

Модель элемента солнечной батареи типа CIGS

77-48211/479044

08, август 2012

Гарифулина М. Р., Власов А. И., Макачук В. В., Адамовик Н.

УДК. 621.311.6

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Австрия, Венский Технический Университет, институт сенсоров и исполнительных систем

mariamgarifulina@gmail.com

Введение

Солнечные батареи, изготовленные из пластины кристаллического или поликристаллического кремния, сегодня являются доминирующей технологией коммерческого рынка. Однако, стоимость таких батарей достаточно высока [1]. Другим типом солнечных батарей являются тонкопленочные солнечные батареи [2]. Тонкопленочная технология обладает рядом преимуществ, таких как низкий расход материала (в солнечных батареях первого поколения толщина слоя абсорбера составляет 100-150 мкм [3], в то время как у тонкопленочных батарей она составляет 1,5-2,5 мкм [4]), что приводит к сокращению затрат на производство, нанесение тонкопленочных элементов возможно на поверхности любой конфигурации (поверхность автомобиля, стеклянные фасады зданий) [1], способность эффективно воспринимать рассеянное солнечное излучение [1], сравнительно высокий КПД (до 20% [1]), сравнительно продолжительный срок службы (КПД снижается на 10-15% от первоначального КПД [5]).

Вопросы реализации эффективных солнечных батарей были рассмотрены в работах Lian Wei Wang [6], Allen Barnett, Douglas Kirkpatrick, Christiana Honsberg, Duncan Moore, Mark Wanlass, Keith Emery [7]. Так в работе Lian Wei Wang было предложено усовершенствовать технологию производства кремниевых солнечных батарей, в то время как в работе Allen Barnett была представлена новая структура солнечной батареи.

Вопросы реализации солнечных батарей на основе тонкопленочных технологий исследуются многочисленными исследовательскими институтами и компаниями мира, такими как Daystar, Iowa Thin Film Technologies, Nanosolar, Konarka, Nanosys, NREL и United Solar Ovonic. Данные компании поставили цель увеличения КПД, в то время как кафедра электроники и информационных систем (ELIS) университет Гента продемонстрировала принципиально новую технологию производства солнечных батарей на основе печати. КПД солнечных батарей, произведенных с помощью данной технологии, не превосходит 10,6%, при этом цена данной солнечной батареи гораздо ниже вследствие дешевой и быстрой технологии производства солнечных батарей.

Под КПД элементов солнечных батарей будем понимать коэффициент фотоэлектрического преобразования (%) – отношение полезно использованной (преобразованной) энергии к суммарному количеству энергии (падающему излучению).

Основными проблемами являются сложность технологического процесса, сравнительно низкий КПД солнечных батарей в целом, потребность в больших площадях, необходимых для их эксплуатации.

Цель работы – усовершенствование тонкопленочной солнечной батареи для получения максимального КПД.

Для достижения указанной цели в работе решен следующий комплекс задач: моделирование солнечной батареи в среде COMSOL Multiphysics, обработка результатов с помощью LABVIEW, подбор таких параметров солнечных батарей, которые дают максимальный КПД солнечных батарей.

Научная новизна работы состоит в предложенной модификации тонкопленочной солнечной батареи, основанной на сочетании таких элементов как медь, индий, галлий и селен (обозначающаяся $Cu(In, Ga)Se_2$ или (CIGS)), которая дает максимальный КПД при рассматриваемом технологическом процессе.

В результате исследований дана оценка КПД солнечной батареи в зависимости от ширины функционального элемента солнечной батареи.

Таблица 1.1 - Максимальные значения эффективности фотоэлементов и модулей, достигнутые в лабораторных условиях [10]

Тип солнечного элемента	Коэффициент фотоэлектрического преобразования, % [10]
Кремниевые солнечные батареи	
Si (кристаллический)	24,7
Si (поликристаллический)	20,3
Si (тонкопленочная передача)	16,6
Si (тонкопленочный субмодуль)	10,4
Солнечные батареи на основе соединения элементов III и V группы (III-V)	
GaAs (кристаллический)	25,1
GaAs (тонкопленочный)	24,5
GaAs (поликристаллический)	18,2
InP (кристаллический)	21,9
Тонкие пленки халькогенидов	
CIGS (фотоэлемент)	19,9
CIGS (субмодуль)	16,6
CdTe (фотоэлемент)	16,5
Солнечные батареи на основе аморфного/ нанокристаллического кремния	
Si (аморфный)	9,5
Si (нанокристаллический)	10,1
Фотохимические солнечные батареи	
На базе органических красителей	10,4
На базе органических красителей (субмодуль)	7,9
Органические солнечные батареи	
Органический полимер	5,15
Многослойные солнечные батареи	
GaInP/GaAs/Ge	32,0
GaInP/GaAs	30,3
GaAs/CIS (тонкопленочный)	25,8
a-Si/mc-Si (тонкий субмодуль)	11,7

Максимальная эффективность достигнута для солнечных батарей GaInP/GaAs/Ge (32,0%), при этом солнечные батареи типа CIGS имеют КПД 19,9 %.

Для производства тонкопленочных солнечных элементов одним из наиболее эффективных материалов-абсорберов солнечного света является соединение $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) [10]. К настоящему времени достигнуты

высокие значения эффективности единичных солнечных элементов (СЭ) с использованием данного материала. Рекордная эффективность преобразования (~19,9%) характерна для CIGS СЭ с площадью всего ~ 0,4 см² [10].

2 Анализ принципа функционирования солнечных батарей

Общий принцип действия солнечных батарей иллюстрирует рисунок 2.1.

