

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.383.51

Кунцевич
Анастасия Владиславовна

Тонкопленочные фотоэлектрические преобразователи на гибкой подложке

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание академической степени магистра технических наук
по специальности 1-41-80 02 «Технология и оборудование для производства
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Научный руководитель
Василевич Владимир Павлович
КТН, профессор

Минск, 2015

ВВЕДЕНИЕ

Конкурентоспособность ФЭП в солнечной энергетике определяется, главным образом, двумя наиболее значимыми факторами: во-первых – это эффективность (КПД) преобразования солнечной энергии в электричество, а во-вторых – это цена 1 Вт их мощности. Тонкопленочные технологии, являющиеся на сегодняшний день наиболее перспективными в солнечной энергетике, позволили существенно снизить затраты на производство. Разработано несколько типов тонкопленочных фотоэлементов, как находящихся на стадии исследований и экспериментов, так и успешно применяемых в солнечной энергетике.

Наиболее известные из них – это: ФЭП на гидрогенизированном аморфном и микрокристаллическом кремнии (a/mc-Si: H₂); ФЭП на теллуриде/сульфиде кадмия (CTS); ФЭП на основе медно-индиевого или медно-галлиевого диселенида (CIS или CIGS); ФЭП на основе органических полупроводников.

Прогрессивным методом формирования структуры тонкопленочных ФЭП является наиболее дешевый принтерный (струйный) метод печати и использование при этом подложек из самых разнообразных материалов: металлической фольги и пластика. Коэффициент использования материалов в этих методах достигает 90 % и выше, причем используемое оборудование является более дешевым, чем при вакуумных процессах на стеклянной подложке, что позволяет ожидать предельно низких показателей себестоимости их производства.

Моделирование структуры и технологии формирования тонкопленочных ФЭП на гибкой подложке позволяет сравнить их характеристики, оценить конкурентные преимущества по сравнению с базовыми коммерческими технологиями и прогнозировать наиболее вероятные пути их развития.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является моделирование конкурентоспособной структуры и технологии тонкопленочного фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) на гибкой подложке.

Положения, выносимые на защиту:

Сравнительный анализ КПД и себестоимости тонкопленочных ФЭП, формируемых на различных подложках, и прогноз их развития;

Математическая модель топологии и электрических параметров тонкопленочного ФЭП типа CIGS на гибкой полиимидной основе;

Результаты исследования основных конкурентных преимуществ технологии roll-to-roll для производства тонкопленочных ФЭП.

Апробация результатов диссертации

Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы были представлены в следующих научных конференциях: Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и производства», Кемерово, «ЗапСибНЦ», 23–24 октября 2014; VIII Международная научно-техническая конференция «Медэлектроника–2014», Минск, БГУИР, 2014; 51 научно-техническая конференция студентов и магистрантов, БГУИР, 2015 и статье в научном журнале «Доклады БГУИР», 2015.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и двух приложений. Общий объем магистерской диссертации составляет 66 страниц, включая 41 иллюстрацию, 1 таблицу, библиографический список из 38 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью магистерской работы является моделирование конкурентоспособной структуры и технологии тонкопленочного фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) на гибкой подложке.

Тонкопленочные технологии ФЭП позволили существенно снизить затраты на производство 1 Вт их мощности. Разработано несколько типов тонкопленочных фотоэлементов:

- 1) ФЭП на основе аморфного гидрогенизированного и/или микрокристаллического кремния (α -Si: H, μ c-Si film);
- 2) ФЭП на основе теллурида/сульфида кадмия (CTS);
- 3) ФЭП на основе медно-индиевого или медно-галлиевого диселенида (CIS or CIGS);
- 4) ФЭП на основе органических полупроводников и нанокристаллических эмиттеров электронов (nc-dye).

