

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

На правах рукописи

Гарифулина Марьям Равильевна

УДК 542.08

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ С ВЫСОКИМ
КПД НА БАЗЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЫ,
СОДЕРЖАЩЕЙ МЕДЬ, ИНДИЙ, ГАЛЛИЙ И СЕЛЕН

АВТОРЕФЕРАТ

Работы магистра по направлению 210200:

«Проектирование и технология производства ЭС»

Москва – 2010

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Макарчук В. В.

Научный консультант:

Доцент Макарчук В. В.

Ведущее предприятие:

Защита диссертационной работы магистра состоится 15 июня 2012 года на заседании Государственной аттестационной комиссии по направлению 210200: «Проектирование и технология электронных средств» в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана (ауд.278).

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба высылать по адресу: 105005, г.Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, ИУ-4.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 г.

Ученый секретарь Государственной квалификационной комиссии по направлению 210200:
«Проектирование и технология электронных средств»
Доцент, кандидат технических наук Лавров А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Традиционные источники энергии, такие как газ, нефть, уголь, истощаются с каждым годом все сильнее, в то время как потребление энергии растет из-за увеличения численности населения, использования электроники. При этом также при использовании данных источников энергии вопрос экологии в современном мире стал одним из самых первых. При сокращении земных запасов энергоресурсов цена за 1 кВт растет с каждым годом. Сложившаяся атмосфера нуждается в поиске новых энергоресурсов – альтернативных источников энергии, одним из которых является солнце. Поэтому развитие индустрии солнечных элементов в настоящее время является возможностью заменить уже существующие источники солнечными батареями с высокой производительностью.

Цели и задачи работы: Целью настоящей работы является исследование такой технологии создания тонкопленочной батареи типа CIGS с высоким КПД, которое достигается при варьировании параметров солнечной батареи, таких как ширина, форма элемента солнечной батареи, используя такую технологию производства солнечных батарей данного типа, преимущества которой является быстрое производство (вследствие уменьшения количества скрайбирования с трех до одного), возможность использования гибкой подложки.

Для достижения данной цели в работе **решены следующие задачи:** для достижения поставленных целей были решены следующие задачи: анализ проблем мировой энергетики, анализ стоимости киловатта, анализ суточной солнечной иррадиации, исследование принципа работы солнечной батареи, исследование различных типов солнечных батарей, глубокое исследование солнечных батарей типа CIGS, исследование типовой и усовершенствованной технологии производства батарей данного типа, исследование математического описания элемента солнечной батареи, моделирование элемента солнечной батареи типа CIGS в COMSOL Multiphysics при варьируемом значении ширины элемента солнечной батареи, при различной конфигурации элемента солнечной батареи и дальнейшая обработка результатов с помощью MATLAB, сопоставление результатов, полученных при моделировании, с экспериментальными результатами.

Методы исследования

При решении поставленных задач использована физика твердого тела, электротехника, микроэлектроника, теория информационных систем, методики системного анализа, нанотехнологии, нанотехнологии, нанотехнологии, программный пакет COMSOL Multiphysics (на основе методе конечных элементов) и MATLAB.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Проведено исследование создания тонкопленочной солнечной батареи с высоким КПД;
- проанализированы тенденции развития солнечных батарей;
- разработана технология создания тонкопленочной солнечной батареи с высоким КПД.

Положения, выносимые на защиту:

- Солнечная батарея типа CIGS, которая обеспечивает КПД в пределах от 10% до 13,50%;
- моделируемая топология, позволяющая уменьшить затраты материала, уменьшить область потерь при постоянном значении последовательного сопротивления;
- усовершенствованная технология производства солнечных батарей типа CIGS, позволяющая уменьшить количество операций, тем самым сократить время производства одного модуля и его цену.

Практическая ценность работы состоит в том, что данные исследования солнечных батарей типа CIGS может увеличить КПД солнечной батареи данного типа, что приведет к получению гораздо большей электрической энергии, при этом данный тип солнечных батарей будет более востребованным в связи со своей относительной дешевизной и сравнительно высоким КПД.

Апробация работы

Результаты работы представлялись на Четвертой Всероссийской школе-семинаре студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия-2011», на отчете о проделанной работе в Венском Технологическом Университете, Вена, Австрия.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 2 печатных работах:

1. Гарифулина М.Р., Власов А.И., Макачук В.В., Адамовик Н. Модель элемента солнечной батареи типа CIGS// ВАК, Москва, 2012 г.
2. Гарифулина М.Р., Макачук В.В. Производство солнечных элементов типа CIGS// «XIV Молодежная международная научно-техническая конференция учащихся, студентов, аспирантов и молодых ученых «наукоемкие технологии и интеллектуальные системы - 2012» (Technology and systems - 2012)», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Апрель 2012 г.

СОДЕРЖАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Объектом исследования в данной работе является солнечные батареи, их исследование, усовершенствование технологии производства.

Цель данной работы – разработать технологию создания тонкопленочной солнечной батареи с высоким КПД на базе многослойной полупроводниковой структуры, содержащей медь, индий, галлий, селен, произвести анализ моделируемых результатов и сравнить полученные результаты с экспериментальными результатами.

Энергетика – одна из главных причин мировых экономических, финансовых и политических кризисов [1].

Из-за неравномерного распределения первичных органических ресурсов по миру, истощения запасов органического топлива, а также изменения климата вследствие вредного воздействия традиционной энергетики на окружающую среду необходимо принципиально изменить топливно-энергетический баланс планеты и сократить потребление газа, нефти и угля [1].