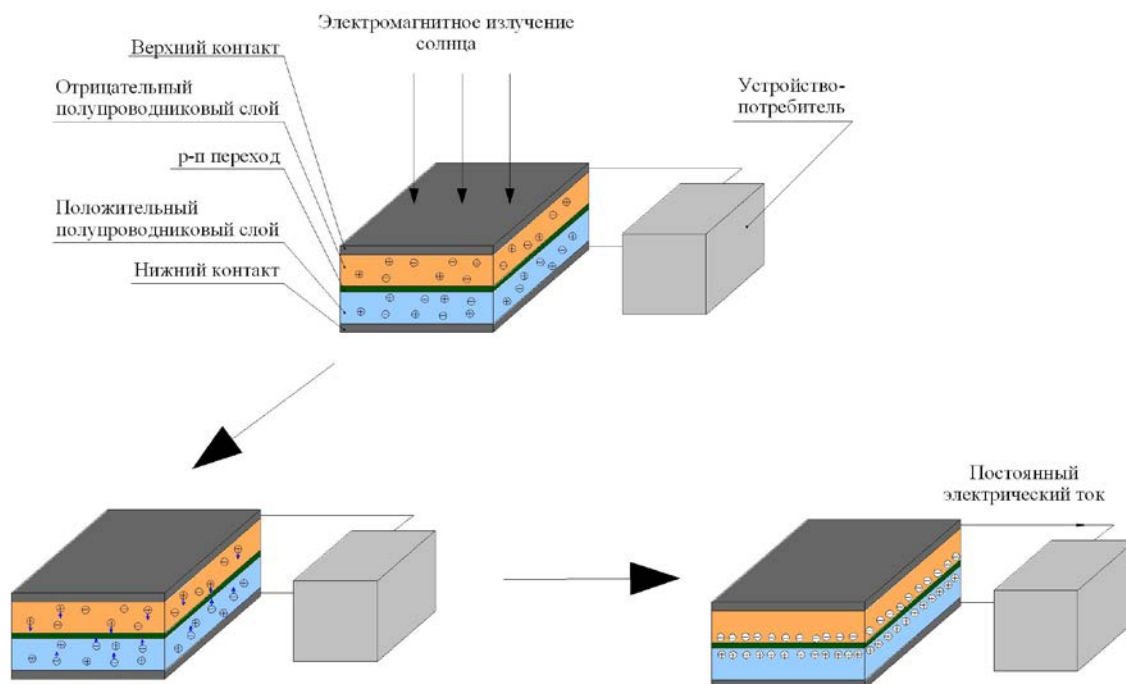


Рисунок 2.1 – Общий принцип действия солнечной батареи [11]

Частицы электромагнитного излучения (фотоны) падают на поверхность солнечного фотоэлемента. Если у фотона энергия меньше энергии запрещенной зоны, то он слабо взаимодействует с проводником. В том случае, если энергия фотона выше энергии запрещенной зоны, то взаимодействует с электронами, имеющие ковалентную связь, используя собственную энергию, фотон разрывает связь и создает электронно-дырочную пару [12]. Другими словами фотоны активизируют взаимное перемещение электрических зарядов в отрицательном n – слое и положительном p – слое. В пограничной зоне p – слоя в результате этого формируется некомпенсированный отрицательный заряд, а в

пограничной зоне n-слоя некомпенсированный положительный заряд. Таким образом формируется р – n переход. Возникшая разность потенциалов в р – n переходе вызывает фотоэлектродвижущую силу, вследствие чего на устройство-потребитель, присоединенное к верхнему и нижнему контактам солнечного фотоэлемента, подается постоянный электрический ток [11].

3 Структура элемента типа CIGS

Подложкой для солнечного элемента типа CIGS служит натриево-кальциево-силикатное стекло. Контакт к тыльной поверхности стекла, являющийся одним из выводов солнечного элемента, формируется путем осаждения слоя молибдена. На поверхность этого слоя осаждается легко абсорбирующийся слой, состоящий из полупроводникового материала вида $Cu(In,Ga)Se_2$ толщиной всего в несколько микрон. Затем на его поверхности создается тонкий буферный слой сульфида кадмия CdS или цинка $Zn(O,S)$, имеющий достаточно высокое сопротивление. На заключительном этапе технологического цикла создания солнечного элемента формируется прозрачный передний контакт, материалом для которого служит алюминий Al с небольшой добавкой той же окиси цинка ZnO . Вертикальный профиль получающейся структуры показан на рисунке 3.1.

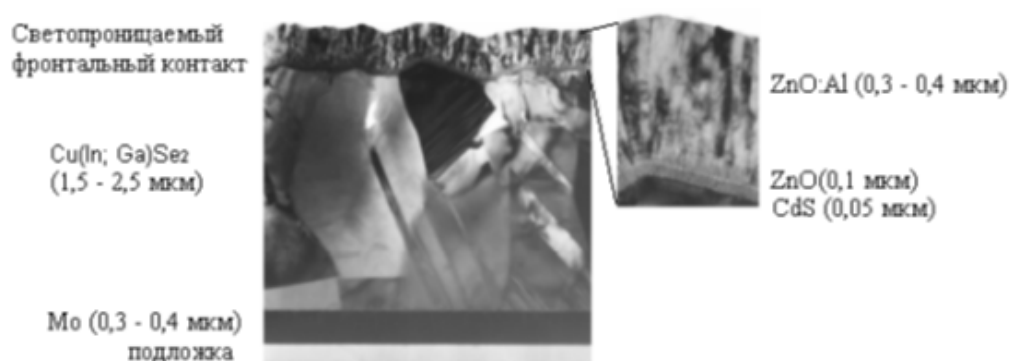


Рисунок 3.1 – Вертикальный профиль структуры [13]

1. Светопроницаемый фронтальный слой ($ZnO:Al$ и ZnO), 2. CdS буфер, 3. $Cu(In, Ga)Se_2$, 4. Mo , 5. Подложка

