

Моделирование теплоэлектрических процессов в полупроводниковой структуре солнечного элемента

А.М. Ходаков¹, В.И. Смирнов^{1,2}, В.А. Сергеев^{1,2}, А.А. Гавриков¹

¹Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Гончарова 48/2, Ульяновск, Россия, 432071

²Ульяновский государственный технический университет, Северный Венец 32, Ульяновск, Россия, 432027

Аннотация. Рассматривается теплоэлектрическая модель полупроводниковой структуры солнечного элемента с учетом нелинейной температурной зависимости плотности тепловой мощности. Приводится температурное распределение по структуре и зависимость величины перегрева p - n перехода от греющего тока. Производится сравнение полученных с помощью модели расчетных и экспериментальных результатов, полученных с применением оригинального аппаратно-программного комплекса для измерения теплового сопротивления солнечных элементов.

1. Введение

Эффективность кремниевых солнечных ячеек обычно составляет 12 – 28% [1]. Это означает, что более 70% поглощаемой модулем световой энергии преобразуется в тепло. С повышением температуры на 1°C номинальная мощность солнечных модулей снижается примерно на 0,4%, следовательно уменьшение мощности модулей может достигать 15 – 25% [2]. При температурах выше 100 – 125°C ячейки могут временно потерять работоспособность, а ещё больший нагрев грозит им выходом из строя. К тому же повышенная температура ускоряет деградацию солнечных модулей. Таким образом, требования к качеству из теплоотвода очень высоки. Чем меньше тепловое сопротивление R_T между активной областью (p - n переходом) и корпусом модуля (подложкой), тем ниже температура полупроводниковых кристаллов и выше выходная мощность солнечного модуля. Несмотря на важность определения тепловых режимов работы солнечных модулей, стандарты измерения их теплового сопротивления отсутствуют, а количество публикаций на эту тему очень мало [1, 3 – 6].

2. Теплоэлектрическая модель

Для определения температурного поля в полупроводниковой структуре (ППС) солнечного элемента, работающего в режиме диода, построена теплоэлектрическая модель прямоугольной двухслойной структуры, с площадями слоев S_i и толщинами H_i (рисунок 1). Обычно полагают [7], что поскольку толщина и глубина залегания активной области структуры мала по сравнению с толщиной кристалла, то все источники тепла можно считать расположенными на верхней поверхности кристалла. В этом случае однородное уравнение теплопроводности решается с поверхностной плотностью тепловой мощности.

Температурное поле в структуре находится из решения уравнения теплопроводности

$$c_i \rho_i \frac{\partial T_i(x, y, z, t)}{\partial t} = \nabla_{x,y,z} (\lambda_i \nabla_{x,y,z} T_i), \quad (i=1,2) \quad (1)$$

где $T_i = (T_{si} - T_0)$; T_{si} , T_0 – температуры слоев структуры и окружающей среды; λ_i , ρ_i , c_i – коэффициенты теплопроводности, плотности, удельной теплоемкости слоев структуры.

Начальные и граничные условия будут следующими:

$$T_i(x, y, z, 0) = 0; \quad (2)$$

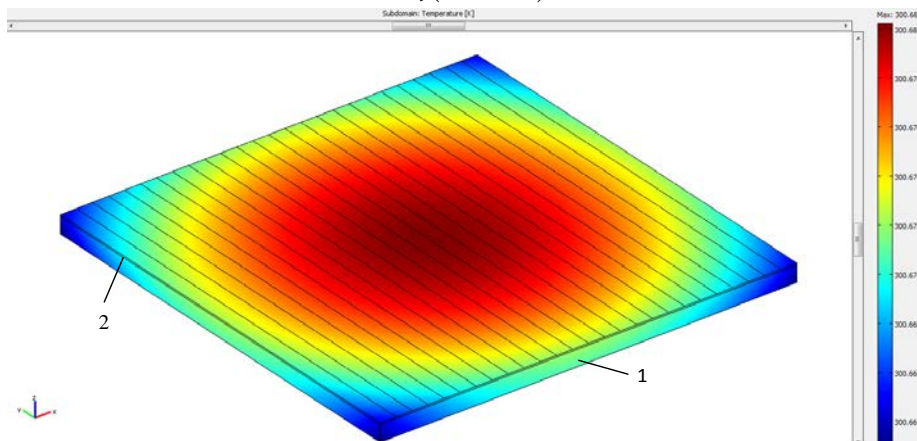


Рисунок 1. Модель структуры солнечного элемента: 1 – теплоотвод $S_1 \times H_1$, 2 – ППС $S_2 \times H_2$.