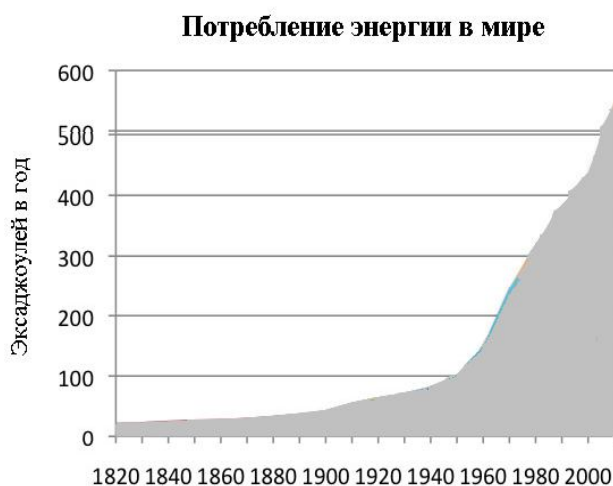


Рисунок 1.1 – Потребление энергии в мире

В связи с технологическим прогрессом и наступлении эры компьютерных технологий ежегодно увеличивается мировое потребление энергии (Рисунок 1.1). Таким образом, требуются дополнительные исследования новых технологий получения энергии.

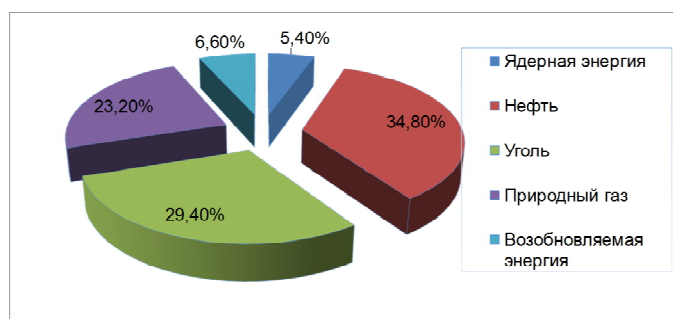


Рисунок 1.2 – Основные источники энергии на сегодняшний день [2]

Солнечной энергетикой называют направление нетрадиционной энергетики, основанное на непосредственном использовании солнечного излучения для получения энергии в каком-либо виде. Солнечная энергетика является неисчерпаемым источником энергии и является экологически чистой, так как не производит вредных отходов. Производство энергии с помощью солнечных электростанций хорошо согласовывается с концепцией распределённого производства энергии.

На рисунке 1.3 представлено распределение солнечной радиации по всему миру в самый неблагоприятный месяц.

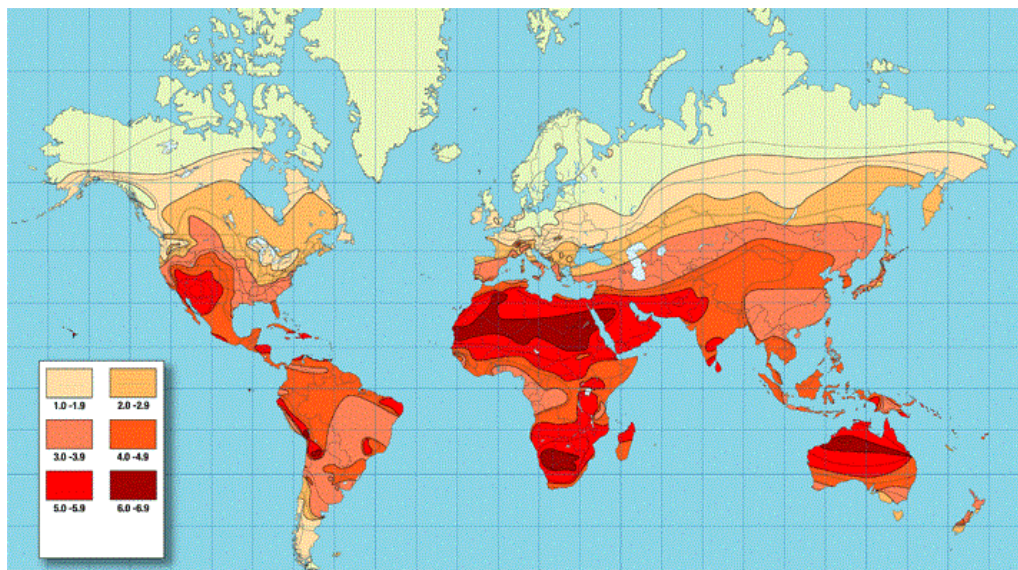


Рисунок 1.3 – Распределение солнечной радиации по всему миру [4]

Солнечная батарея является бытовым термином, используемым в разговорной речи или ненаучной прессе. Под термином «солнечная батарея» подразумевается несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) — полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток.

Производство фотоэлектрических элементов и солнечных коллекторов развивается быстрыми темпами в самых разных направлениях. Солнечные батареи бывают различного размера: от встраиваемых в микрокалькуляторы до занимающих крыши автомобилей и зданий.

Фотоэлектрические преобразователи имеют сравнительно высокую цену. Однако, с современным развитием технологии производства солнечных батарей и оптимизации определенных параметров для получения максимального КПД, а также ростом на ископаемые энергоносители этот недостаток становится не столь выраженным. Начиная с 90-х годов XX века цены на фотоэлементы стремительно снижаются.

В современном мире начинает приобретать большие обороты тонкопленочная технология солнечных батарей. Первые тонкопленочные батареи были созданы на основе кремния. Из-за малого расхода материалов (в данном случае кремния) на поглощающий слой тонкопленочные фотоэлементы дешевле в производстве, но пока имеют меньший КПД и неустраняемую деградацию характеристик во времени. Развитие приобрело не только тонкопленочная технология на основе кремния, но и производство тонкопленочных

фотоэлементов на других полупроводниковых материалах, таких как CIS и CIGS. Данные технологии являются достойными конкурентами кремниевых батарей.