Верхний слой является светопроницаемым фронтальным слоем. Данный слой имеет очень важное значение – он обеспечивает поперечное движение фототока с минимально возможными омическими потерями, передача света в свой абсорбера и является одним из элементов формирования гетероперехода. В качестве данного слоя используют $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO). Однако данное соединение значительно дороже, чем оксид цинка, легированного алюминием $\text{ZnO}:\text{Al}$ (AZO или ZAO). Данный материал также определен, как полупроводник с широкой шириной запрещенной зоны (3,3 eV). Прозрачный передний слой обычно состоит из двух слоев: тонкого (35 - 100 нм) слоя чистого оксида цинка (i-ZnO) и толстого (300 - 1000 нм) слоя оксида цинка, легированного алюминием ($\text{ZnO}:\text{Al}$ или ZAO) с 2%-ным содержанием Al [14]. Буферный слой CdS составляет 50 нм. По исследованиям Олсена [15] роль буферного слоя заключается в предотвращении диффузии ионов алюминия во время распыления верхнего контакта. $\text{ZnO}:\text{Al}$. При высокочастотном напылении буферного слоя происходит движение Cu к поверхности. Поэтому также ролью буферного слоя является экранирование абсорбера от электрического поля, появляющегося при напылении. Слой абсорбера играет роль диселенида меди, индия, галлия ($\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$), поэтому по первым буквам материала абсорбера дали название данной солнечной батарее. Тыльный контакт обычно выполнен из тонкого слоя молибдена (Mo), имеющего низкое контактное удельное сопротивление ($\rho_c \sim 0,08 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$) поверхности между молибденом (Mo) и абсорбером CIGS. Самая распространенная подложка – натриево-силикатное стекло толщиной около 3 мм толщиной. Из-за относительно высоких температур (около 550°C) последующего процесса осаждения использование гибких подложек ограничено в действительности такими материалами как полиимид и фольга из нержавеющей стали или титана [14].

4 Выходные параметры солнечного элемента

Для описания солнечных элементов используется вольт-амперная характеристика (ВАХ) [16]. На рисунке 4.1 представлена типовая ВАХ солнечного элемента со следующими выходными параметрами:

- Ток короткого замыкания, $I_{кз}$, максимальный ток при нулевом напряжении. Также для описания выходных параметров солнечного элемента распространен такой термин как плотность тока короткого замыкания, $J_{кз}$.
- Напряжение холостого хода, $V_{хх}$, максимальное напряжение при нулевом токе.
- Точка оптимальной мощности, P_{MAX} , максимальная выходная мощность при оптимальных условиях эксплуатации, т.е. $P_{MAX} = V_{MAX} I_{MAX}$.
- Коэффициент заполнения, FF, определяет заполняемость вольт-амперной характеристики, отношение максимально получаемой мощности к максимально возможной мощности солнечной батареи:

$$FF = \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{V_{ХХ} I_{КЗ}} = \frac{P_{MAX}}{V_{ХХ} I_{КЗ}} \quad (4.1)$$

- КПД, коэффициент преобразования энергии, является отношением максимальной снимаемой мощности к мощности падающего солнечного потока или, что тоже самое, но с использованием понятия коэффициента заполнения, это произведение коэффициента заполнения и отношения максимально возможной мощности солнечной батареи к мощности солнечного потока:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{ЕК}} = \frac{V_{ХХ} I_{КЗ} FF}{P_{ЕК}} \quad (4.2)$$

где $P_{\text{вх}}$ – мощность светового потока.

- Пиковая мощность ($W_{\text{п}}$) – выходная мощность при стандартном режиме тестирования, т.е. $W_{\text{п}}=P_{\text{МАХ}}$ при стандартном режиме тестирования. Снятие ВАХ обычно производится при стандартным режиме тестирования: интенсивность излучения 1000 Вт/м^2 , температура 25°C и Солнечный спектр $AM1,5$. Модули обычно оценивают по пиковой мощности.

На рисунке 4.1 представлена типовая вольт-амперная характеристика, на которой изображены стандартные ВАХ для элемента солнечной батареи в дневное и ночное время (ток короткого замыкания - $I_{\text{кз}}$, напряжение холостого хода - $V_{\text{хх}}$, точка оптимальной мощности - $I_{\text{МАХ}}$ и $V_{\text{МАХ}}$).

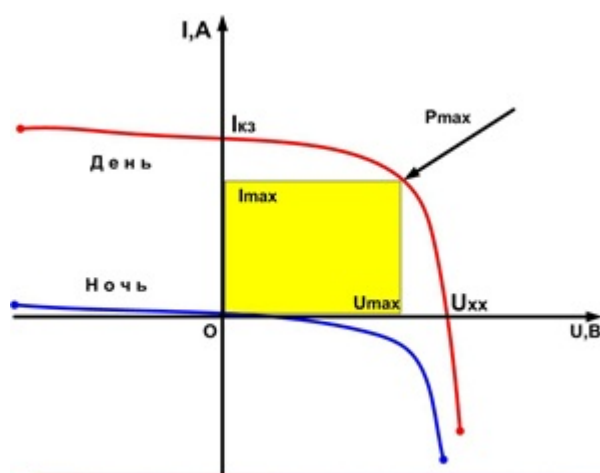


Рисунок 4.1 - Типовая вольт-амперная характеристика солнечного элемента в дневное и ночное время [17]

На рисунке 2.2 желтым прямоугольником выделен диапазон выходной мощности солнечного модуля, при этом $P_{\text{МАХ}}$ является точкой максимальной мощности.

Солнечный элемент CIGS - это диод с гетеропереходом. Гетеропереход формируется с помощью двух различных полупроводниковых материалов, таких как CIGS p-типа и верхнего слоя ZnO:Al n-типа. Ток через диод, $I_{\text{д}}$, описывается следующим уравнением диода [18]:

$$I_d = I_0 (e^{qV/AkT} - 1) \quad (4.3)$$

где V – приложенное напряжение,

I_0 – ток насыщения диода,

q – заряд электрона,

A – фактор идеальности,

k – постоянная Больцмана,

T – температура.

Для освещенного солнечного элемента уравнение диода принимает вид:

$$I = I_d - I_\Phi = I_0 (e^{qV/AkT} - 1) - I_\Phi \quad (4.4)$$

где I_Φ – фототок.