Общеизвестны конкурентные преимущества тонкопленочных ФЭП по сравнению с ФЭП на кристаллическом кремнии: за счет низкой себестоимости производства и высоких характеристик фотоэлектрического преобразования в условиях низкой освещенности (рисунок 1.1). В пасмурную и дождливую погоду тонкопленочные солнечные батареи генерируют на 10-20% больше энергии, чем кристаллические. Кроме того, тонкопленочные солнечные модули меньше подвержены перегреву, при котором модули на кристаллическом кремнии теряют до 20% своей мощности.

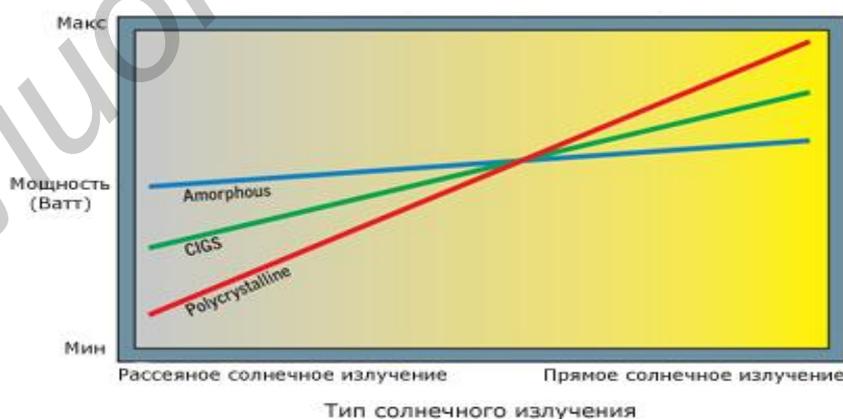


Рисунок 1.1 – Условная зависимость мощности различных ФЭП от интенсивности солнечного излучения

Хорошо освоенным и практичным способом производства тонкопленочных солнечных батарей является способ, связанный с применением в качестве конструктивного носителя закаленного стекла, что

обусловлено его прозрачностью для солнечного излучения и прочностью. Тонкопленочные стеклянные солнечные батареи особенно популярны в архитектуре зданий, автомобилестроении и индивидуальном домостроении. Светодиодные триплексы, камеры слежения, уличные осветительные приборы, фонари и пр. – идеальные сферы применения тонкопленочных элементов.

Несмотря на низкую себестоимость, водонепроницаемость и долговечность, стекло – это тяжелый, твердый и хрупкий материал. Поэтому транспортировка и установка солнечных модулей с защитным стеклянным покрытием сопряжена с определенными проблемами и требует соответствующих затрат.

Несмотря на преимущество тонкопленочных модулей на стеклянном носителе генерировать на 10% больше энергии в год, чем кристаллические модули, из-за меньшей эффективности фотоэлектрического преобразования они занимают на 30-40% больше места, обладают большим весом и неохотно покупаются потребителями ФЭП.

Швейцарская компания Flisom сообщила, что в 2014 году начинает массовое производство нового типа солнечных батарей – тонкопленочных гибких ФЭП, позволяющих, предположительно, снизить себестоимость установленной мощности до 0,5 долларов за ватт, что почти в два раза ниже себестоимости мощности, производимой при сжигании углеводородного топлива. Данная разработка основана на применении в качестве полупроводника диселенида меди-индия-галлия (copper indium gallium selenide, CIGS), нанесенного на гибкий полиимидный носитель (рисунок 1.2). Тонкопленочный элемент такого состава получается при распылении меди, индия и галлия с последующей обработкой парами селена.



Рисунок 1.2 – CIGS-фотоэлектрический преобразователь, сформированный на фторполимерной плёнке

Гибкость и тонкослойность открыли для солнечных батарей новые сферы применения. Тонкопленочные элементы могут быть встроены в различные электронные приборы, строительные конструкции и даже ткани. По прогнозам специалистов, развитие тонкопленочных технологий в солнечной индустрии приведет всего через 10 лет к завоеванию почти 50% всего рынка ФЭП.