Принцип действия солнечных батарей

Солнечная батарея представляет собой электрическое устройство, преобразующее электромагнитное излучение солнца в постоянный электрический ток. Данное преобразование основано на фотоэлектрическом эффекте [16]. Принцип действия солнечных батарей представлен на рисунке 1.4.

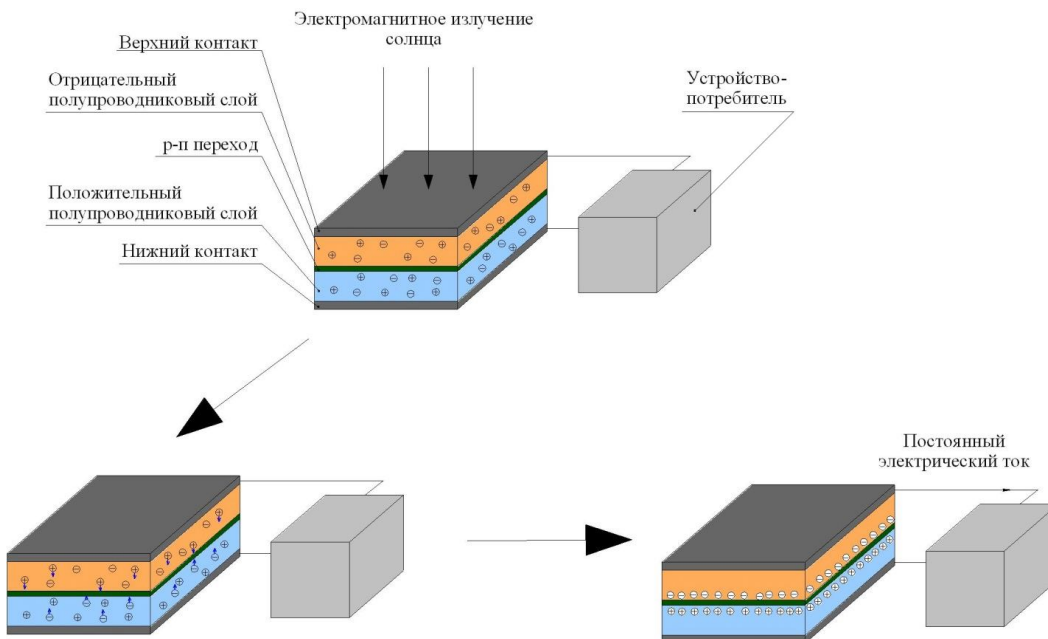


Рисунок 1.4 – Принцип действия солнечной батареи [16]

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 [17]. 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 p – n переход. Возникшая разность потенциалов в p – n переходе вызывает фотоэлектродвижущую силу, вследствие чего на устройство-потребитель, присоединенное к верхнему и нижнему контактам солнечного фотоэлемента, подается постоянный электрический ток [16].

Структура элемента солнечной батареи типа CIGS

Солнечная батарея типа CIGS получила такое название по первым буквам элементов, входящих в состав слоя абсорбера (C - Медь (Cu), I – Индий (In), G – Галлий (Ga), S – Селен

(Se)). Солнечная батарея состоит из нескольких слоев, нанесенных на подложку. Роль подложки играет натриево-кальциево-силикатное стекло или эквивалент (гибкая подложка). Далее на данную подложку наносится тыльный контакт из молибдена (Mo), абсорбер, состоящий из Cu(In, Ga)Se₂, буферный слой сульфида кадмия (CdS) или Zn(O,S), тонкий слой оксида цинка (ZnO) и светопроницаемый фронтальный контакт из оксида цинка, легируемого алюминием (ZnO:Al) (Рисунок 2.1) [1].

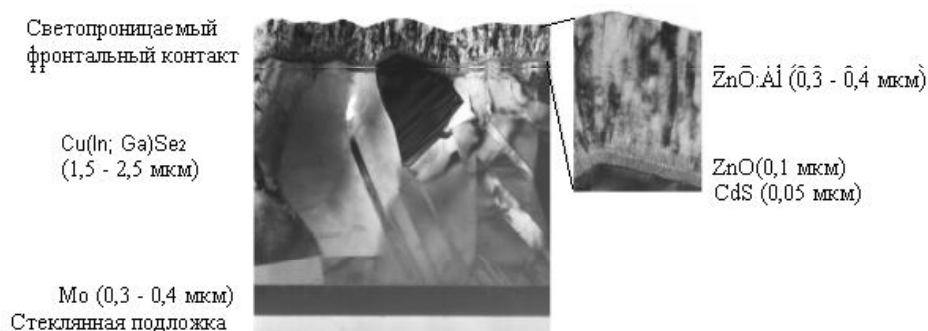


Рисунок 1.5 – Вертикальный профиль структуры:

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

Выходные параметры солнечного элемента

Для описания солнечных элементов используется вольт-амперная характеристика (ВАХ) [13]. На рисунке 2.2 представлена типичная 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:

$$FF = \frac{V_{MAX} I_{MAX}}{V_{кз} I_{кз}} = \frac{P_{MAX}}{V_{кз} I_{кз}} \quad (1.1)$$

- 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:

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{вк}} = \frac{V_{ок} I_{из} FF}{P_{вк}} \quad (1.2)$$

где $P_{вк}$ – мощность светового потока.

- Пиковая мощность ($W_{п}$) – выходная мощность при стандартном режиме тестирования, т.е. $W_{п}=P_{MAX}$ 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.

