

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

УДК 621.383.4

Гриб
Янина Владимировна

Фотоэлектрические тандемные преобразователи для ультрафиолетового и
видимого диапазонов излучения

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 1-41 80 01 "Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах"

Научный руководитель
Степанов Андрей Анатольевич
кандидат технических наук

Минск 2015

ВВЕДЕНИЕ

Значительный рост энергопотребления и сокращение традиционной сырьевой базы ископаемых энергоресурсов обуславливают возрастающий в мире интерес к возобновляемым источникам энергии. Так в 2007 г. Совет Европы поставил цель довести к 2020 г. использование возобновляемых источников до 20% от общего энергопотребления Европейского Союза. Немаловажным фактором в этом процессе являются и социально-экономические последствия техногенных катастроф, связанных с энергетической отраслью, о чем свидетельствует тот факт, что правительство Германии приняло решение о постепенном отказе от атомной энергетики за счет развития энергетики возобновляемой.

Среди возобновляемых источников энергии фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии в настоящее время признано самым перспективным. Что не удивительно, ведь солнечная энергия является самым большим источником энергии на Земле. Следует отметить, что с 2000 г. мировой рынок наземных солнечных фотоэлектрических систем растет в среднем на 30% в год. Ожидается, что в течение ближайших 20 лет солнечная фотоэнергетика создаст более 2 млн. рабочих мест, сократит выбросы парниковых газов в атмосферу на 350 млн. тонн CO_2 , и к 2030 г. общая мощность солнечной фотоэнергетики превысит 650 ГВт [1, 2].

Однако дальнейшее развитие солнечной энергетики требует постоянного совершенствования характеристик устройств фотопреобразования (солнечных элементов), важнейшим параметром которых является эффективность преобразования солнечной энергии – КПД (коэффициент полезного действия) фотоэлектрореобразователей (ФЭП) (η).

Существуют различные пути повышения КПД солнечных элементов, и к наиболее успешным направлениям их развития относится использование многопереходных структур. Здесь были достигнуты значительные успехи, которые позволили повысить значение КПД до очень высоких значений – порядка 24 % при неконцентрированном солнечном излучении для фотоэлектрореобразователей на основе кремния и порядка 43 % при концентрированном солнечном излучении для трех-переходных фотоэлектрореобразователей на основе соединений АПВВ.

Эффективность солнечного элемента улучшились с течением времени за счет увеличения количества переходов в устройстве. Каждый переход способен извлекать энергию из определенной части солнечного спектра. Новый путь к

повышению эффективности состоит в использовании новых фотоэлектрических материалов, таких как нитрид индия-галлия (*InGaN*). Данный материал обладает такой шириной запрещенной зоны, благодаря которой может извлекать энергию из большей части видимого солнечного спектра [3].

Актуальность исследовательской работы обусловлена высокой практической значимостью решаемых задач по поиску путей повышения эффективности и стабильности работы фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии.

Цель этой работы состоит в проведении комплексных исследований свойств и характеристик многопереходных (тандемных) структур солнечных элементов на основе нитрида индия-галлия путем моделирования с помощью программного обеспечения Silvaco Atlas TCAD.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

- обзор современных методик моделирования полупроводниковых структур, наработка навыков по выявлению и обработке полезной информации в программном комплексе Silvaco Atlas;

- разработка технологического маршрута изготовления солнечных элементов, определение и задание вводных параметров структуры;

- моделирование разработанного технологического процесса для одно-, двух-, трех-, четырех-переходных *InGaN* солнечных элементов, расчет эффективности работы элементов с помощью электрических параметров, экстрагированных из вольт-амперных характеристик, оценка и сравнение полученных данных;

- подведение итогов работы, оценка уровня достижения поставленной цели, выявление перспектив и направлений для будущих исследований.

Для решения поставленных задач проводился широкий диапазон экспериментальных работ по моделированию технологического процесса формирования многопереходных (тандемных) структур фотоэлектрических преобразователей в программном комплексе Silvaco Atlas. Анализ и сравнение данных об эффективности работы устройств проводился в результате обработки вольт-амперных характеристик с помощью программного обеспечения Matlab.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы состоит в проведении комплексных исследований свойств и характеристик многопереходных (тандемных) структур солнечных элементов на основе нитрида индия-галлия путем моделирования с помощью программного комплекса Silvaco Atlas TCAD (*Technology Computer Aided Design* – компьютерные технологии автоматизированного проектирования).

