



УДК 004.942

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА И РАСЧЁТ ЕГО ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

С.М. Логанчук, poetrywriter57@gmail.com

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова

В данной статье рассматривается моделирование органического солнечного элемента в программе gprvdm при его облучении спектром солнечного излучения AM1.5G при длинах волн от 300 до 900 нм. Были рассмотрены случаи с учётом только внутреннего сопротивления устройства и с учётом внутреннего и шунтирующего сопротивлений. Структура солнечного элемента состоит из 5 слоёв. В качестве материала активного слоя была выбрана смесь P3HT: PCBM. За анод принят слой оксида индия-олова (ITO). Катод состоит из слоёв фторида лития (LiF) и алюминия (Al). Для солнечного элемента была рассчитана плотность тока при напряжении от -0.2 до 0.8 В. На основе этих данных была построена вольтамперная характеристика солнечного элемента. Из её анализа были рассчитаны коэффициент заполнения, максимальная мощность и коэффициент полезного действия солнечного элемента.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, органический солнечный элемент, фотовольтаика, органическая электроника, моделирование

SIMULATION OF ORGANIC SOLAR CELL AND CALCULATION OF ITS' MAIN PARAMETERS

S.M. Loganchuk, poetrywriter57@gmail.com

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)

In this paper, the simulation of organic solar cell is being considered. The simulation was made in the program gprvdm for wavelengths from 300 to 900 nm of spectrum AM1.5G. The cases with only series resistance and both series and shunt resistance were considered. The structure of solar cell consists of 5 layers. The active layer is mixture P3HT: PCBM. Anode contact is made of indium-tin oxide (ITO). Cathode contact includes the layers of lithium fluoride (LiF) and aluminum (Al). For the solar cell the current density was calculated from values of voltage from -0.2 to 0.8 V. Analyzing J-V curve the fill factor, maximum power and power conversion energy of solar cell were calculated.

Keywords: renewable energy sources, organic solar cell, photovoltaics, organic electronics, simulation

Солнечные элементы находят широкое применение в качестве экологически чистых и возобновляемых источников энергии. При их использовании в атмосферу выбрасывается меньше углекислого газа, чем при сжигании ископаемого топлива. При этом расходы на сырьё и получение из него электроэнергии у солнечных элементов очень низкие, по сравнению с ядерным и твёрдым топливом. Благодаря этому, снижается стоимость электричества [1].

Несмотря на свои преимущества органические солнечные элементы имеют очень низкий коэффициент полезного действия (КПД), который на данный момент составляет 15.7% [2]. КПД сильно зависит от вольтамперной характеристики устройства, вид которой, в свою очередь, зависит от внутреннего и шунтирующего сопротивлений [3]. Поэтому необходимо учитывать эти физические величины при моделировании работы и получении солнечных элементов. В данной статье моделируется работа освещённого солнечного элемента в случаях с учётом как внутреннего сопротивления, так и внутреннего сопротивления с сопротивлением шунта.

Эквивалентная схема солнечного элемента представлена на рисунке 1.

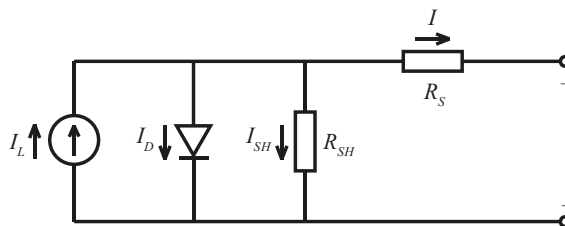


Рис. 1 – Эквивалентная схема солнечного элемента

I_L – фототок; I_D – ток диода; I_{SH} – ток шунта R_S – внутреннее сопротивление; R_{SH} – сопротивление шунта, I – общий ток

ВАХ освещенного солнечного элемента с учетом внутреннего и внешнего сопротивлений описывается уравнением:

$$J = J_S \left(\exp \left(\frac{q(V + JR_S)}{nkT} \right) - 1 \right) + \frac{V - JR_S}{R_{SH}} - J_L \quad (1)$$

где J – плотность тока; J_S – плотность тока насыщения q – элементарный заряд; V – напряжение; n – фактор идеальности диода; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; J_L – плотность фототока;

Уравнение (1) описывает ВАХ для участка с определённой площадью поперечного сечения, что позволяет сравнивать устройства с разными габаритами [4]. Общий вид графика ВАХ представлен на рисунке 2.