Элемент солнечной батареи на основе одного диода и последовательного и шунтирующего сопротивления

Данная эквивалентная схема включает в себя генератор тока, диод, последовательное и шунтирующее сопротивление. Генератор тока и диод соединены параллельно, шунтирующее сопротивление также соединено последовательно, при этом последовательное сопротивление соединено последовательно. Эквивалентная схема представлена на рисунке 2.7.

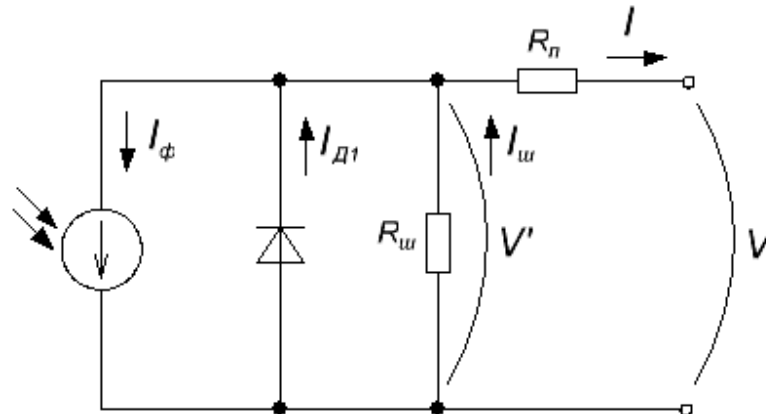


Рисунок 1.6 - Эквивалентная схема «Элемент солнечной батареи на основе одного диода и последовательного и шунтирующего сопротивления»

Для данной модели согласно первому закону Кирхгофа можно записать:

$$I = I_{д} + I_{ш} - I_{\phi} \quad (1.3)$$

А согласно второму закону Кирхгофа:

$$V' = V - IR_n \quad (1.4)$$

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

$$I_d = I_0 (e^{qV'/AkT} - 1) \quad (1.5)$$

Подставляя выражение (1.4) в (1.5), получим:

$$I_d = I_0 (e^{qV'/AkT} - 1) = I_0 (e^{q(V-IR_{ш})/AkT} - 1) \quad (1.6)$$

Величину тока, протекающего через элемент $R_{ш}$, можно получить воспользовавшись законом Ома и выражением (1.4):

$$I_{ш} = \frac{V'}{R_{ш}} = \frac{V-IR_{ш}}{R_{ш}} \quad (1.7)$$

Совместив уравнения (1.7) и (1.6) ток, протекающий через диод, в модели одного диода может быть определен следующим образом:

$$I = I_0 (e^{q(V-IR_{ш})/AkT} - 1) + \frac{V-IR_{ш}}{R_{ш}} - I_{\Phi} \quad (1.8)$$

Стандартная технология производства солнечных батарей типа CIGS

Изначально важно рассмотреть каждый слой элемента солнечной батареи типа CIGS и технологию получения данных слоев на подложке.

Подложка

Самая распространённая подложка – натриево-силикатное стекло толщиной около 3 мм толщиной. Функция подложки не ограничена только механической поддержкой ячейки солнечной батареи, но также присутствие натрия в стеклянной подложке нашло применение в улучшении электрических свойств слоя абсорбера. 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 [2].

Тыльный контакт

Тыльный контакт обычно выполнен из тонкого слоя молибдена (Mo), имеющего низкое контактное удельное сопротивление ($\rho_c \approx 0,08 \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$) поверхности между молибденом (Mo) и абсорбером CIGS. Типичной технологией осаждения для этого слоя является магнетронное распыление при постоянном токе. Это позволяет получить при распылении под высоким давлением аргона слой, обладающей высокой адгезией со стеклом, но при этом имеющий высокое удельное сопротивление. Распыление же при низком давлении аргона, в отличие от предыдущего, имеет низкое удельное сопротивление, но плохо скрепляется со стеклом. Поэтому это является главной причиной осаждения двух слоев молибдена: первый с хорошей адгезией, и второй с низким удельным сопротивлением ($\rho_{cl} \sim 40 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$). Для улучшения термической диффузии натрия из стеклянной подложки в верхний слой абсорбера, в слой молибдена включено около 10% кислорода. В отличие от

магнетронного распыления при использовании высокочастотного диодного распыления данное количество кислорода присутствует по умолчанию. Оптимальное расстояние между антикатодом и подложкой - 5 см для того, чтобы получить зерна размером 40 нм [2].

Слой CIGS

CIGS ($\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$) имеет кристаллическую структуру халькопирита, принадлежащего пространственной группе симметрии $I42d$.

Типичное значение параметра x в стехиометрии $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$, используемого в тонкопленочных солнечных батареях, - около 0,3.

Высокий коэффициент абсорбции $\alpha = 10^4 \text{ см}^{-1}$ для длины волны $\lambda < 1 \text{ мкм}$ позволяет абсорбировать порцию солнечного света с энергией фотона более ширины запрещенной зоны. Данное явление возможно в пределах толщины, известной как длина абсорбции материала, равной $L_\lambda = 1/\alpha = 1 \text{ мкм}$.

Технология осаждения базируется на так называемом трехстадийном процессе, который включает в себя соиспарение в вакууме чистых, беспримесных элементов из различных источников в три шага [3]. Первый шаг – осаждение слоя $(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ в размере 10% от конечного ожидаемого количества на молибден, покрывающий стекло, подогретое до температуры 260°C . Далее подложка нагревается до 565°C . Когда температура стабилизируется, происходит осаждение слоя CuSe_2 и данный слой сразу реагирует с предыдущим слоем, образуется соединение $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$. Данное распыление происходит до того момента, пока не будет достигнуто желаемое количество CuSe_2 . Третий этап обеспечивает более чем 90% от требуемого количества $(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ для достижения общей доли $\text{Cu}/(\text{In}, \text{Ga})$ около 0,9. После охлаждения подложки до 350°C , поток селена останавливают, и процесс заканчивается.

