

Трехпараметрическая трубковая модель растекания тока в солнечных элементах

© А.Д. Малевская, М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, Д.А. Малевский, Н.А. Калюжный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия
E-mail: anmalevskaya@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 3 мая 2024 г.
В окончательной редакции 11 июля 2024 г.
Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Предложена усовершенствованная трехпараметрическая модель для расчета вольт-амперных характеристик фотоэлектрических преобразователей. Модель основана на разбиении фотоэлектрических преобразователей на трубки тока, каждая из которых содержит p - n -переход и три сопротивления — вертикальное, латеральное и введенное дополнительно. Для определения параметров модели используются темновые ВАХ и карты электролюминесценции, полученные при пропускании тока через край верхней контактной сетки фотоэлектрических преобразователей. При помощи модели проведен анализ экспериментальных характеристик двух $\text{Ga}_{0.79}\text{In}_{0.21}\text{As}$ -фотоэлектрических преобразователей с различной геометрией токосборной шинки и показано, что модель позволяет описывать экспериментальные вольт-амперные характеристики и определять параметры, характеризующие качество контактной сетки.

Ключевые слова: фотоэлектрические преобразователи, солнечные элементы, сопротивление растекания, сопротивление контактов.

DOI: 10.61011/FTP.2024.10.59384.6619A

Процесс растекания тока в фотоэлектрических преобразователях (ФЭП) играет важную роль в режимах преобразования высокой плотности мощности падающего излучения, характерной для лазерных ФЭП и солнечных элементов (СЭ) с концентраторами. Для моделирования этого процесса используются различные подходы, включая одномерные, двумерные и трехмерные модели [1–5]. В данной работе совершенствуется трубковая модель [4], применяемая для описания распределения тока в ФЭП. Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования [5], показали необходимость введения в модель сопротивления контактов R_C (в дополнение к вертикальному R_V и латеральному R_L сопротивлениям). При этом было обнаружено, что R_C и R_L оказывают одинаковое влияние на вольт-амперные характеристики (ВАХ). Разделить вклад двух сопротивлений возможно при анализе распределения интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) между контактами. Для этого было измерено распределение ЭЛ (карта ЭЛ) по поверхности ФЭП при пропускании через структуру тока. Анализ карты ЭЛ выявил ее более сложный вид, чем предсказывает трехпараметрическая модель, не учитывающая затухание яркости из-за сопротивления контактов. В данной работе карта ЭЛ поверхности ФЭП была проанализирована более детально, что позволило частично учесть влияние различных дефектов контактной сетки. В целом применение анализа карты ЭЛ поверхности ФЭП для изучения процессов растекания тока широко распространено в литературе [6–9]. Так, в работе [6] показано, что анализ распределения ЭЛ по поверхности позволяет выявлять дефектные области контактов и оптимизировать технологию их создания. В статье [7]

разработана модель, позволяющая рассчитывать распределение ЭЛ по поверхности на основе эквивалентной схемы, учитывающей резистивные компоненты и параметры p - n -переходов. Схожий подход был предложен в работе [8]. При этом в обеих работах параметры p - n -перехода задавались теоретически. В статье [9] представлен комплексный метод экспериментального определения ряда параметров СЭ с использованием ВАХ и карты ЭЛ. При этом в отличие от работ [7,8] авторы используют упрощенную эквивалентную схему СЭ, не учитывающую нелинейный характер растекания тока между контактами, что является важным для исследования, представленного в данной работе.

Таким образом, существующие методы либо используют упрощенные модели без учета нелинейных эффектов, либо основаны на сложных эквивалентных схемах, часть параметров в которых задается теоретически. В данной работе предпринята попытка найти компромисс между этими двумя подходами. Используемая в работе модель основана на разработанной ранее двухпараметрической трубковой модели [4]. В модели ФЭП разбивается на трубки тока. Каждая трубка содержит p - n -переход и два сопротивления — вертикальное R_V и латеральное R_L , что позволяет учесть неоднородность распределения тока в ФЭП. Вертикальное сопротивление R_V одинаково для всех трубок и обычно определяется свойствами материала подложки. Латеральное сопротивление зависит от номера трубки и параметра R_L , который отражает степень неоднородности распределения тока. Итоговое сопротивление для каждой трубки тока выражается формулой $R = R_V n + R_L x$, где n — количество трубок, а x — номер трубки.