– на боковых поверхностях прямоугольного кристалла, теплоотвода и нижней поверхности теплоотвода задается условие естественной конвекции;

– на верхней поверхности ППС задается плотность теплового потока

$$-T_{2z}(x, y, (H_1 + H_2), t) = J(x, y, (H_1 + H_2), t) U, \quad (3)$$

где плотность тока определяется из нелинейного уравнения электротепловой положительной обратной связи (ПТОС) [8], учитывающего температурную зависимость плотности тока активной области ППС:

$$J(T_2(x, y, H, t)) = J_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_g - e(U - r S_{ar} J(T_2(x, y, H, t)))}{k_B T_2(x, y, H, t)}\right), \quad (4)$$

где J_0 – слабо зависящий от температуры параметр, E_g – ширина запрещенной зоны полупроводника, r – сопротивление структуры, S_{ar} – площадь активной области структуры, k_B – постоянная Больцмана, e – заряд электрона.

При протекающем через ППС токе I , для нахождения значения напряжения U необходимо для известного распределения температуры по активной области структуры решать уравнение

$$\iint_{S_{ar}} J(T_2(x, y, (H_1 + H_2), t)) dx dy = I. \quad (5)$$

Решение модельной задачи (1) – (4) находилось численным методом конечных элементов с помощью специально разработанной программы, включающей в себя интерактивную программную среду COMSOL Multiphysics. Для численного исследования модели рассматривался солнечный элемент из монокристаллического кремния и алюминиевый теплоотвод с геометрическими размерами: $S_1 = S_2 = 52 \times 52 \text{ мм}^2$, $H_1 = 2 \text{ мм}$, $H_2 = 0.2 \text{ мм}$. Теплофизические характеристики слоев структуры брались из базы данных программы COMSOL. Коэффициент теплообмена естественной конвекции $\alpha = (4 - 10) \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Сила греющего тока изменялась в пределах $I = (0.3 - 1.0) \text{ А}$.

Была исследована зависимость максимальной температуры перегрева p - n перехода от протекающего через ППС солнечного элемента тока I , представленная на рисунке 2. Наблюдается слабая нелинейность в области больших токов, что вызвано влиянием ПТОС. Проводилось сравнение расчетных и экспериментальных результатов. Экспериментально величина перегрева p - n перехода определялась с применением модуляционного метода

измерения теплового сопротивления [9]. На рисунке 3 представлены осциллограммы температуры перехода солнечного элемента, измеренные при различной амплитуде импульсов греющего тока. В результате сравнения получено, что различие между расчетными и экспериментальными значениями максимального перегрева p - n перехода составляет от 10 до 15 %.

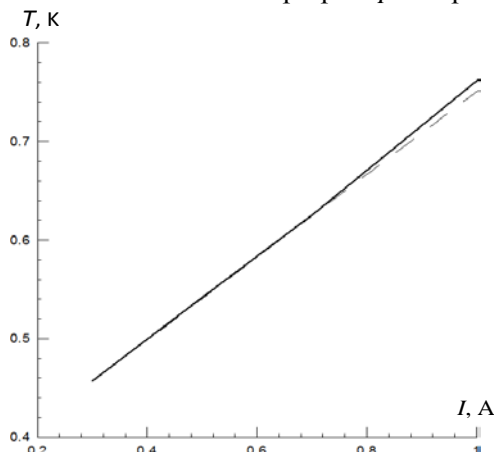


Рисунок 2. Зависимость перегрева p - n перехода от величины греющего тока; пунктир – без учета ПТОС.

Более высокие значения расчетных по модели величин перегрева ППС солнечного элемента возможно связано с тем, что тепловое сопротивление R_T таких структур нелинейно уменьшается от величины греющего тока. Как считают авторы работы [5], уменьшение R_T определяется процессами локализации тока в области p - n перехода.