В действительности, используется только первый квадрант вольт-амперной характеристики, представленный ниже:

$$I = I_\Phi - I_0 (e^{qV/AkT} - 1) \quad (4.5)$$

5 Модель солнечного элемента типа CIGS

Как уже было показано в классической монографии [2], элемент солнечной батареи типа CIGS может быть представлен электрической схемой, получившей название «модель одного диода». Данная модель состоит из генератора тока, параллельно которому подключены диод и шунтирующий резистор $R_{ш}$. Помимо них к одному из выводов генератора тока последовательно подсоединено сопротивление R_n . В результате общая эквивалентная схема модели принимает вид, показанный на рисунке 5.1.

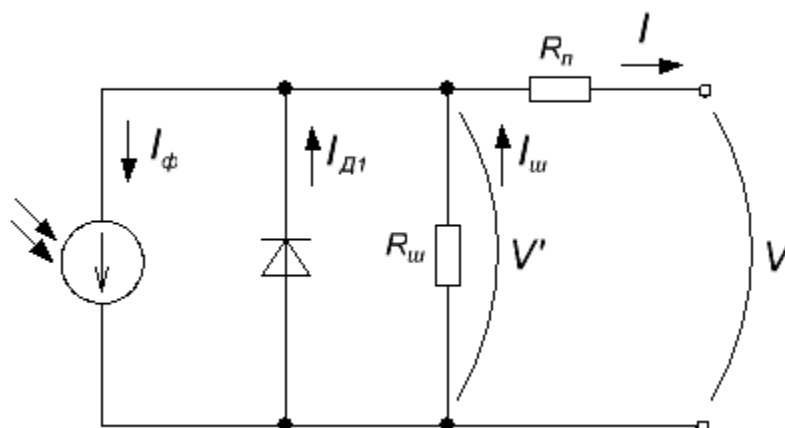


Рисунок 5.1 – Эквивалентная схема элемента солнечной батареи на основе «модели одного диода»

Для данной модели согласно первому закону Кирхгофа можно записать:

$$I = I_{\text{д}} + I_{\text{ш}} - I_{\phi} \quad (5.1)$$

А согласно второму закону Кирхгофа::

$$V' = V - IR_n \quad (5.2)$$

Известно, что величина тока, протекающего через р-п-переход (то есть через диод) зависит от приложенного к нему напряжения V' согласно следующему выражению:

$$I_{\text{д}} = I_0 (e^{qV'/AkT} - 1) \quad (5.3)$$

Подставляя выражение (5.3) в (5.2), получим:

$$I_{\text{д}} = I_0 (e^{qV'/AkT} - 1) = I_0 (e^{q(V-IR_n)/AkT} - 1) \quad (5.4)$$

Величину тока, протекающего через элемент $R_{ш}$, можно получить воспользовавшись законом Ома и выражением (5.2):

$$I_{\text{ш}} = \frac{V'}{R_{ш}} = \frac{V-IR_n}{R_{ш}} \quad (5.5)$$

Поставив выражения (5.5) и (5.4) в (5.1) ток, протекающий через диод, в модели одного диода может быть определен следующим образом:

$$I = I_0 \left(e^{q(V-IR_{ш})/kT} - 1 \right) + \frac{V-IR_{ш}}{R_{ш}} - I_{\Phi}. \quad (5.6)$$

Основываясь на данной математической модели, можно произвести физическое моделирование процессов, проходящих в солнечной батарее, с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics.

6 Моделирование элемента солнечной батареи типа CIGS

Модель элемента солнечного элемента CIGS должна быть получена при использовании электрических, оптических и геометрических параметров [13]. Свет поглощается с помощью элемента солнечной батареи и генерируется ток. В верхнем слое происходит поглощение света. Данный слой не идеален, поэтому он приводит к оптическим потерям. Основные последовательные сопротивления и шунтирующее сопротивление солнечного элемента CIGS представлена на рисунке 6.1. Поперечный ток в верхнем слое (ZnO:Al) и тыльном контакте (Mo) не одинаков, и поэтому эти слои создают распределенные последовательные сопротивления. Распределенные последовательные сопротивления $R_{\text{ZnO:Al},1}$, $R_{\text{ZnO:Al},2}$, ..., $R_{\text{ZnO:Al},n}$ для ZnO:Al и $R_{\text{Mo},1}$, $R_{\text{Mo},2}$, ..., $R_{\text{Mo},n}$ для Mo как представлено на рисунке 6.1. Существует также дополнительное сопротивление $R_{c,1}$ и $R_{c,2}$ на границе ZnO:Al - проводящая паста и проводящая паста - молибден. Слой CIGS обеспечивает шунтирующую цепь между фронтальным и тыльным контактом. На рисунке 6.1 данная шунтирующая цепь представлена резисторами $R_{ш,1}$, $R_{ш,2}$, ..., $R_{ш,n}$. Межкомпонентная структура вводит потери активной зоны. В целом это приводит к набору нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, который может быть решен численно.