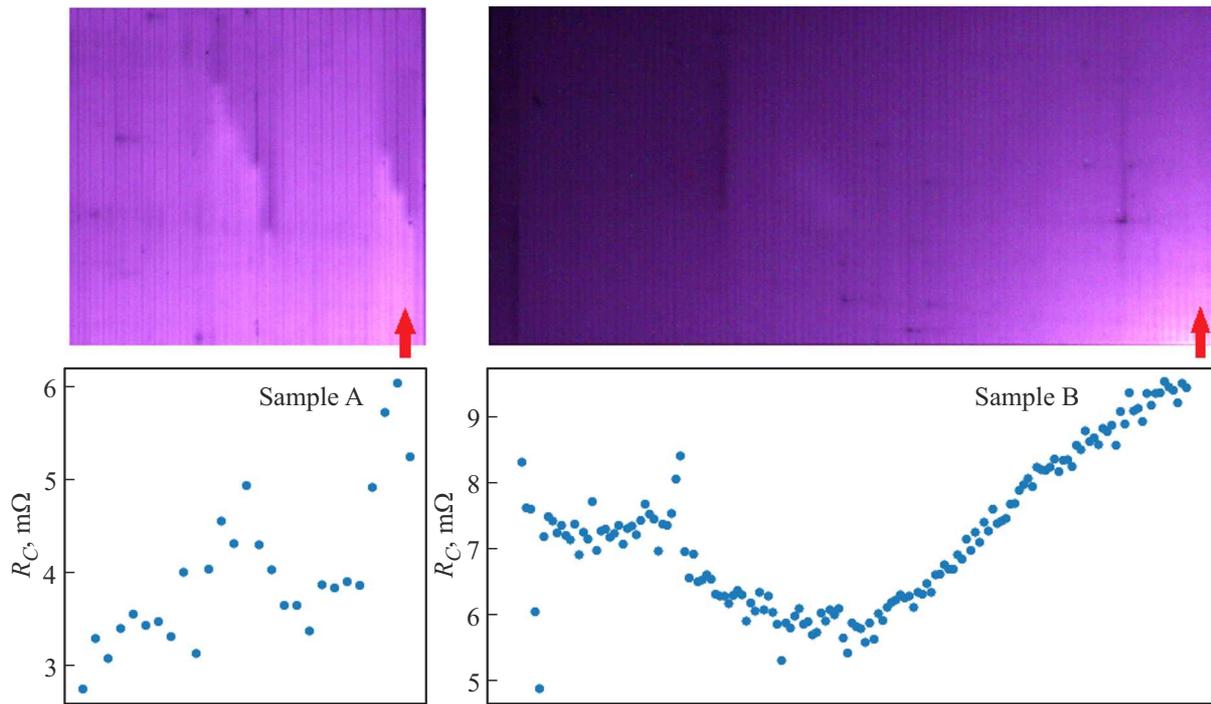


Рис. 1. Вверху: карта ЭЛ для исследуемых образцов при приложении напряжения ≈ 0.8 В при плотности тока 1.91 А/см² для образца А и плотности тока 0.75 А/см² для образца В. Внизу: результат расчета сопротивления для пар контактных шин — положение 0 по оси абсцисс соответствует самой левой паре шинок на верхнем рисунке. Слева приведены данные для образца А, справа — для образца В. Оранжевой стрелкой указана позиция приложения контакта к шаблону при измерении ВАХ и карт ЭЛ.

Расчет ВАХ ФЭП сводился к следующей процедуре. Сначала выбиралось количество трубок тока N , затем задавались параметры p – n -перехода (токи насыщения $J_{0,j}$ и соответствующие им диодные коэффициенты A_j , где j — количество учитываемых токов насыщения, обычно учитывается два — диффузионный с $A = 1$ и рекомбинационный с $A = 2$). После этого задавались параметры R_V и R_L . Далее производился расчет ВАХ трубок тока по формуле

$$J = \sum \left(J_{0,ir,j} \exp \left(\frac{q[V - JR]}{A_j kT} \right) \right), \quad (1)$$