Кроме существующего трехстадийного процесса разрабатываются другие методы, содержащие стадийные цепочки или различные виды осаждения, такие как электроннолучевое испарение металла, следующее за селенизацией при давлении, близкому к атмосферному, или электрохимическим осаждением.

Буферный слой

Одним из более спорных пунктов изучения солнечной батареи CIGS является роли и химия так называемого буферного слоя, который обычно формируется с помощью химического осаждения (Chemical Bath Deposition - CBD), - тонкий слой сульфида кадмия (CdS , 50 нм). По исследованиям Олсена [10] 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.

Верхний слой

Данный слой имеет три основных функции:

- Поперечный перенос фототока с минимально возможными омическими потерями
- Передача света в абсорбер
- Участие в образовании гетероперехода

Прозрачный передний слой обычно состоит из двух слоев: тонкого (35 - 100 нм) слоя чистого оксида цинка ($i\text{-ZnO}$) и толстого (300 - 1000 нм) слоя оксида цинка, легированного алюминием ($\text{ZnO}:\text{Al}$ или ZAO) с 2%-ным содержанием Al. Оба слоя обычно осаждаются с помощью магнетронного распыления.

Выше было рассмотрено, какими методами получены слои элемента солнечной батареи типа CIGS. Но для полного описания технологического процесса производства элементов солнечных батарей типа CIGS необходимо так же получить межкомпонентную структуру.

На рисунке 1.7 представлена стандартная технология производства солнечных батарей типа CIGS.

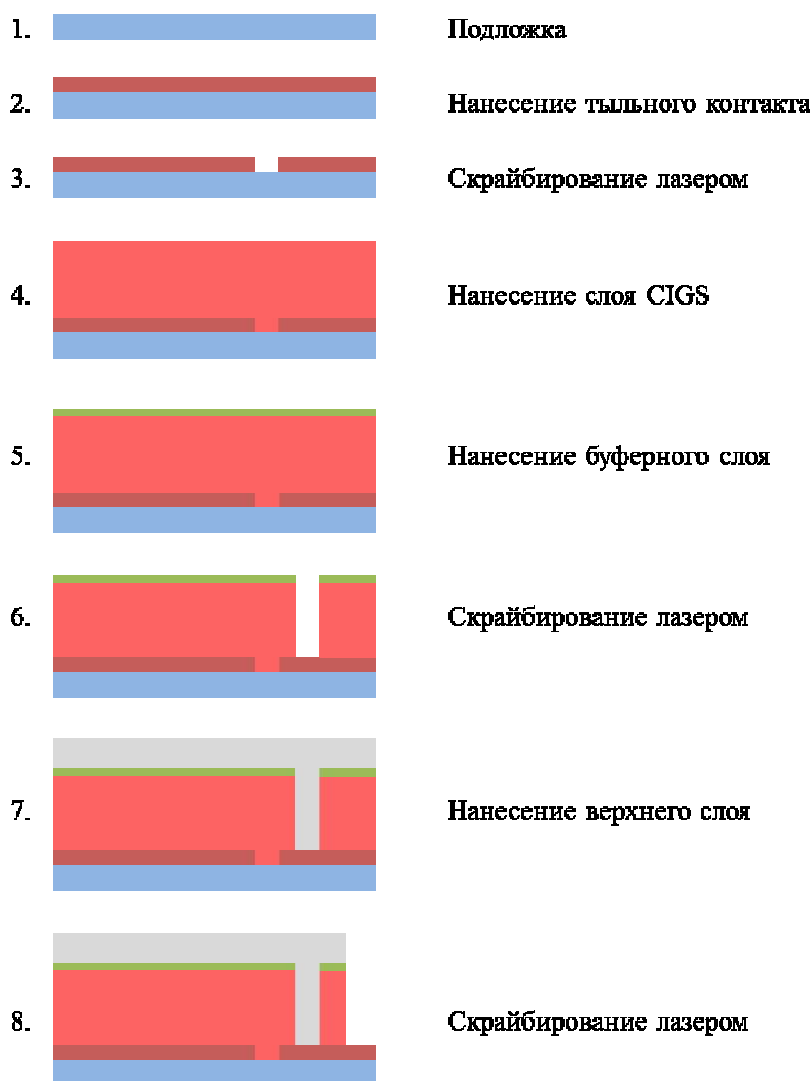


Рисунок 1.7 – Стандартная технология производства солнечных батарей типа CIGS

На рисунке 1.8 представлена структура солнечной батареи типа CIGS при технологии производства компании Sunplugged.