В сравнении с применяемыми видами ФЭП на стеклянных носителях тонкопленочные ФЭП на гибком носителе приобретают ряд дополнительных преимуществ:

1) нанесение таких ФЭП возможно на поверхность любой конфигурации: стеклянные фасады зданий, оконные стекла зданий, поверхность автомобилей, судов, что делает их более привлекательными интегрированными источниками электроэнергии;

2) меньшая материалоемкость приводит к сокращению финансовых затрат;

3) способность воспринимать рассеянное солнечное излучение с большей эффективностью, чем объемные кремниевые батареи позволяет применять их в местах с низкой инсоляцией;

4) затемнение и нагрев тонкопленочных батарей оказывают на них меньшее негативное влияние, чем на кристаллические объемные батареи.

Этапом, открывающим совершенно новые сферы применения, стала разработка технологического концерна 3М (США), создавшего надежное, не пропускающее воду полимерное покрытие для ультратонких гибких солнечных элементов и обладающее значительным ресурсом (более 20 лет). Фторполимерная пленка толщиной всего в 23 микрометра, что составляет одну сотую часть толщины стеклянного покрытия, в перспективе заменит стеклянные покрытия, применяемые в традиционных солнечных элементах. При использовании новой фторполимерной пленки эти проблемы отпадают сами собой. Каркас, в который вставляются солнечные элементы, становится не нужным, что облегчает общий вес солнечных модулей. Солнечные элементы с ультратонким покрытием можно монтировать в крышу здания, не боясь перегрузок.

Новое фторполимерное покрытие практически не пропускает влаги, устойчиво к высоким температурам и разрушающему действию ультрафиолета, что и является причиной столь долгого срока службы ФЭП.

Уникальные свойства фторсодержащих полимеров выдвинули их в ряд ведущих инновационных полимерных материалов XXI века. Фторполимеры – это уникальные продукты, полученные химическим путём, высокая

прочность связи атомов фтора и углерода в которых и обуславливает уникальное сочетание ценных свойств, отличающих их от всех других материалов. Фторполимеры имеют химическую инертность к любым кислотам, щелочам и растворителям; широкий предел рабочих температур от -260°C до $+300^{\circ}\text{C}$; высокую электрическую прочность; выдерживают длительное радиационное облучение. По всей видимости, эти материалы не являются дефицитными и коммерчески доступны, только в России насчитывается около 40 компаний, перерабатывающих фторполимеры.

Тонкопленочная технология фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) по сравнению с доминирующей сейчас технологией на кристаллическом кремнии (рисунок 1.3), выглядит более консолидированной и перспективной как в экономическом, так и в производственном плане.

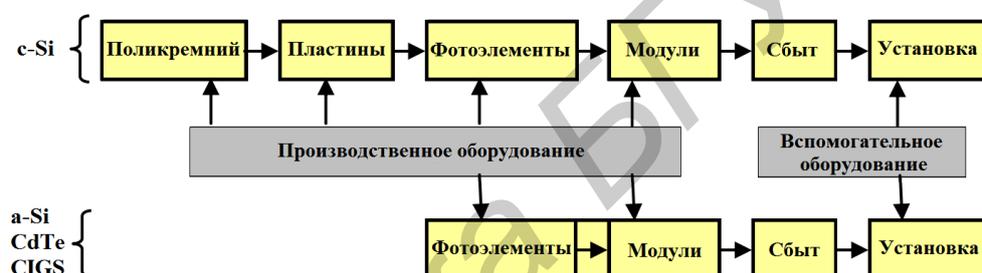


Рисунок 1.3 – Производственные цепочки тонкопленочных технологий ФЭП (a-Si, CdTe, CIGS) и ФЭП на кристаллическом кремнии (c-Si)

Лидером по эффективности среди тонкопленочных ФЭП является технология CIGS (на основе соединения диселенида меди-индия-галлия $\text{Cu}(\text{In},\text{Ga})\text{Se}_2$), которая реализуется как на стеклянной, так и на более перспективной гибкой полиимидной подложке.