где J — плотность тока, V — приложенное напряжение, k — постоянная Больцмана, T — температура, q — заряд электрона, $J_{0,ir,j} = J_{0,j}/N$ — токи насыщения для трубок тока. Суммирование полученных ВАХ отдельных „трубок тока“ давало полную ВАХ ФЭП. В данной работе модель расширена — добавлен учет сопротивления контакта. Это осуществляется посредством разделения контакта на M частей и применения трубковой модели для каждой части с дополнительным сопротивлением, которое с удалением этой части от токосборной шинки (ТСШ) пропорционально увеличивается. Процедура расчета остается в такой же, но значения R и $J_{0,ir,j}$ вычисляются следующим образом: $R = R_V n + R_L x + R_C l$ и $J_{0,ir,j} = J_{0,j}/(NM)$, где l (от 1 до M) — номер части контакта. Отметим, что проведение расчета позволяет

как получить суммарную ВАХ прибора, так и определить значения напряжений на p – n -переходах для всех трубок тока, что дает распределение интенсивности ЭЛ, L , по поверхности ФЭП. Расчет интенсивности ЭЛ базируется на экспоненциальной зависимости L от напряжения на p – n -переходе:

$$L = L_0 \exp \left(\frac{qV}{kT} \right), \quad (2)$$

где L_0 — коэффициент пропорциональности.

Предложенная модель была применена для анализа двух Ga_{0.79}In_{0.21}As ФЭП, разрабатываемых в рамках работ по получению высокоэффективных ФЭП лазерного излучения [10]. Образцы имели размеры $S_A = 0.0784$ см², $S_B = 0.9293$ см². Первый образец обозначен в работе как „образец А“, второй — как „образец В“. Расстояние между контактными полосками в обоих случаях равнялось 100 мкм. Образец А имел более тонкие контактные шинки, вид его карты ЭЛ указывал на наличие в них дефектов (рис. 1). Для учета влияния подобных дефектов на характеристики ФЭП были проведены измерения и расчет темновых ВАХ при приложении контакта к краю образцов. Это позволяло создать условия, при которых ток растекается сначала вдоль ТСШ, а затем уже по контактным полоскам. Такой процесс растекания тока, как будет показано далее, позволяет использовать экспериментальную карту ЭЛ для

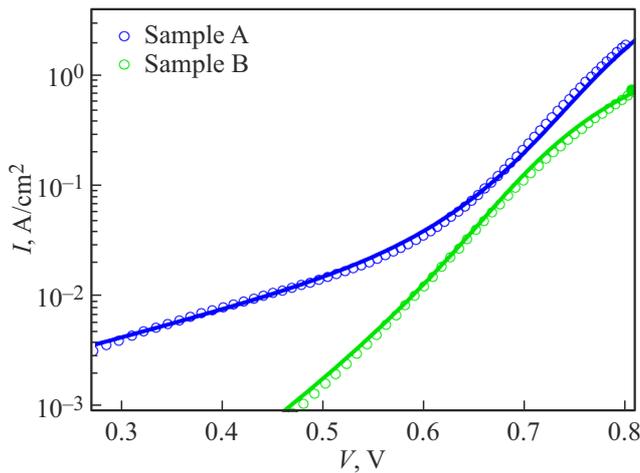


Рис. 2. Темновые вольт-амперные характеристики исследуемых образцов ФЭП. Точки — экспериментальные данные, сплошные линии — результаты расчета по предложенной модели. Синий цвет — образец А, зеленый — образец В. (Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи).

определения параметров сопротивлений как полосок, так и ТСШ.

Полученные темновые ВАХ для двух образцов приведены на рис. 2, типичный вид карты ЭЛ приведен на рис. 1. Отметим, что конструкция контактной сетки образца В содержала ТСШ посередине и разделяла образец на две одинаковые части. На рис. 1 приведено свечение верхней части. Другая часть светилась схожим образом. Полученные карты ЭЛ затухают при отдалении от приложенного контакта неравномерно, что свидетельствует о разнице контактного сопротивления всех полосок. В предложенном расчете, при помощи трехпараметрической модели, этот экспериментальный факт учитывался при помощи следующей процедуры. Каждый образец имел K пар контактных полосок, каждая из пар, в соответствии с трехпараметрической моделью, была разбита на M частей. Итого образец был разбит на MK ячеек. Вдоль ТСШ ячейки нумеруются от 1 до K , а вдоль контактных полосок от 1 до M . Каждую ячейку обозначим двумя номерами: $x = 1 \dots K$ — характеризует положение вдоль ТСШ и $y = 1 \dots M$ — характеризует положение части вдоль контактных полосок. Далее из карты ЭЛ определялось интегральное свечение всех ячеек. У места приложения контакта свечение считалось максимальным (интенсивность ЭЛ L_{\max}). Предполагалось, что на безрезистивном участке ВАХ напряжение, приложенное ко всей структуре, полностью падает на этой ячейке (самая яркая и самая близкая к приложенному контакту). Тогда сравнение интенсивностей электролюминесценции этой ячейки и всех остальных позволяет определить напряжение, падающее на $p-n$ -переходах остальных ячеек. Учитывая вид (2), для безрезистивного участка ВАХ напряжение любой ячейки