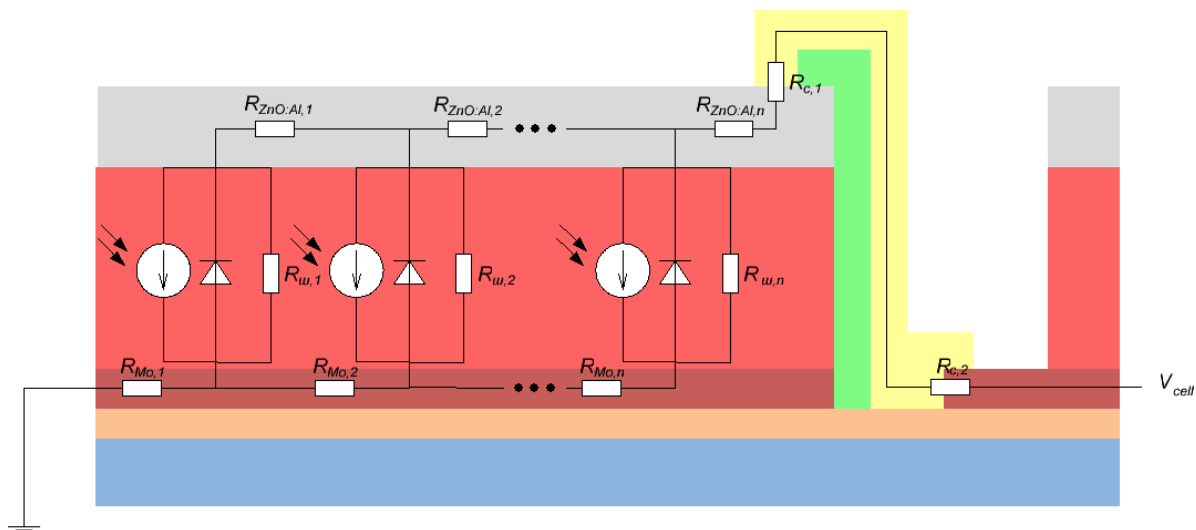


Рисунок 6.1 – Эквивалентная электрическая схема солнечного элемента CIGS

На рисунке 6.1 представлена эквивалентная электрическая схема солнечного элемента CIGS, построенная на модели одного диода, шунтирующих сопротивлениях и сопротивлениях потерь.

Для моделирования элемента солнечной батареи типа CIGS используем среду COMSOL Multiphysics. Физический процесс, происходящий в слое абсорбера, можно описать формулой 6.1, основанной на формуле 5.6, полученной в предыдущей главе:

$$J = J_0 \left(e^{q(V - IR_{\text{ш}})/AkT} - 1 \right) + \frac{V - JR_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} - J_{\Phi} \quad (6.1)$$

Данный элемент солнечной батареи был промоделирован для напряжения V в диапазоне от 0 В до $0,65 \text{ В}$ (вследствие того, что данная модель основана на модели одного диода) и для каждого напряжения получена плотность тока J .

Рисунок 6.2 показывает потенциальное распределение в элементе солнечной батареи для $V=0,1 \text{ В}$.

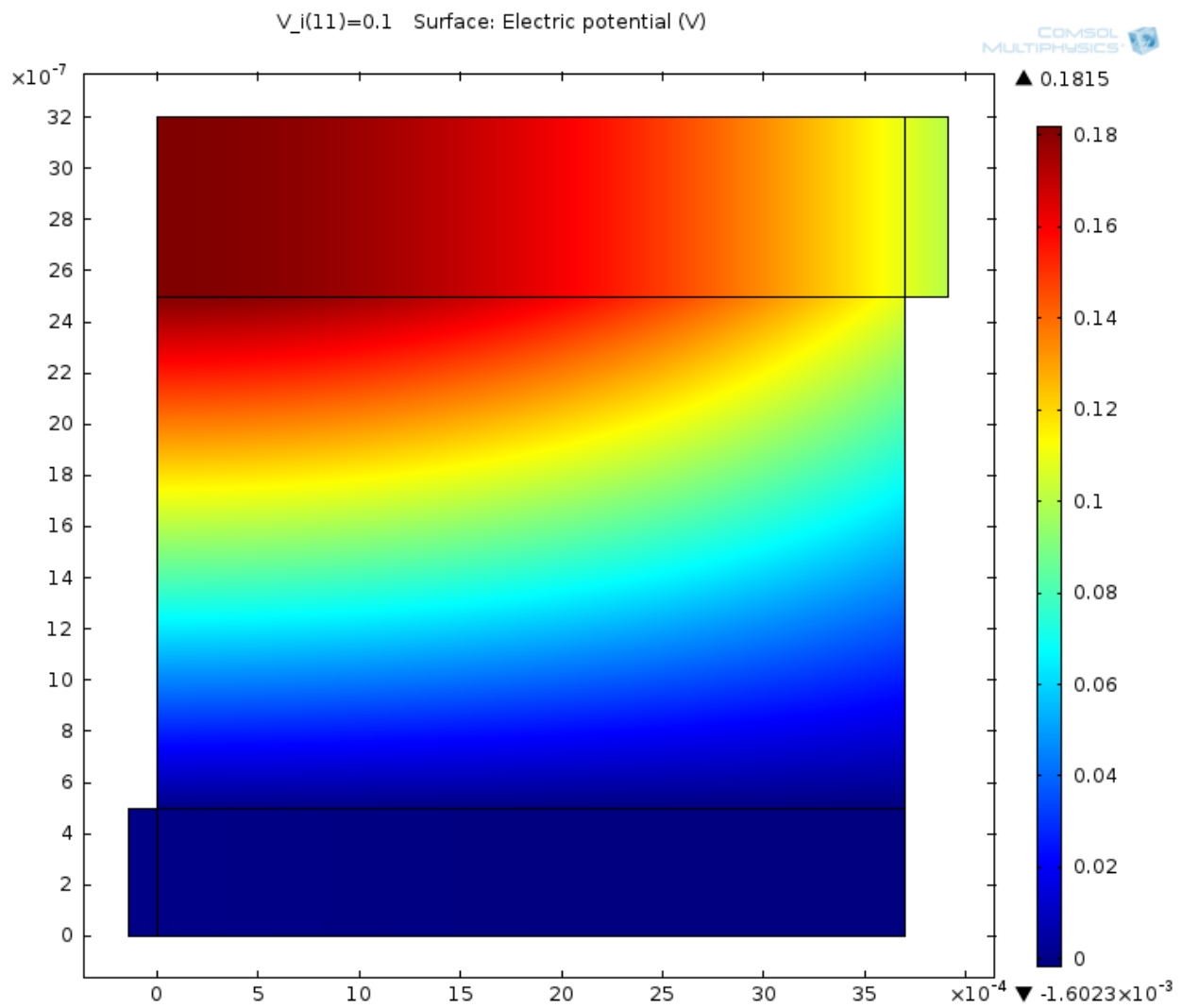


Рисунок 6.2 – Потенциально распределение солнечного элемента при $V=0,1 \text{ В}$

На рисунке 6.3 представлена зависимость нормированной плотности тока элемента солнечной батареи типа CIGS от его напряжения, полученное с помощью COMSOL Multiphysics.