Ученые EMPA - швейцарской федеральной лаборатории материаловедения и технологий презентуют разработку ФЭП из полупроводникового материала CIGS, (селенида меди-индия-галлия) на гибкой полиимидной основе, обладающих рекордным для тонкопленочных технологий КПД фотоэлектрического преобразования 18,7% при площади ячейки $0,5 \text{ см}^2$, в то время как при большой площади ячейки средний КПД составляет 8 – 14,8%.

На рисунке 1.4 приведены вольтамперная и мощностная характеристики реального CIGS-солнечного модуля EMPA, имеющего КПД 14,8%, топология которого сформированна с применением трехкратного лазерного скрайбирования и состоящего из 8 последовательно соединенных ячеек, каждая площадью $1,625 \text{ см}^2$. Напряжение холостого хода ячейки

составляет $V_{OC} = 689$ мВ, плотность тока короткого замыкания – $32,9$ мА/см², фидл-фактор при данной площади ячейки – $65,3\%$.

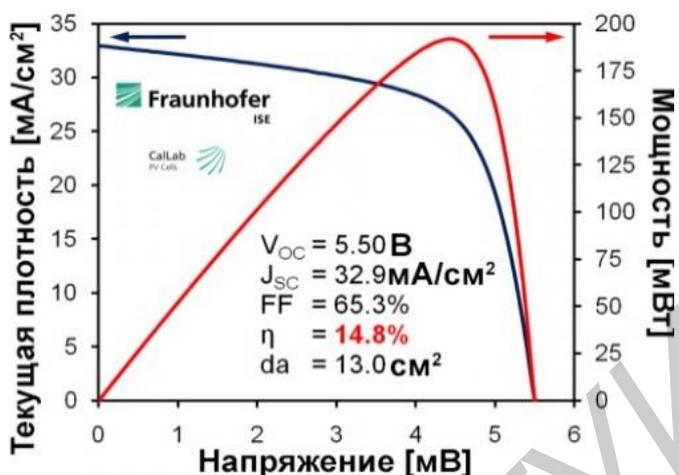


Рисунок 1.4 – Вольт-амперная и мощностная характеристики CIGS-солнечного модуля EMPA

Целью работы является проектирование электрических параметров солнечного модуля EMPA типа CIGS методом математического моделирования топологии (геометрических размеров и электрической коммутации ячеек в модуле) без изменения её структуры и базовой технологии.

Как видно из рисунка 1.5, топология ячейки солнечного модуля EMPA, определяющая её фотоактивную площадь, формируется методом поперечного лазерного скрайбирования модуля, причем её длина задается шириной напыляемой полупроводниковой структуры, а ширина ячейки – шагом скрайбирования (несколько мм) при неизменной площади модуля.



Рисунок 1.5 – Формирование топологии ячейки солнечного модуля методом лазерного скрайбирования

Из рисунка 1.5 видно, что фотоактивная площадь ячейки определяет рабочий ток ячейки и равный ему ток модуля, а количество последовательно соединенных ячеек определяет напряжение, вырабатываемое модулем при его освещении.

Объектом моделирования является CIGS-модуль EMPA на полиимидной основе, имеющий следующие исходные характеристики: напряжение холостого хода ячейки $U_{oc} = 689$ мВ; плотность тока короткого замыкания ячейки $J_{sc} = 32,9$ мА/см²; филл-фактор при любой площади ячейки $FF = 65,3\%$; типовая ширина лазерного реза при скрайбировании $h = 0,033$ см.

Были введены следующие обозначения: n – количество ячеек в модуле, шт; $S_{a.m}$ – активная площадь модуля, см²; $S_{a.яч}$ – активная площадь ячейки, см²; L – длина стороны квадратного модуля, см; P_m – пиковая мощность модуля, мВт.

По имеющимся исходным данным с использованием *COMSOL Multiphysics* рассчитывались электрические параметры модуля: напряжение холостого хода модуля $U_{oc м}$, ток короткого замыкания модуля $I_{sc м}$, активная площадь ячейки $S_{a.яч}$ активная площадь модуля $S_{a.m}$ и, с изменением количества ячеек в модуле n от 5 до 11, полученные параметры обрабатывались с помощью программной среды *MATLAB*.