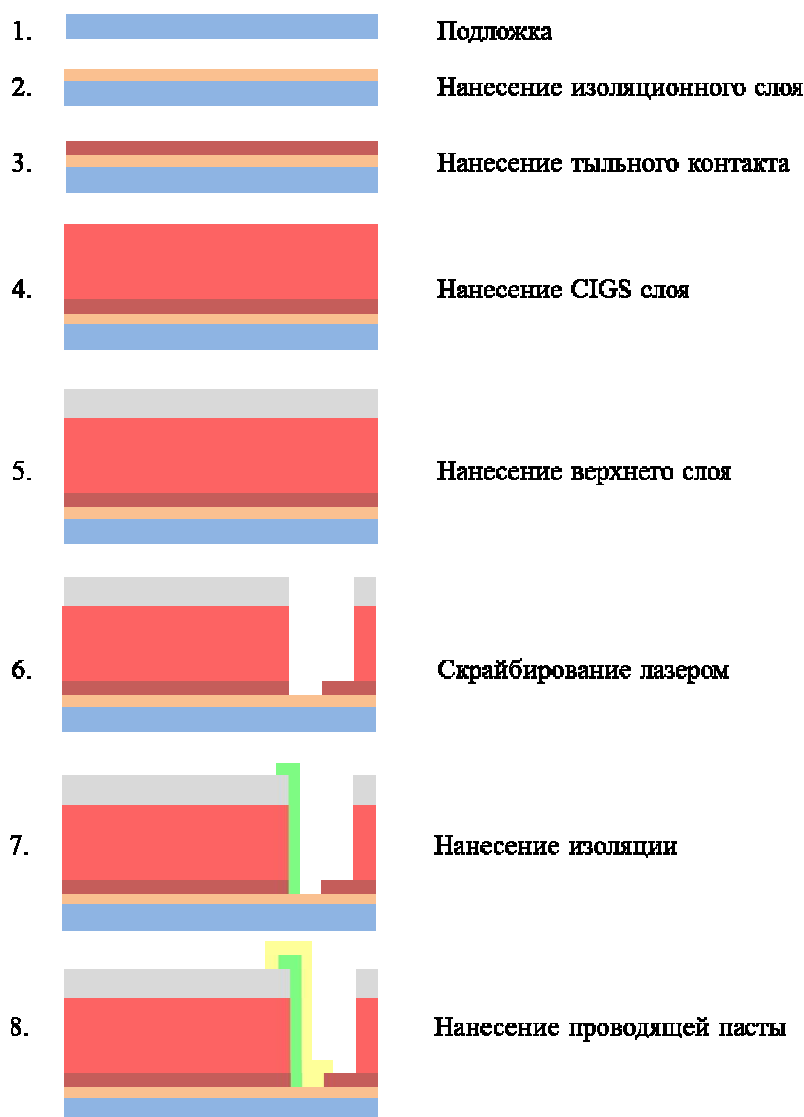


Рисунок 1.8 – Усовершенствованный технологический процесс производства солнечной батареи типа CIGS (компания SunPlugged)

Согласно рисунку 1.8 изначально выбирается подложка. В отличие от стандартного метода, данный технологический процесс рассчитан на гибкую подложку.

Метод нанесения слоев на подложку заключается в том, что используется два валика для передвижения гибкой подложки по камере, в которой последовательно наносятся все слои солнечной батареи типа CIGS: изоляционный слой, тыльный контакт, слой абсорбера CIGS, верхний слой.

После нанесения всех слоев производится скрайбирование с помощью лазера. Далее выполняется нанесение изоляции и нанесение проводящей пасты.

В данном технологическом процессе отсутствует второе и третье скрайбирование, что заметно сокращает время, трудоемкость процесса, затраты материала, а, соответственно, стоимость. КПД солнечной батареи повышается в следствии того, что межкомпонентная

структура имеет меньшую ширину, а соответственно, относительная доля неактивной области снижается.

Моделирование солнечных батарей типа CIGS

Модель элемента солнечного элемента CIGS должна быть получена при использовании электрических, оптических и геометрических параметров [2]. 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 1.9. Поперечный ток в верхнем слое (ZnO:Al) и тыльном контакте (Mo) не одинаков, и поэтому эти слои создают распределенные последовательные сопротивления. Распределенные последовательные сопротивления $R_{ZnO:Al,1}$, $R_{ZnO:Al,2}$, ..., $R_{ZnO:Al,n}$ для ZnO:Al и $R_{Mo,1}$, $R_{Mo,2}$, ..., $R_{Mo,n}$ для Mo как представлено на рисунке 1.9. 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 1.9 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.

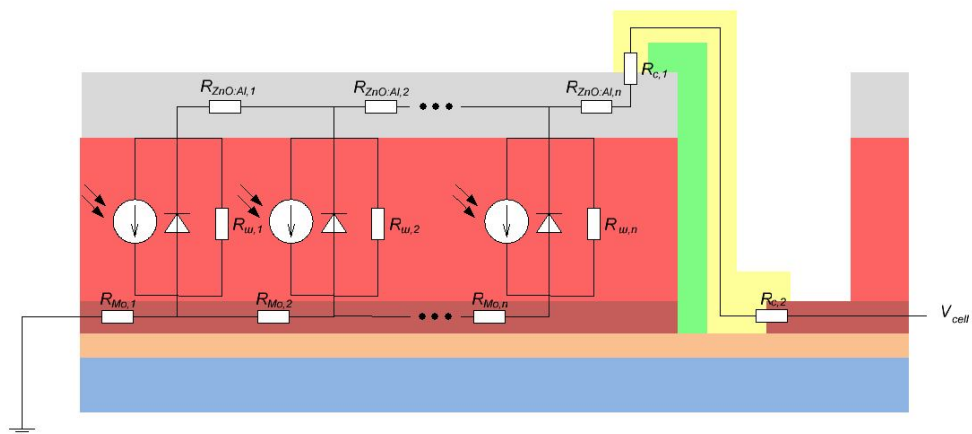


Рисунок 1.9 – Эквивалентная электрическая схема солнечного элемента CIGS

На рисунке 1.9 представлена эквивалентная электрическая схема солнечного элемента CIGS, построенная на модели одного диода, шунтирующих сопротивлениях и сопротивлениях потерь.

Для моделирования элемента солнечной батареи типа CIGS используется программный пакет COMSOL Multiphysics, для обработки результатов используется MATLAB.