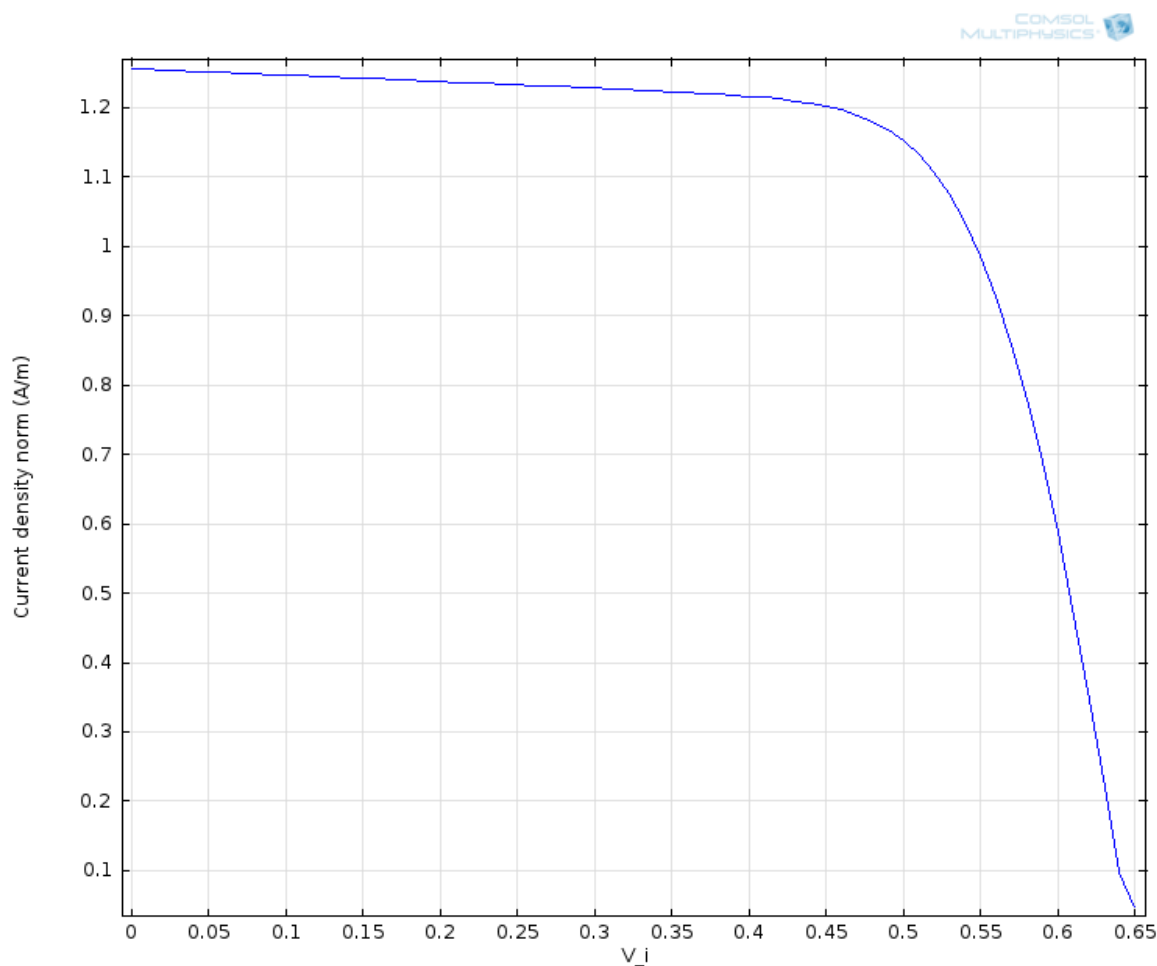


Рисунок 6.3 - Графическое представление зависимости нормированной плотности тока элемента солнечной батареи от его напряжения, полученное с помощью COMSOL Multiphysics

Для получения максимального КПД солнечной батареи η необходимо произвести моделирование данной элемента солнечной батареи при различных значениях параметра w - толщины элемента солнечной батареи, при этом каждый раз снимая полученную зависимость нормированной плотности тока от напряжения элемента. Площадь солнечного модуля составляет 264 см^2 . В таблице 6.1 представлены изменяемые параметры солнечной батареи, такие как толщина элемента солнечной батареи w , количество элементов в модуле n , общая площадь S , занимаемая модулем, доля потерь, последовательное сопротивление $R_{_s}$.

Таблица 6.1. Изменяемые параметры солнечной батареи

w [мм]	n [-]	S [см ²]	Доля потерь [%]	R _s [Ом·см ²]
1.0	220	264,0	30.0	0.4
1.5	146	262,8	20.0	0.6
2.0	110	264,0	15.0	0.8
2.5	88	264,0	12.0	1.0
3.0	73	262,8	10.0	1.2
3.5	62	260,4	8.6	1.4
4.0	55	264,0	7.5	1.6
5.0	44	264,0	6.0	2.0
6.0	36	259,2	5.0	2.4
7.0	31	260,4	4.0	2.8
8.0	27	259,2	3.5	3.2
9.0	24	259,2	3.0	3.6

Для моделирования элемента при различном значении ширины элемента солнечной батареи необходимо знать значение последовательного сопротивления R_s , вследствие того, что это значение не является постоянным при различном значении ширины – при увеличении ширины элемента, последовательное сопротивление увеличивается в связи с потерями в верхнем проводящем слое.