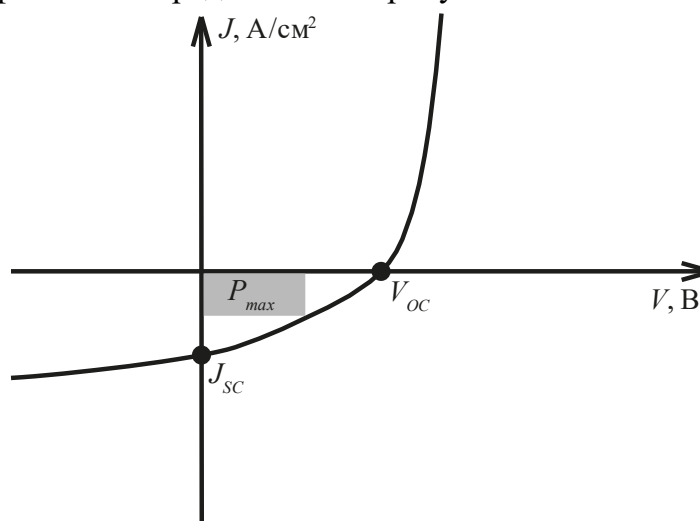


Рис. 2 – График ВАХ освещенного солнечного элемента

V_{OC} – напряжение холостого хода; J_{SC} – плотность тока короткого замыкания; P_{max} – максимальная мощность; V – напряжение; J – плотность тока

Из графика определяются напряжение холостого хода и плотность тока короткого замыкания. Зная эти параметры, можно найти максимальную мощность и коэффициент заполнения солнечного элемента. В общем случае, мощность будет равна:

$$P = JV = J_S V \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) - J_L V \quad (2)$$



Максимальная мощность P_{max} находится путём дифференцирования уравнения (2) по напряжению V и приравниванию производной к нулю. Отсюда соответствующие напряжение V_m и плотность тока J_m приблизительно равны:

$$V_m \approx V_{OC} - \frac{nkT}{q} \ln \left(1 + \frac{qV_m}{nkT} \right) \quad (3)$$

$$J_m \approx J_L \left(1 - \frac{nkT}{qV_m} \right) \quad (4)$$

Произведение выражений (3) и (4) дает максимальную мощность P_{max} солнечного элемента:

$$P_{max} = J_m V_m \approx J_L \left(V_{OC} - \frac{nkT}{q} \ln \left(1 + \frac{qU_m}{nkT} \right) - \frac{nkT}{q} \right) \quad (5)$$

Исходя из вычисленной в (5) максимальной мощности можно найти коэффициент заполнения FF и КПД η :

$$FF = \frac{P_{max}}{J_{SC} V_{OC}} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{J_{SC} V_{OC} FF}{P_{in}} \quad (7)$$

где P_{in} – мощность солнечного излучения.

Коэффициент заполнения FF показывает насколько реальная ВАХ отличается от идеальной, которая представляет собой прямоугольник со сторонами V_{OC} и J_{SC} . Как и КПД, он является одним из важнейших параметров, характеризующих солнечный элемент [5].

Моделирование и расчёт параметров солнечного элемента проводилось в программе `grvdm` при температуре 300 К и стандартном солнечном спектре AM1.5G мощностью 1 кВт/м² в соответствии с [6]. Структура солнечного элемента представлена на рисунке 3. Слой из оксида индия-олова (ITO) и алюминия (Al) с фторидом лития (LiF) являются соответственно анодом и катодом для подключения устройства в электрическую цепь. В полимерном слое PEDOT:PSS происходит инжекция дырок, образовавшихся в результате генерации электронно-дырочных пар в активном слое из смеси полимеров P3HT:PCBM [7].

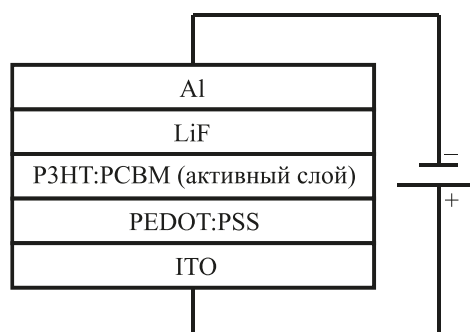


Рис. 3 – Структура солнечного элемента



Интерфейс программы gpvdm изображен на рисунке 4. Программа позволяет моделировать работу различных полупроводниковых устройств в том числе органических светодиодов и транзисторов.