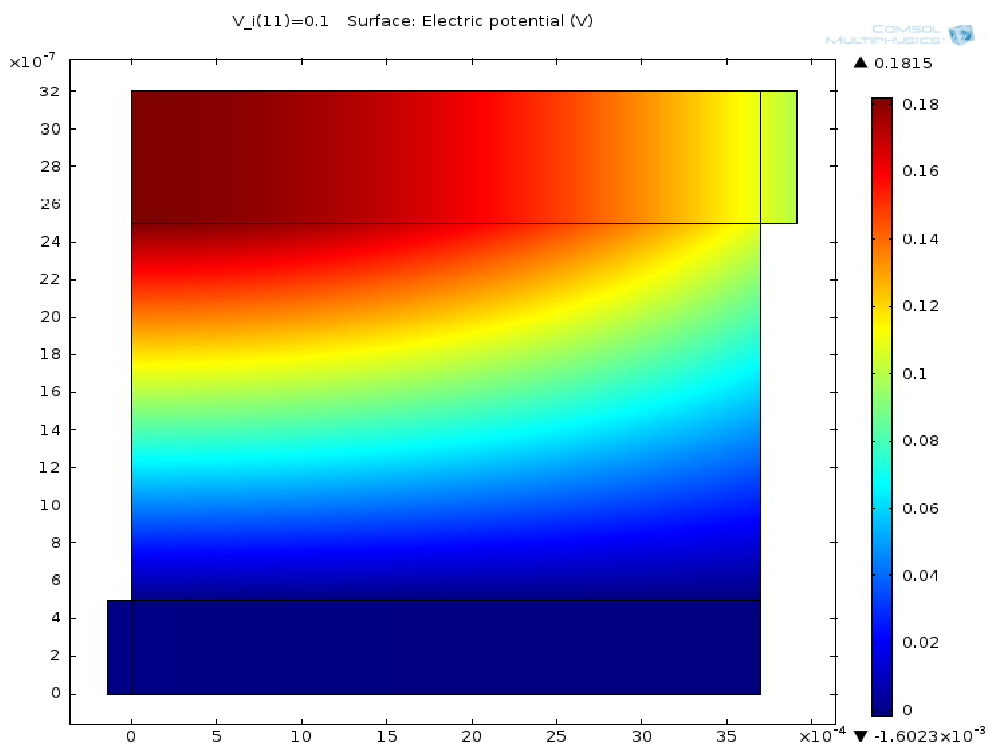


Рисунок 1.10 – Потенциально распределение солнечного элемента при $V=0,1 \text{ В}$

Рисунок 1.10 показывает потенциальное распределение слоев для $V=0,1 \text{ В}$.

Обработка результатов с помощью программного пакета MATLAB

Результаты, полученные в COMSOL Multiphysics, экспортируются в MATLAB и обрабатываются там.

На рисунке 1.11 изображена зависимость нормированной плотности тока от напряжения (для одного элемента).

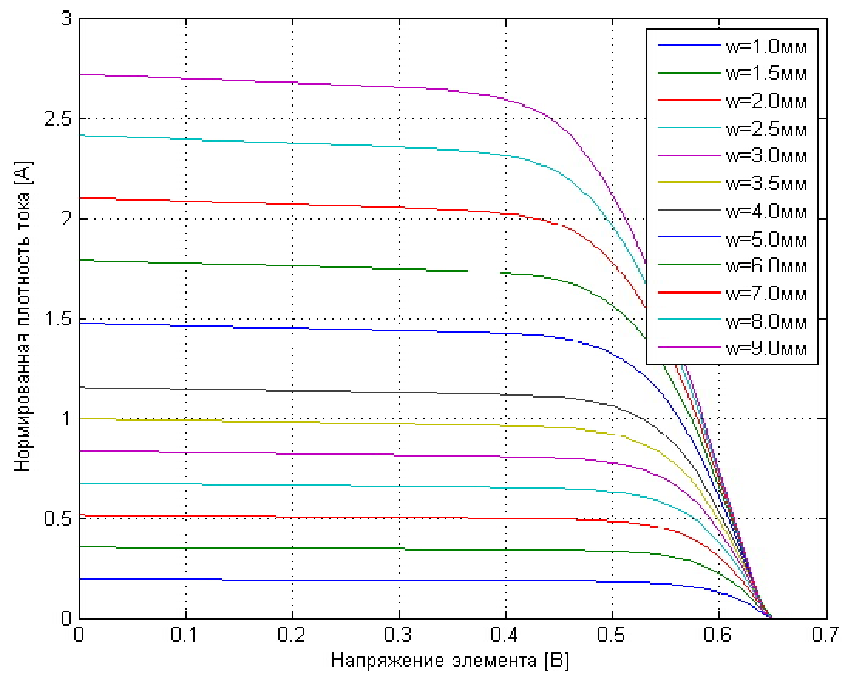


Рисунок 1.11 – Зависимость нормированной плотности тока от напряжения

Далее производится расчет тока и напряжения для всей солнечной батареи. Рисунок 1.12 демонстрирует вольт-амперные характеристики при различных значениях ширины элемента солнечной батареи.

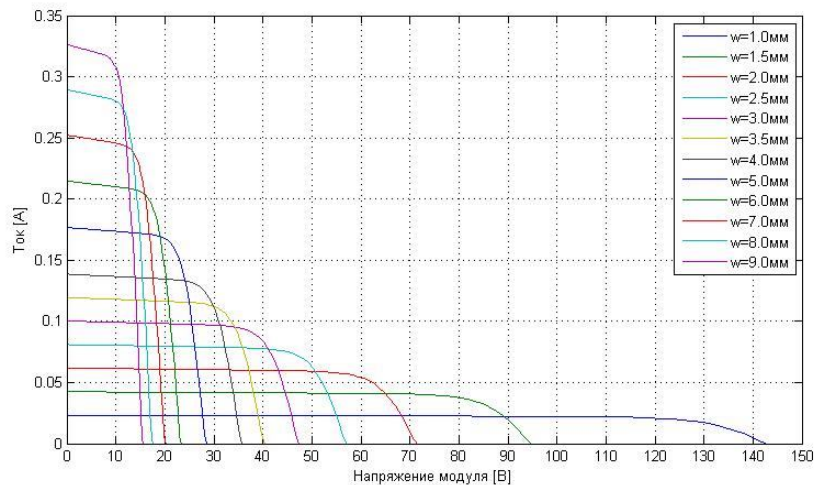


Рисунок 1.12 – Вольт-амперная характеристика при различных значениях ширины элемента солнечной батареи

Далее производится расчет производительности модуля солнечной батареи типа CIGS.