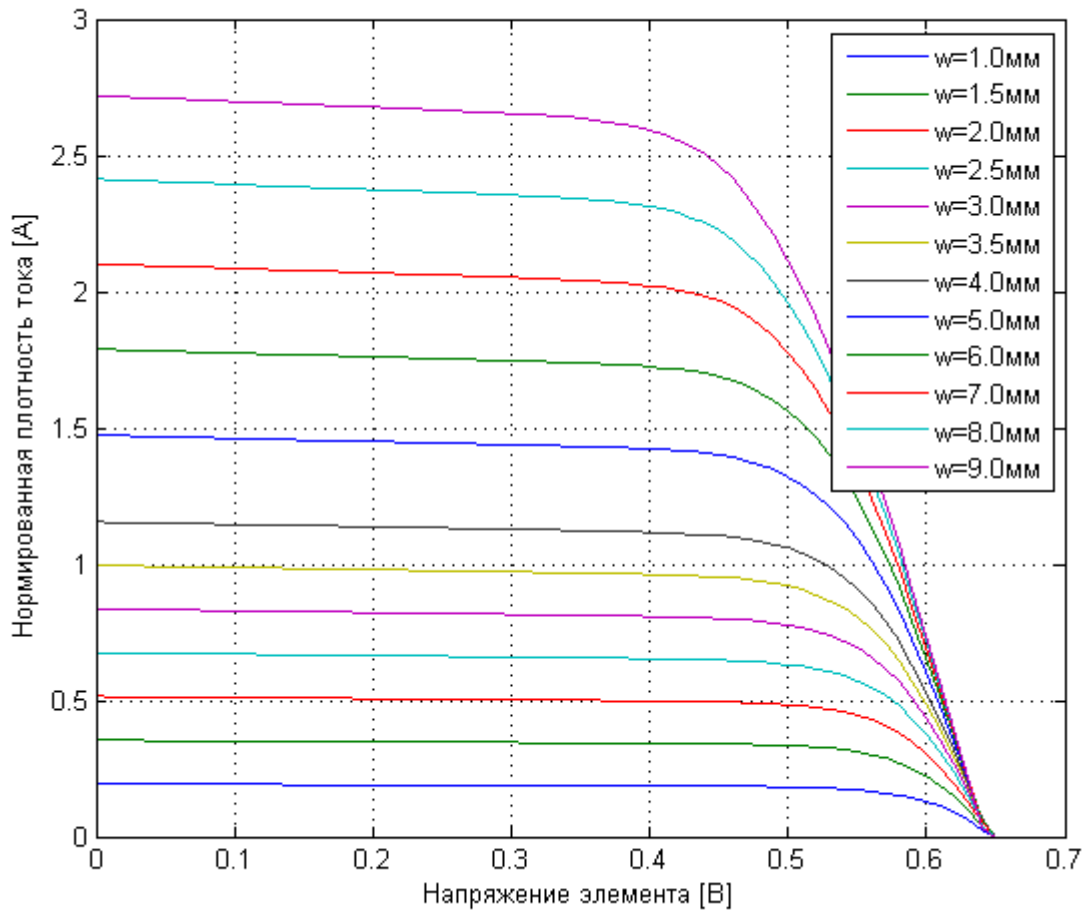


Рисунок 6.4 - Зависимость нормированной плотности тока от напряжения при изменении ширины элемента солнечной батареи типа CIGS

Данные, полученные в COMSOL Multiphysics, обрабатываются с помощью программной среды MATLAB.

Рисунок 6.5 демонстрирует вольт-амперные характеристики при различных значениях ширины элемента солнечной батареи.

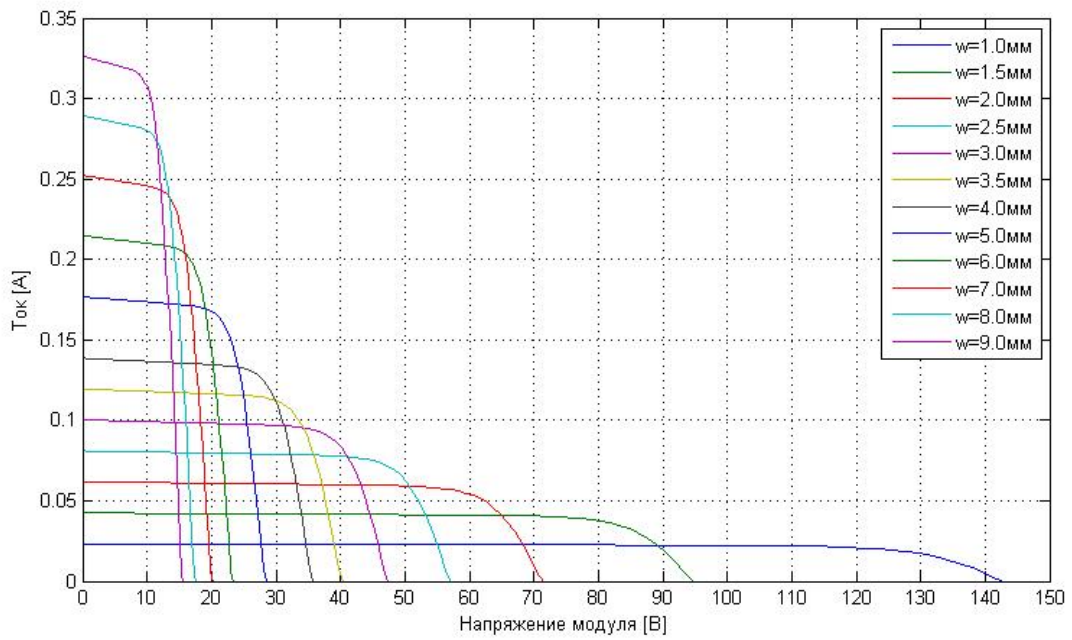


Рисунок 6.5 – Вольт-амперная характеристика при различных значениях ширины элемента солнечной батареи

Далее производится расчет производительности модуля солнечной батареи типа CIGS.