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Обзор современных методик моделирования полупроводниковых структур в программном комплексе Silvaco Atlas;
2. Разработка технологического маршрута изготовления солнечных элементов, определение и задание вводных параметров структуры;
3. Моделирование структур одно-, двух-, трех-, четырех-переходных InGaN солнечных элементов, расчет эффективности работы элементов с помощью электрических параметров, экстрагированных из вольт-амперных характеристик, оценка и сравнение полученных данных;

Тема диссертационной работы соответствует подразделу 1.5 «Использование возобновляемых источников энергии, вторичных энергоресурсов и местных видов топлива» приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011 – 2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19 апреля 2010г., № 585. Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», в НИЛ 4.7 "Устройства обработки и отображения информации".

Соискателем самостоятельно проведен обзор и анализ научной и патентной литературы, выявлены и оценены современные методы моделирования и изготовления многопереходных (тандемных) структур солнечных элементов. Все основные результаты, выводы получены соискателем самостоятельно.

Основные положения и результаты диссертации обсуждались на следующих научных конференциях и форумах и опубликованы в соответствующих сборниках: VI Международная научная конференция "Материалы и структуры современной электроники", Минск, 19-ый Молодежный форум "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке", Харьков, Украина, 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures: "Saint-Petersburg OPEN 2015", St. Petersburg, Russia.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы из 42 наименований. Общий объем диссертации 67 страницы, в том числе 36 рисунков и 4 таблицы.

Во введении проведено краткое знакомство с областью, в рамках которой проводилась научно-исследовательская работа. Раскрыта актуальность выбранной темы магистерской диссертации, сформулирована цель и поставлены конкретные задачи.

Первая глава диссертационной работы содержит основные выводы обзора и анализа научной литературы в области зарождения и развития совершенно нового и, как оказалось, подающего большие надежды вида энергетики – гелиоэнергетика. Был проделан большой путь от первого использования солнечных лучей для разжигания огня и подогрева пищи во времена Древней Греции и до сегодняшнего применения в качестве энергоснабжения на космических станциях, в городах и в индивидуальных целях. По мере роста угрозы экологическому, экономическому и биологическому состоянию планеты все больше сил, финансирования и кадров задействуются для решения этих проблем с помощью развития альтернативной энергетики, которая использует энергию возобновляемых и экологически чистых источников энергии: ветра, воды, солнца, биомассы и других. В главе рассмотрены предпосылки и перспективы использования и развития гелиоэнергетики. Также представлена временная лента самых значительных достижений, рассмотрен современный уровень развития в области солнечной энергетики. Самые развитые страны нашей планеты уже давно поняли, что пора прибегать к неисчерпаемым альтернативным источникам энергии, в частности эффективно использовать солнечную энергию. Это Германия, Италия, Япония, США, Испания, Китай, Франция, Чехия, Бельгия и Австралия.

Во второй главе представлены определения фотоэлектрического эффекта и фотоэлектропреобразователя (ФЭП), то есть солнечного элемента, раскрыт принцип работы простейшего полупроводникового солнечного элемента на основе *p-n*-перехода. Фотоэлектрическим эффектом называют явление возникновения разности потенциалов, то есть фотоЭДС, а, следовательно, и фототока при попадании электромагнитного излучения на поверхность полупроводникового материала, обладающего неоднородной для движения носителей заряда структурой. Простейшим примером солнечного элемента является полупроводниковая структура с *p-n*-переходом. Процесс преобразования солнечной энергии в электрическую можно условно разбить на

четыре стадии: поглощение света, генерация электронно-дырочных пар, разделение носителей заряда p - n -переходом, сбор носителей заряда на электродах. В главе подробно раскрыты суть и метод расчета основных специальных характеристик и параметров солнечного элемента. К специальным характеристикам солнечного элемента относятся вольт-амперная (ВАХ) и спектральная. К специальным параметрам солнечного элемента относятся КПД (эффективность), ff (фактор заполнения), U_{oc} (напряжение холостого хода), I_{sc} (ток короткого замыкания) или J_{sc} (плотность тока короткого замыкания).