Математическая зависимость мощности модуля от числа ячеек в модуле, обусловленного топологией ячейки имеет следующее выражение

$$P_m = J_{кз} \cdot U_{хх\ яч} \cdot FF \cdot L \cdot L - nh .$$

График зависимости мощности P_m от количества ячеек приведен на рисунке 1.6.

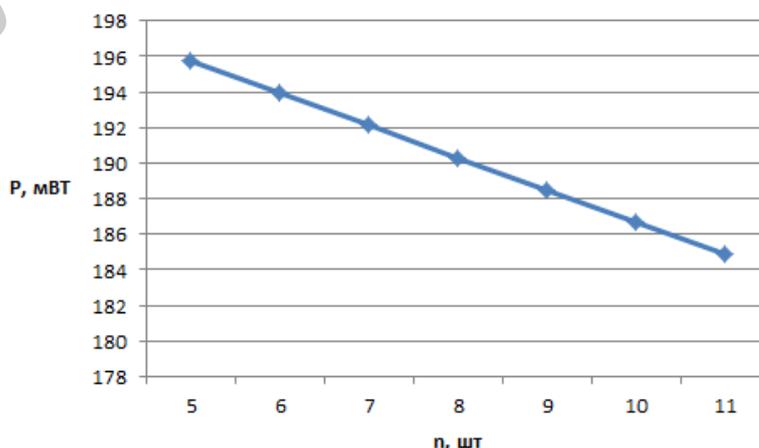


Рисунок 1.6 – График зависимости мощности солнечного модуля от количества ячеек

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обладая рядом конкурентных преимуществ по цене 1 Вт установленной мощности и высокими показателями эффективности фотоэлектрического преобразования при пониженной солнечной радиации, тонкопленочные ФЭП на стеклянном носителе не являются достаточно привлекательными для инвесторов ввиду значительного веса и связанных с этим высоких затрат на их транспортировку и установку.

Существенного прорыва в развитии рынка тонкопленочных ФЭП можно ожидать с появлением их массового промышленного производства на гибком носителе – металлической фольге или полиимидной пленке с последующей защитой структуры влагонепроницаемым прозрачным фторполимером, гарантирующим не менее чем 20-ти летний срок их эксплуатации.

В результате моделирования топологии ячейки CIGS ФЭП на гибкой подложке получена линейная зависимость мощности солнечного модуля от количества ячеек, определено, что при увеличении числа ячеек модуля снижается его мощность за счет уменьшения активной площади.

Полученные результаты могут быть применены на практике для проектирования топологии солнечного модуля по заданным электрическим параметрам.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

[1] Кунцевич, А.В. Новые конкурентные преимущества тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей на гибких носителях / В.П. Василевич, А.В. Кунцевич // Современные тенденции развития науки и производства: сборник материалов Международной научно-практической конференции, 2014 - в 4-х томах, Том 3, - Кемерово: ООО «ЗапСибНЦ», 2014 - 164 с.

[2] Кунцевич, А.В. Модель электрических параметров и топологии тонкопленочного фотоэлектрического преобразователя типа CIGS на гибкой полиимидной подложке / В.П. Василевич, А.В. Кунцевич, Е.Д. Воротницкий // 51 научно-техническая конференция студентов и магистрантов БГУИР: Тезисы докладов – Минск, 2015.

[3] Кунцевич, А.В. Физиологические и психологические аспекты в проектировании систем комфортного освещения на основе светодиодов / В.П. Василевич, А.В. Кунцевич, Е.Д. Воротницкий, А.И. Емельянов // Сборник научных статей VIII международной научно-технической конференции «Медэлектроника -2014». – Минск, БГУИР, 2014 – С.364.

[4] Кунцевич, А.В. Проблемы, компромиссы и тенденции в проектировании систем светодиодного освещения / В.П. Василевич, А.В. Кунцевич, Е.Д. Воротницкий, А.И. Емельянов // Научный журнал «Доклады БГУИР». – Минск, БГУИР, 2015.