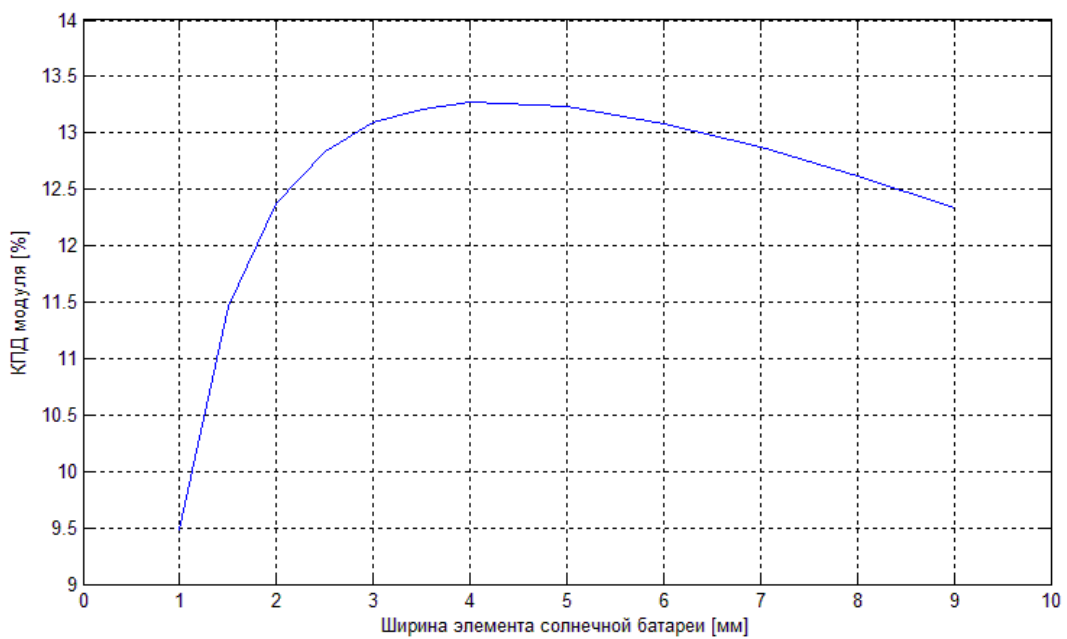


Рисунок 6.6 – Зависимость КПД модуля солнечной батареи от ширины элемента солнечной батареи типа CIGS

На рисунке 6.6 изображена зависимость КПД солнечного модуля от ширины элемента солнечной батареи. Кривая, представленная на рисунке 6.6, имеет экстремум в точке [4, 13, 27]. Согласно данным графика максимальная производительность достигается при ширине элемента солнечной батареи $w = 4$ мм, при этом $KПД=13,27\%$. Данная зависимость объясняется тем, что при увеличении ширины элемента солнечной батареи с одной стороны уменьшается для пассивной области, что приводит к повышению КПД, а с другой стороны увеличивает последовательное сопротивление, что снижает КПД. Более того, данная кривая до значения ширины элемента $w = 4$ мм очень резко возрастает, а после данного значения медленно падает. Для данной технологии производства (компания Sunplugged [4]), на которой было основано моделирование, КПД составляло 12%.

Заключение

В данной работе было проведено исследование поведения КПД солнечной батареи в зависимости от ширины элемента солнечной батареи. Согласно моделированию с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics и дальнейшей обработки полученных результатов с помощью MATLAB было получено, что максимальный КПД достигается при ширине элемента солнечной батареи $w = 4$ мм (Рисунок 6.6, экстремум), при этом $KПД=13,27\%$.

Список литературы

1. Энергосберегающие технологии и источники альтернативной энергии [электронный ресурс <http://www.solarbat.info>], дата обращения 09.05.2012.
2. Y. Hamakawa (Ed.). Thin-Film Solar Cells. Next generation photovoltaics and its application. Springer. Photonics. UK. 15.10.2009.
3. СуперОкс. Солнечная энергетика [электронный ресурс <http://www.superox.ru>], дата обращения 09.05.2012.
4. Lianwei Wang, Jinchuan You, Jing Shi, Bobo Peng, and Paul K. Chu. Improving solar-cell efficiency // Newsroom. Hong Kong, China. 2008.
5. Allen Barnett, Douglas Kirtpatrick, Christiana Honsberg, Duncan Moore, Mark Wanlass, Keith Emery. Very high efficiency solar cell modules // Progress in photovoltaics research and applications. Wiley InterScience. 01.10.2008.
6. Marc Burgelman. Thin film solar cells by screen printing technology // Workshop microtechnology and thermal problems in electronics. University of Gent, Department of Electronics and Information Systems (ELIS). Gent. Belgium. 1998.
7. Nitel Solar: солнечная энергетика [электронный ресурс <http://www.nitolsolar.com/rutechnologies/>], дата обращения 09.05.2012.
8. Энергетика. Альтернативная энергия [электронный ресурс <http://energetics.com.ua>], дата обращения 10.05.2012.
9. Stuart R. Wenham, Martin A. Green, Muriel E. Watt, Richard Corkish. Applied photovoltaics, Earthscan, 2007.
10. Joar Johansson. Modelling and simulation of CIGS solar cell modules. Master thesis. 2007.
11. Ernigo Solvernigo. Deposition, characterization and optimization of the i-ZnO/ZAO layer system for new high efficiency Cu(In, Ga)Se₂ solar cells. Dissertation. 2006/2007.

12. L. C. Olsen, P. Eschbach and S. Kundu, Role of buffer layers in CIS-based solar cells 29th IEEE Photovoltaic specialists conference, New Orleans 2002.
13. S. Wenham, M. Green, M. Watt, Applied Photovoltaics, The University of New South Wales, Kensington, 2005.
14. W. Shafarman and L. Stolt, Cu(In; Ga)Se₂ Solar Cells, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2003.