В третьей главе данной диссертационной работы раскрыты сущность и особенности многoperеходных, или тандемных, солнечных элементов. Одна из главных целей и наиболее важнейший механизм работы тандемных солнечных элементов заключается в поглощении света в как можно большем диапазоне спектра излучения. Для этого каждый слой в солнечном элементе имеет разную ширину запрещенной зоны, по мере уменьшения данной величины от верхнего слоя к нижнему. Такая конструкция позволяет верхнему слою поглощать фотоны с большой энергией, в то время как нижний слой поглощает фотоны с меньшей энергией, которые не могут быть поглощены в верхнем слое. При разработке тандемных солнечных элементов следует помнить о важности учета трех компонентов: разница ширин запрещенной зоны, согласование постоянных кристаллических решеток и согласование токов. В главе описаны особенности выбора того или иного материала с соответствующими параметрами для использования в тандемной структуре солнечного элемента.

Четвертая глава знакомит нас о методике моделирования в среде программного комплекса Silvaco Atlas. Подробно описаны способы заявки исходных параметров среду моделирования, особенности технологического маршрута полупроводниковой структуры и инструментарий для экстракции и графического представления интересующих нас параметров и характеристик готовой структуры.

Пятая глава раскрывает результаты моделирования структур солнечных элементов на основе нитрида индия-галлия ($InGaN$) с одним, двумя, тремя и четырьмя p - n -переходами. В результате моделирования структур фотоэлектротрансформаторов на основе $In_xGa_{1-x}N$ и теоретического расчета их электрических параметров наблюдался значительный рост эффективности работы устройств от 8,19 – 24,32% для однопереходных солнечных элементов до 35,58% для двухпереходного, 38,90% – трех-переходного, 41,69% – четырех-переходного солнечного элемента. Результаты проведенного моделирования показывают, что нитрид индия-галлия потенциально является отличным полупроводниковым фотоэлектрическим материалом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодняшнее мировое потребление энергии находится между 12 и 13 ТВт в год и оно будет только возрастать по мере увеличения технологических изменений и роста численности населения. Основные ресурсы для энергопотребления – это ископаемое топливо, которое, как известно, является вредным для окружающей среды из-за избыточного выброса парниковых газов при их использовании. Альтернатива, которая медленно набирала обороты в качестве жизнеспособной альтернативы по отношению к ископаемому топливу, использует солнечные элементы. За один час в атмосферу попадает достаточное количество солнечной энергии для поддержания общественных потребностей в энергии в течение года.

Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу преобразования энергии обусловлен реальной возможностью создания стабильных в эксплуатации, дешевых и высокоэффективных солнечных элементов. С этих позиций преобразователи солнечной энергии в электрическую имеют как свои преимущества, так и недостатки. Среди основных преимуществ солнечных элементов можно выделить:

- прямое преобразование солнечной энергии в электричество;
- неограниченность запаса солнечной энергии;
- децентрализованное производство энергии, что позволяет исключить создание линий электропередач;
- отсутствие вредных выбросов в окружающую среду;
- возможность размещения на различных конструкциях строений (стены, крыши);
- высокая надежность;
- не имеют движущихся частей, что упрощает обслуживание, снижает стоимость и увеличивает срок службы (вероятно, он будет достигать порядка сотни лет);
- не требуют высокой квалификации обслуживающего персонала;
- пригодны для создания установок практически любой мощности.

Инженерными расчетами подтверждено, что 1 грамм тандемного элемента в солнечной концентраторной фотоэнергоустановке эквивалентен по вырабатываемой за 25 лет работы электроэнергии 5 тоннам нефти. А время возврата электроэнергии, затраченной на изготовление таких фотоэнергоустановок, составляет менее 1 года.

Одна из главных целей и наиболее важнейший механизм работы тандемных солнечных элементов заключается в поглощении света в как можно большем диапазоне. Для этого верхний слой в солнечном элементе будет иметь

наибольшую ширину запрещенной зоны, а нижний слой – наименьшую ширину запрещенной зоны. Такая конструкция позволяет верхнему слою поглощать фотоны с большой энергией, в то время как нижний слой поглощает фотоны с меньшей энергией, которые не могут быть поглощены в верхнем слое. Когда фотон сталкивается с тандемной структурой солнечного элемента, он может быть поглощен в первом слое, если его энергия больше, чем ширина запрещенной зоны, соответствующая первому материалу. Если энергия фотона не больше, чем ширина запрещенной зоны, то фотон будет двигаться ниже до следующего слоя и будет им поглощен, если его энергия больше, чем ширина запрещенной зоны этого слоя. Данный процесс будет продолжаться, пока фотон не достигнет последнего слоя в солнечном элементе с наименьшей шириной запрещенной зоны.

