали з результатами експериментальних досліджень. Останнє підтверджує істотний вплив шару виснаження, локалізованого під металевим контактом на тилій (неосвітленій) поверхні кремнієвих сонячних елементів, на їх фотоелектричні параметри і ефективність при середніх і великих рівнях енергетичної освітленості поверхні.

Література

1. Gorban A.P., Kostylyov V.P., Panichevskaja T.V. et al. Photovoltaic performance of silicon solar cells with non-ohmic rear contact // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии. — Сборник научных статей. — Часть I. — Харьков, 1997. — С. 41.
2. Горбань А. П., Костылев В.П., Саченко А.В., Соколовский И.О. Механизмы формирования рекомбинационных токов в прямо смещенных кремниевых *p-n*-переходах и солнечных элементах. — Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. — 2004. — Вып. 39. — С.57-64.