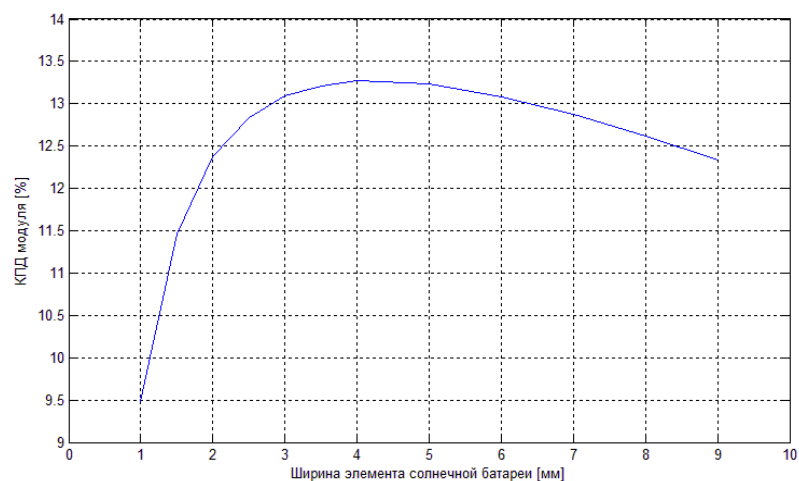


Рисунок 1.13 – Зависимость КПД модуля солнечной батареи от ширины элемента солнечной батареи типа CIGS

На рисунке 1.13 изображена зависимость КПД солнечного модуля от ширины элемента солнечной батареи. Кривая, представленная на рисунке 1.13, имеет экстремум в точке [4; 13,27]. Согласно данным графика максимальная производительность достигается при ширине элемента солнечной батареи $w = 4 \text{ мм}$, при этом $KПД = 13,27\%$.

На рисунке 1.14 представлен пример 3D моделирования.

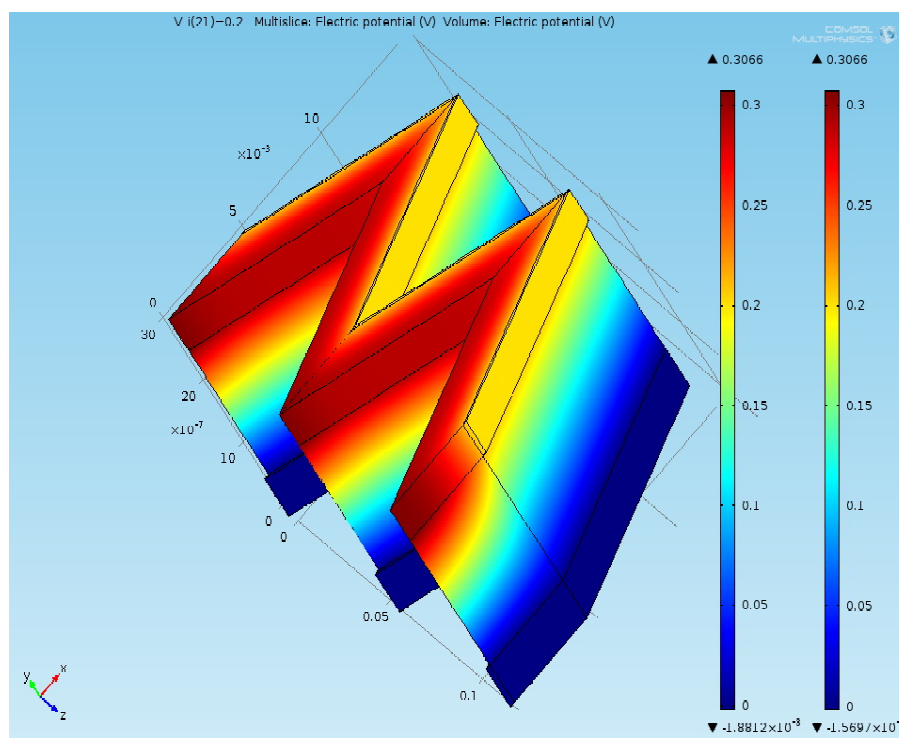


Рисунок 1.14 – 3D моделирование солнечной батареи типа CIGS формы «Зигзаг»

Рисунок 1.14 демонстрирует 3D модель солнечной батареи типа CIGS формы «Зигзаг». КПД данной солнечной батареи достигает 13,30%.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен сравнительный анализ типового и усовершенствованного технологического процесса изготовления тонкопленочных солнечных батарей на новом тройном полупроводниковом материале Cu(In,Ga)Se
2. Рассмотрена электрическая модель батареи типа CIGS на основе «модели одного диода»
3. Проведено в программном пакете COMSOL Multiphysics моделирование распределения потенциала в элементе солнечной батареи типа CIGS (Для формы «Прямоугольник», «Параллелепипед», «Зигзаг», «Круг»)
4. На основе данных распределения получены вольт-амперные характеристики для дальнейшего расчета КПД солнечной батареи
5. Определены параметры солнечной батареи, при которых достигнута максимальный КПД.