Реализация большего числа переходов в структуре солнечного элемента позволяет увеличить эффективность, так как добавляется маленькая дополнительная разница к существующей разнице между ширинами запрещенной зоны от верхнего слоя до нижнего в солнечном элементе. Дополнительная разность означает уменьшение термической потери от большой энергии фотонов, достигнутых уровня с маленькой шириной запрещенной зоны ниже лежащих уровней.

В диссертационной работе исследована и представлена возможность изготовления тандемной структуры фотоэлектропреобразователя, сочетающего в себе такие преимущества, как высокая эффективность работы устройства и нетоксичность его производства. Нитрид индия-галлия теоретически является одним из самых перспективных полупроводниковых материалов для применения в фотогальванических устройствах. Моделирование таких приборов проводилось с помощью Silvaco Atlas. Результаты моделирования для четырех-переходного солнечного элемента на основе нитрида индия-галлия показывают, что совершенно новый высокоэффективный материал может получиться при реализации. Текущее состояние дел в области современных многопереходных (тандемных) солнечных элементах показывает КПД в диапазоне 30 – 33%. При проведении моделирования с помощью программного комплекса Silvaco Atlas была предсказана эффективность работы многопереходного солнечного элемента 41%, что является несомненно относительно высоким показателем, вызывающим серьезный интерес для дальнейшего изучения, реализации и оптимизации.

Данное исследование ориентировано на развитие и совершенствование модели солнечных элементов, что объясняет использование оптических констант (коэффициентов преломления и затухания n и k). При моделировании использовались настройки по умолчанию для других параметров, таких как

диэлектрическая проницаемость, структурное сродство, скорость излучательной рекомбинации, время жизни электронов и дырок, плотность состояний электронов и дырок, постоянные решетки. Одним из возможных направлений дальнейших исследований является измерение величин указанных выше параметров. Эта стадия имеет весомое значение в улучшении модели солнечного элемента. Другой вариант заключается в интерполяции из уже известных значений параметров. Кроме того, учет туннельных переходов в моделировании имеет также большое значение.

Другие перспективные области исследования основаны на поиске других полупроводниковых материалов, которые являются конкурентоспособной высокоэффективной сырьевой базой для солнечной энергетики.

Можно сделать еще одну заметку по поводу оптимизации физических параметров солнечного элемента. Толщина каждого из слоев может быть оптимизирована для получения более высокой эффективности работы всего устройства. Также распределение ширины запрещенной зоны в четырех переходах солнечного элемента может быть улучшено, чтобы получить более высокую эффективность. Следует отметить, что получение корректных оптических данных для принятых запрещенных зон имеет важное значение.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Карпович, А. Солнечные элементы на основе диода Шоттки с наноструктурированным электродом / А. Карпович, С. Жук, Б. Казаркин, В. Кайлевич, Я. Сацкевич, Е. Муха, А. Степанов, А.Смирнов // Россия - Беларусь - Сколково: единое инновационное пространство: Тезисы международной научной конференции – Минск, 2012 – С. 250 – 251.
2. Smirnov, A. Aluminum Nanostructured Coating as Alternatives to Metal Oxide and Transparent Semiconductors / A. Smirnov, A. Stsiapanau, Y. Mukha, Ya. Satskevich // Eurodisplay – 2013: Abstracts 33rd International Display Research Conference – UK, London, 2013 – P. 68 – 69.
3. Сацкевич, Я. В. Солнечный элемент на основе диода Шоттки с алюминиевым полупрозрачным наноструктурированным электродом / Я. В.Сацкевич, А. Г. Смирнов, А. А.Степанов, Е. В. Муха // Молодежь в науке - 2013: Материалы международной научно-практической конференции – Минск, 2013 – С. 623 – 624.
4. Сацкевич, Я. В. Технология формирования солнечного элемента с наноструктурированным алюминиевым электродом / Я. В.Сацкевич, А. Г. Смирнов, А.А.Степанов // Энергетика в современном мире: Тезисы VI международной заочной научно-практической конференции – Чита, Россия, 2013 – С. 6 – 10.
5. Дадиванян, А. К. Ориентация нематических жидких кристаллов относительно нанопористых пленок / А. К. Дадиванян, В.В.Беляев, Д.Н.Чаусов, А.Г. Смирнов, А.А.Степанов, А.Д.Курилов, Я.В.Сацкевич // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2013. – Вып.4(46). – С. 81– 86.
6. Сацкевич, Я. В. Самоорганизующаяся наноструктура в конструкции солнечного элемента на основе диода Шоттки / Я.В. Сацкевич, А.Г. Смирнов, А.А. Степанов // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР: Материалы конференции – Минск, 2014 года. – С. 69 – 70.
7. Степанов, А.А. Формирование структуры солнечного элемента на основе диода Шоттки с наносетчатым электродом / А.А.Степанов, А.Г.Смирнов, Я.В.Сацкевич, Я. А.Соловьев // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: Тезисы XIX международной конференции – С.Петербург, Россия, 2014. – С. 269 – 270.
8. Kazarkin, B. Nanomaterials with periodic relief surface as a liquid crystal's alignment media / B.Kazarkin, A.Stsiapanau, A.Tsybin, Y.Mukha, Y.Satskevich, A.Smirnov // Saint-Peterburg OPEN 2014:Abstracts 1st Int.School and Conference – S.Peterburg, Russia, 2014. – P.52 – 53.