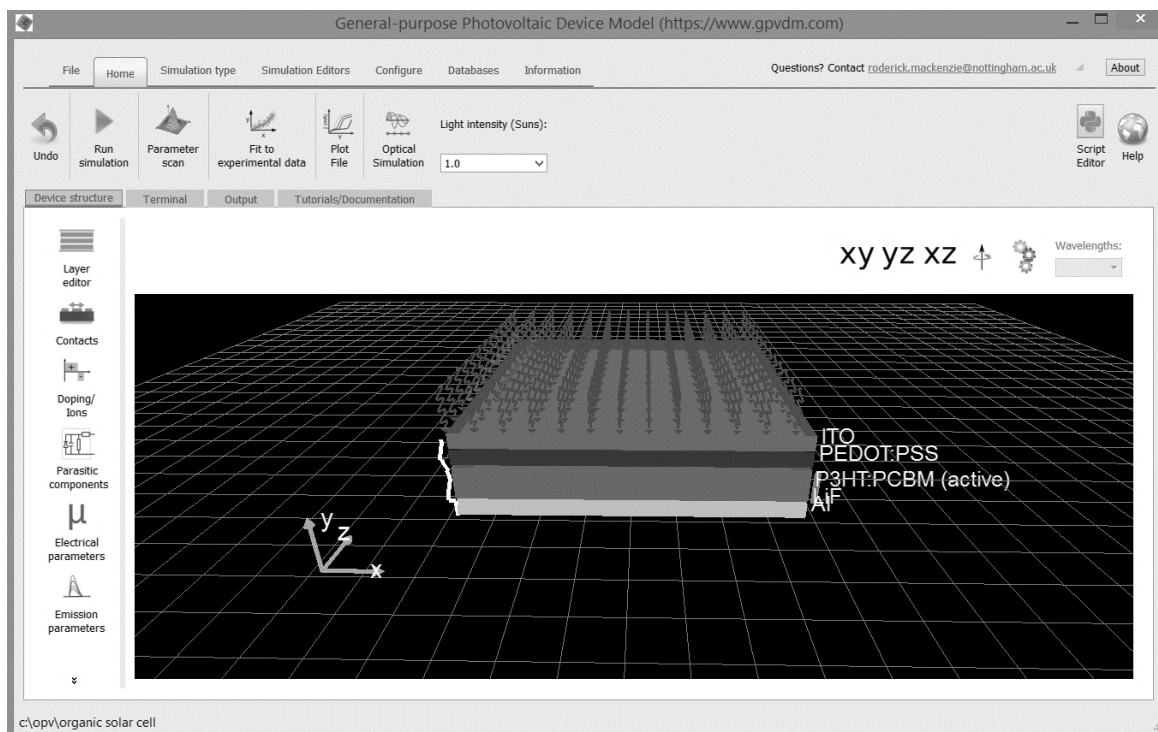


Рис. 4 – Интерфейс программы gpvdm

В окне Layer Editor программы gpvdm задаются толщина и тип каждого слоя. В программе существует 3 типа слоя: другой, контактный и активный. В активном слое толщиной $2.2 \cdot 10^{-7}$ м, состоящим из вещества P3HT:PCBM, происходит генерация и рекомбинация электронно-дырочных пар.

Для учета внутреннего и шунтирующего сопротивлений, в окне Parasitic Components задаются их значения. При учете одного внутреннего сопротивления, шунтирующее сопротивление задается намного большим, чем внутреннее. Для этого случая внутреннее сопротивление и сопротивление шунта имеют значения 19.5 и 10^6 Ом соответственно. При учете шунта, его сопротивление равно $1.7 \cdot 10^3$ Ом при том же внутреннем сопротивлении.

Значения плотности тока рассчитываются для интервала напряжений от -0.2 до 0.8 В с шагом 0.05 В. Эти параметры задаются в окне JV experiment window, показанном на рисунке 5.

Расчет начинается при нажатии кнопки Run Simulation вкладки Home. Во вкладке Terminal можно увидеть для каждого соответствующего значения напряжения соответствующее значение силы и плотности тока, как это показано на рисунке 6. Также здесь отображены значения основных параметров солнечного элемента.