задается выражением

$$V(x, y) = V - \frac{kT}{q} \log\left(\frac{L(x, y)}{L_{\max}}\right). \quad (3)$$

Используя полученные напряжения, с помощью измеренной ВАХ определялся ток в ячейках. В итоге были получены карты $V(x, y)$ и $J(x, y)$, описывающие распределение напряжения и тока соответственно. При удалении от приложенного контакта наблюдалось падение $V(x, y)$, которое связано с сопротивлением контактов. В текущей модели мы предполагали, что это сопротивление постоянное, поэтому падение аппроксимировалось линейной функцией. Пример аппроксимации для обоих образцов показан на рис. 3. Проведение подобного анализа для всех ячеек позволило получить сопротивления всех пар контактных полосок и ТСШ. При этом сопротивлении для пар полоски находилось исходя из падения напряжения вдоль полоски ($x = \text{const}$, y — изменяется), а сопротивление ТСШ — из падения напряжения вдоль ТСШ ($y = 1$, x — изменяется).

Для учета потерь на ТСШ при расчете сопротивления ячейки по процедуре, представленной выше, использовалось следующее сопротивление: $R(x, y) = R_V n + R_L x + R_C y + R_{bb} x$, где R_{bb} — сопротивление ТСШ. Параметры $p-n$ -переходов определялись аппроксимацией

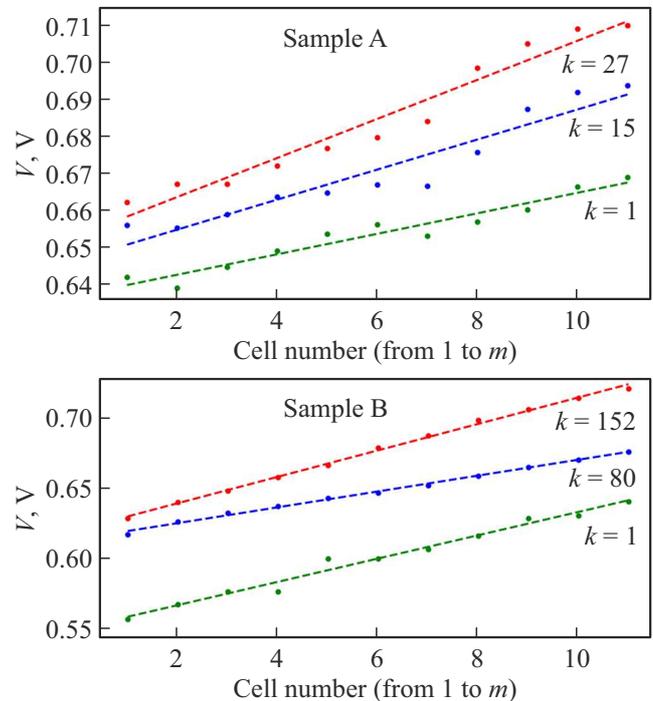


Рис. 3. Зависимости напряжения вдоль контактных полосок, определенные из карты ЭЛ исследуемых образцов (вверху для образца А, внизу для образца В). Символы — экспериментальные точки, линии — используемая в работе линейная аппроксимация. Зависимости помечены порядковым номером пары, k — отсчитывается от левого края при ориентации, соответствующей карте ЭЛ, приведенной на рис. 1.