9. Kazarkin, B. Transparent conductor based on aluminum nanomesh / B.Kazarkin, A.S.Mohammed, A.Stsiapanau, S Zhuk, Y.Satskevich, A.Smirnov // JOP Journal of Physics: Conference Series 541 (2014)012027. – P. 1 – 6.
10. Сацкевич, Я. В. Самоорганизующаяся алюминиевая наноструктура в конструкции солнечного элемента / Я. В. Сацкевич, А. Г. Смирнов, А.А.Степанов, Е. В. Муха // Наноструктурные материалы – 2014: Беларусь – Россия – Украина. Нано – 2014: Материалы IV международной научной конференции – Минск, 2014. – С.77.
11. Жук, С. Д. Фотовольтаический элемент на основе структуры монокремний-нанопористый алюминий / С. Д. Жук, А. Г. Смирнов, Я. В. Сацкевич, А.М.Карпович, Б. А. Казаркин, Я. А. Соловьев // Материалы и структуры современной электроники: сборник научных трудов VI Международной научной конференции – Минск : БГУ, 2014. – С. 187–188.
12. Grib, Y. The photovoltaic tandem converter of solar energy / Y. Grib, A.Stsiapanau, A. Smirnov, E. Mukha // Saint-Petersburg OPEN 2015: BOOK of ABSTRACTS 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures – St. Petersburg, Russia, 2015.–P. 85– 86.
13. Электрохемиллюминесцентное устройство отображения информации: пат. на полезную модель Республики Беларусь, МПК В32В 9/00, В82У40/00, С09К11/00, G01N21/76, G02F1/1365 / А. Г. Смирнов, А. А.Степанов, Е. В. Муха, Я. В.Сацкевич, В.С.Кайлевич; заявитель учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники". – № 9396; заявл. 24.10.2012; опубл. 30.08.2013.
14. Конструкция эмиссионного микродисплея с субмикронными полостями и резервуаром: пат. на полезную модель Республики Беларусь, МПК В32В 9/00, В82У40/00, С09К11/00, G09G3/30 / А. Г. Смирнов, А. А.Степанов, Е. В. Муха, Я. В.Сацкевич, В.С.Кайлевич; заявитель учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники". – № 9500; заявл. 24.10.2012; опубл. 30.08.2013.
15. Солнечный элемент на основе диода Шоттки с металлическим полупрозрачным наноячейстым электродом: пат. на полезную модель Республики Беларусь от 01.04.2014, МПК Н 01L 27/14, Н 01L31/06, Н 01L31/108 / А. Г. Смирнов, А. А. Степанов, Е. В.Муха, Я.В. Сацкевич, Я. А. Соловьев; заявитель учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники". – № 10183; заявл. 13.11.2013; опубл. 30.06.2014.