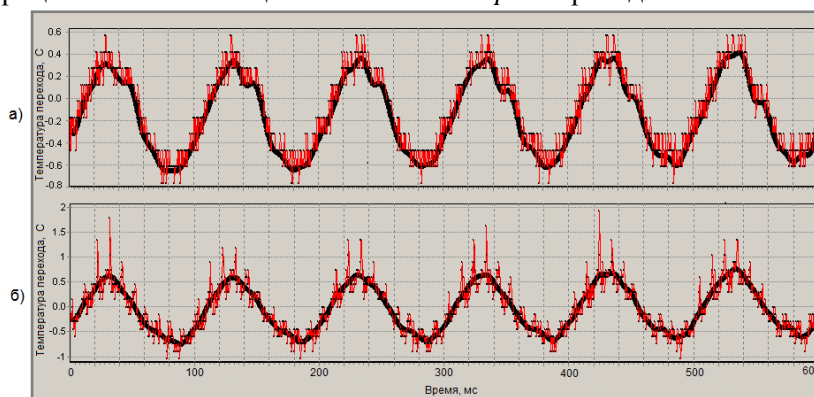


Рисунок 3. Осциллограммы температуры перехода ППС при различной амплитуде импульсов греющего тока: а) $I = 0,5$ А; б) $I = 1,0$ А.

3. Заключение

Разработанная теплоэлектрическая модель полупроводниковой структуры солнечного элемента позволила получить температурное распределение по его структуре. Однако исследования теплофизических процессов солнечных элементов показали [5, 9], что тепловое сопротивление таких объектов нелинейно зависит от величины греющего тока, стремясь при больших греющих токах к постоянному значению. Это объясняется процессами локализации тока в области p - n -перехода, обусловленными наличием положительной тепловой обратной связи. Экспериментальным подтверждением таких процессов является появление компоненты теплового сопротивления, возникающей из-за перепада температур между локально разогретой областью объекта измерения и остальной частью полупроводниковой пластины. Поэтому следующим этапом уточнения модели будет учет процессов локализации тока в рассматриваемых структурах.

4. Литература

- [1] Siegal, B. Solar Photovoltaic Cell thermal measurement issues // SEMI-THERM, 2010. – P. 132-135.
- [2] Dupre, O. Physics of the thermal behaviour of photovoltaic devices // Thermics. INSA de Lyon, 2015.
- [3] Jang, S.H. Thermal Characterization of Junction in Solar Cell Packages / S.H. Jang, M.W. Shin // Electron. Device Lett. – 2010 – Vol. 31(7). – P. 743-745.
- [4] Zhang, J. Transient Thermal Resistance Test of Single-Crystal-Silicon Solar Cell // IEEE Trans. Electron. Devices. – 2012. – Vol. 59(9). – P. 2345-2349.
- [5] Plesz, B. Issues of Thermal Transient Testing on Photovoltaic Modules / B. Plesz, S. Ress, P.G. Szabó, G. Hantos, D. Dudola // 20th International Workshop on Thermal investigations of IC's and Systems Greenwich, London, 2014.
- [6] De Mey, G. Influence of lateral heat diffusion on the thermal impedance measurement of photovoltaic panels / G. De Mey, J. Wyrzutowicz, A. De Vos, W. Maranda, A. Napieralski // Sol, Energy Mater. Sol. Cells. – 2013. – Vol. 112. – P. 1-5.
- [7] Bin, D. Transient Electrothermal Simulation of Power Semiconductor Devices / D. Bin, J.L. Hudgins E. Santi // IEEE Transactions on power electronics. – 2010. – Vol. 25(1). – P. 237-248.
- [8] Сергеев, В.А. Нелинейные тепловые модели полупроводниковых приборов / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков. – Ульяновск: УЛГТУ, 2012. – 160 с.
- [9] Smirnov, V.I. Modulation method for measuring thermal impedance components of semiconductor devices / V.I. Smirnov, V.A. Sergeev, A.A. Gavrikov, A.M. Shorin // Microelectron. Reliab. – 2018. – Vol. 80. – P. 205-212.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта проекта № 18-48-730018.

Simulation of thermoelectric processes in the semiconductor structure of a solar cell

A.M. Hodakov¹, V.I. Smirnov^{1,2}, V.A. Sergeev^{1,2}, A.A. Gavrikov¹

¹Ulyanovsk branch of Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Goncharov street 48/2, Ulyanovsk, Russia, 432071

²Ulyanovsk State Technical University, Northern Crown 32, Ulyanovsk, Russia, 432027

Abstract. The paper describes a solar cell thermoelectric model taking into account the non-linear temperature dependence of the thermal power density. The temperature distribution in the structure and dependence of the p–n-junction overheating on the heating current are reviewed. The results obtained by the modelling and the results obtained using original apparatus for measuring the thermal resistance of solar cell are compared.