Параметры исследуемых образцов*

	Образец А	Образец В
J_{01} , А/см ²	$1.24 \cdot 10^{-13}$	$0.52 \cdot 10^{-13}$
J_{02} , А/см ²	$1.07 \cdot 10^{-7}$	$0.45 \cdot 10^{-7}$
J_{0r} , А/см ²	$7.88 \cdot 10^{-4}$	$7.88 \cdot 10^{-4}$
A_t	6.89	3.60
R_L , Ом·см ²	6	6.5
R_V , Ом·см ²	0	0
R_{bb} , Ом	3.99	7.22

Примечание. * J_{01} и J_{02} — диффузионный (коэффициент идеальности $A = 1$) и рекомбинационный ($A = 2$) токи насыщения, J_{0r} — туннельный ток насыщения, A_t — диодный коэффициент туннельного тока, R_L — латеральное сопротивление слоя растекания, R_{bb} — сопротивление ТСП. Также были найдены сопротивления всех пар контактных полосок, приведены внизу рис. 1.

безрезистивного участка ВАХ. Параметр R_L определялся исходя из требования согласия расчетных ВАХ с экспериментальными. При расчетах предполагалось, что влияние вертикального сопротивления R_V на ВАХ много меньше, чем R_L и поэтому R_V полагался равным нулю. Полученные параметры для двух образцов приведены в таблице, величины R_C для всех пар приведены внизу рис. 1, результат расчета ВАХ приведен на рис. 2. В расчетах $N = 50$.

Таким образом, представленное исследование предлагает метод определения всех резистивных параметров ФЭП, влияющих на распределение тока. Метод основан на анализе темновых ВАХ и карт ЭЛ, полученных при пропускании тока через контакт, подсоединенный к краю верхней контактной сетки. Стоит отметить, что измеренная картина ЭЛ имеет более сложный вид, чем предсказывает текущая реализация модели. Так, экспериментально не наблюдается монотонный спад напряжения при отдалении от приложенного контакта, что указывает на необходимость совершенствования модели. К существенным достоинствам модели можно отнести ее простоту и возможность определять на основе экспериментальных данных параметры, характеризующие качество верхней контактной сетки ФЭП и СЭ, что имеет большую практическую ценность.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Steiner, S.P. Philipps, M. Hermle, A.W. Bett, F. Dimroth. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **1**, 73 (2011).
- [2] I. Garcia, C. Algora, I. Rey-Stolle, B. Galiana. *Proc. 33rd PVSC (San Diego, USA, May 11–16, 2008)* p. 4922908.
- [3] B. Galiana, C. Algora, I. Rey. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **16**, 331 (2008).
- [4] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Каложный. *ФТП*, **50** (7), 987 (2016).
- [5] А.Д. Малевская. *Углеродные и ван-дер-ваальсовы наноструктуры*. Тез. докл. Молодежной конф. по физике полупроводников „Зимняя школа 2024“ (Санкт-Петербург, Зеленогорск), 29.02–04.03, 2024) с. 82.
- [6] K. Drabczyk, G. Kulesza-Matlak, A. Drygała, M. Szindler, M. Lipiński. *Sol. Energy*, **126**, 14 (2016).
- [7] Z. Hameiri, A. Mahboubi Soufiani, M.K. Juhl, L. Jiang, F. Huang, Y.-B. Cheng, T. Trupke. *Progr. Photovolt.: Res. Appl.*, **23** (12), 1697 (2015).
- [8] H. Nesswetter, P. Lugli, A.W. Bett, C.G. Zimmermann. *IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC) (2012)* pt 2, p. 406.
- [9] A. Delamarre. *J. Photon. Energy*, **2** (1), 027004 (2012).
- [10] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **262**, 112551 (2023).

Редактор А.Н. Смирнов

Three-parameter tube model of current spreading in solar cells

A.D. Malevskaya, M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, D.A. Malevskii, N.A. Kalyuzhnyy

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract This paper improved three-parameter model for calculating the IV -curves of photovoltaic converters is proposed. The model is based on dividing the solar cell into current tubes, each of which contains a p - n -junction and three resistances — vertical, lateral and an additionally introduced. To determine the model parameters, dark IV -curves and electroluminescence (EL) maps obtained by passing current through the edge of the upper contact grid of a solar cell are used. Using the model, the experimental characteristics of two $\text{Ga}_{0.79}\text{In}_{0.21}\text{As}$ photovoltaic converters with different current collection bus geometries were analyzed and it was shown that the model allows one to describe experimental IV -curves and determine parameters characterizing the quality of the contact grid.