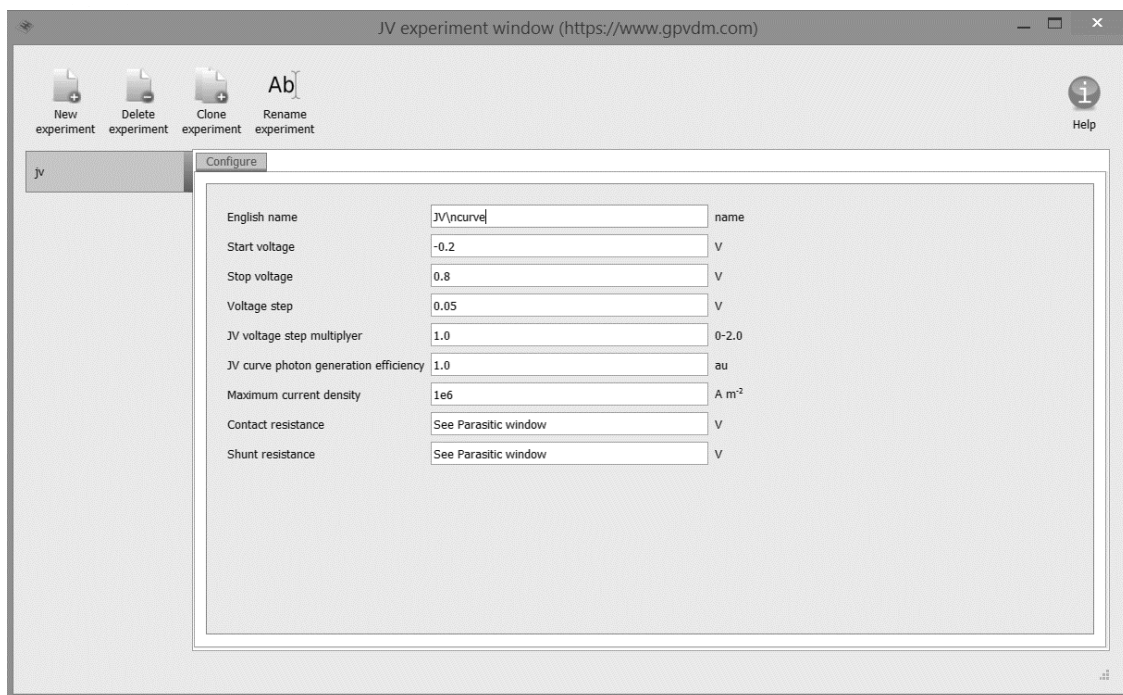


Рис. 5 – Окно JV experiment window

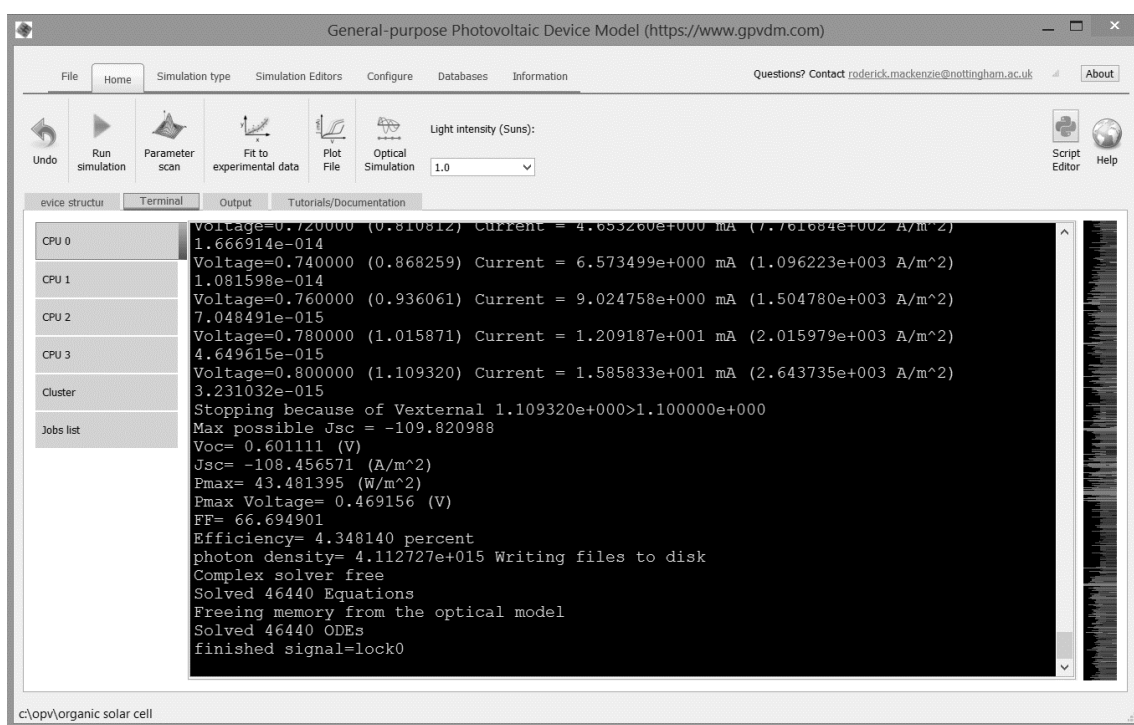


Рис. 6 – Вкладка Terminal программы gpvdm

На основе этих данных были построены семейства ВАХ, представленных на рисунке 7.

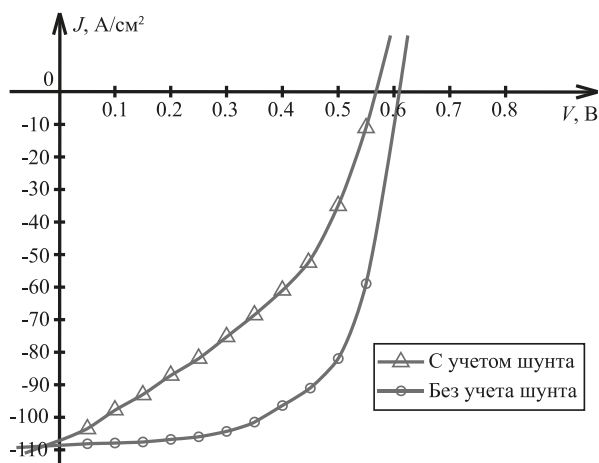


Рис. 7 – Семейства ВАХ солнечных элементов

В таблице 1 приведены основные параметры обоих солнечных элементов.

Таблица 1

Основные параметры солнечных элементов

Параметры	Без учета шунтирующего сопротивления	С учетом шунтирующего сопротивления
Плотность тока короткого замыкания J_{SC} , А/м ²	-108.457	-107.702
Напряжение холостого хода V_{OC} , В	0.601	0.562
Максимальная мощность P_{max} , Вт/м ²	43.481	24.428
Коэффициент заполнения FF , %	66.695	40.341
КПД η , %	4.35	2.44

Как видно из рисунка 7 и таблицы 1, у солнечного элемента, имеющего шунтирующее сопротивление, параметры хуже, чем у устройства с внутренним сопротивлением.

Список цитируемой литературы

1. Castillo L., Gutierrez W., Gore J. Renewable Energy Saves Water and Creates Jobs // Scientific American. – 2018. – URL: <https://www.scientificamerican.com/article/renewable-energy-saves-water-and-creates-jobs/#>
2. Jun Yuan, Yunqianq Zhang, Liuyang Zhou, ..., Jacek Ulanski, Youngfang Li, Yingping Zou Single-Junction Organic Solar Cell with over 15% Efficiency Using Fused-Ring Acceptor with Electron-Deficient Core. // Joule. – 2019. – Vol.3, Issue 4. – P. 1140-1151
3. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / Пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
4. Колосов Р. В. Моделирование солнечных батарей // Интеллектуальная электротехника. – 2019. – № 2. – С. 85-93
5. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011
6. ГОСТ Р МЭК 60904-3-2013 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Приборы фотоэлектрические. Часть 3. Принципы измерения характеристик фотоэлектрических приборов с учетом стандартной спектральной плотности энергетической освещенности наземного солнечного излучения. – введен в действие 01.01.2015. – М.: Стандартинформ, 2014
7. Дроздов Ф. В. Пономаренко С. А. Органические солнечные батареи – легкие, гибкие, полупрозрачные // Природа. – 2016. – № 4. – С. 3-14