

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

УДК 628.987

Нгуен
Ван Зунг

Фотоэлектрический датчик контроля суммарной солнечной радиации

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание 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
профессор кафедры ЭТТ
профессор; кандидат технических наук

Минск 2020

ВВЕДЕНИЕ

Энергоэффективность солнечных электростанций зависит от степени суммарной солнечной радиации региона, поэтому каждая солнечная электростанция должна иметь эталонные приборы для постоянного мониторинга потока солнечного излучения и оценки эффективности выработки электроэнергии. Точные и надежные измерения потока солнечного излучения позволяют создать базу данных о производительности электростанции в различных условиях. Это дает возможность более точно прогнозировать во времени объемы выработки энергии и сроки окупаемости затрат.

Исторически сложилось так, что мониторинг уровня суммарной солнечной радиации уже многие десятилетия выполняется метеорологическими станциями с использованием термоэлектрических датчиков, работа которых основана на эффекте Зеебека. Такие же датчики на рынке предлагаются для контроля инсоляции и в системах солнечной энергетики, несмотря на их высокую инерционность, сложность в изготовлении и высокую стоимость.

В настоящей работе предполагается для контроля солнечной радиации разработать и применить фотоэлектрический датчик, который в отличие от термоэлектрических является малоинерционным, а его спектральная чувствительность может быть достаточно близкой этому показателю у силовых фотопреобразователей солнечных электростанций. Это позволит оценивать уровень инсоляции, способный быть полностью преобразованным в электрическую энергию, отрезая при этом неэффективную теплообразующую длинноволновую часть солнечного спектра.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Каждая солнечная электростанция должна иметь эталонные приборы для постоянного мониторинга потока солнечного излучения и оценки эффективности выработки электроэнергии. Точные и надежные измерения потока солнечного излучения позволяют создать базу данных о производительности электростанции в различных условиях. Это дает возможность более точно прогнозировать во времени объемы выработки энергии и сроки окупаемости затрат, что является важной и актуальной задачей.

Цель и задачи исследования

Целью данного магистерской диссертации является разработка фотоэлектрического датчика контроля суммарной солнечной радиации с двусторонней светочувствительностью.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзор и анализ существующих методов и приборов контроля солнечной радиации.
2. Разработать фотоэлектрический датчик с двухсторонней чувствительностью.
3. Определить возможность и конкурентные преимущества использования для контроля солнечной радиации в системах солнечной энергетики фотоэлектрического датчика с двухсторонней светочувствительностью.

Область исследования Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-41 80 02 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Научная новизна

Научная новизна полученных результатов обусловлена оригинальностью предложенных концептуальных технических решений полупроводниковой структуры фотоэлектрического датчика.

Теоретическая значимость работы заключается в детальном анализе методов и приборов измерения солнечной радиации. Сравнительный анализ термо и фотоэлектрических преобразователей для мониторинга солнечного излучения. Моделирование полупроводниковой структуры фотоэлектрического датчика и выбор параметра контроля.

Практическая значимость – экспериментально подтверждена возможностью измерения оптических излучений, интенсивность которых отличается на 3 порядка.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Физическая модель кремниевой полупроводниковой структуры фотоэлектрического датчика, полученная в среде COMSOL Multiphysics, с оригинальным просветляющим покрытием на основе пятиоксида тантала (Ta_2O_5), наносимым из пленкообразующего раствора экономичным методом центрофугирования.
2. Имитационная модель датчика, позволяющая отображать семейство ВАХ и ВВХ солнечных элемента в зависимости от уровня интенсивности солнечного излучения. Разработанная модель описывает реальный солнечный элемент с некоторой степенью приближения с учетом принятых допущений, но позволяющая выбрать измеряемый параметр – ток короткого замыкания $I_{кз}$, линейно зависимый от интенсивности излучения.
3. Оригинальный трехвыводной фотоэлектрический датчик диаметром 100мм с двухсторонней светочувствительностью на основе

монокристаллического кремния р-типа с симметричной относительно базовой области биполярной структурой $n^+ - p - n^+$, позволяющий в режиме онлайн контролировать прямую, рассеянную и отраженную составляющую солнечного излучения.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 55-й и 56-й научных конференциях студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР.

Публикации

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в 4 опубликованных работах, представленных в материалах международных научно-практических и научно-технических конференций. Общий объем публикаций 10 страниц.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 75 страниц включая 31 иллюстраций, 10 таблицы, библиографический список из 37 наименований, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований, 1 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено современное состояние мировой солнечной энергетики, определены основные цели разработки приборов для измерения солнечной радиации, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В общей характеристике работы сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации, а также, структура и объем диссертации.

В первой главе диссертационной работе представлены характеристики солнечного излучения, составляющие солнечной радиации на поверхности земли.

Наблюдения за солнечным излучением на земной поверхности появилось задолго до появления систем солнечной энергетики. Традиционным датчиком интенсивности излучения является термоэлектрический преобразователь, работающий на термопарном эффекте Зеебека. На основе этих датчиков создан *пиранометр* – основной прибор метеостанций, имеющий несколько модификаций.

Комбинация из инструментов для измерения суммарного потока, прямого и рассеянного солнечного излучения составляет «станцию солнечного мониторинга».

Данные мониторинга статистически обрабатываются и на их основе строятся мировые карты изопотока солнечного излучения.

В составе солнечного излучения на поверхности земли включает: прямая солнечная радиация, рассеянная радиация и отражённая радиация.

Суммарная солнечная радиация включает прямую, рассеянную и отраженную от поверхности составляющие и является энергетическим ресурсом наземных солнечных фотопреобразовательных систем.

При инсталляции и эксплуатации систем солнечной энергетики требуется решение задачи создания датчика, обеспечивающего точный, оперативный и малоинерционный контроль суммарной солнечной радиации, что делает тему диссертационной работы актуальной.

Во второй главе рассмотрены методы и приборы для измерения солнечного радиация.

На рисунке 1 приведены принципиальные технические схемы приборов для измерения различных составляющих СИ: $R_{\Sigma}(t)$, $R_{np}(t)$, $R_d(t)$.

Информация о солнечном излучении в определенном месте может быть представлена в нескольких видах:

- обычные среднегодовые данные для определенного местоположения;
- усредненная плотность энергии излучения за день, месяц, год для определенного местоположения;
- контурная карта изопотока за весь год, четверть года или за один месяц;
- данные о количестве солнечных часов;
- плотность энергии излучения по данным об облачном покрове, полученным со спутника;
- теоретический расчет.

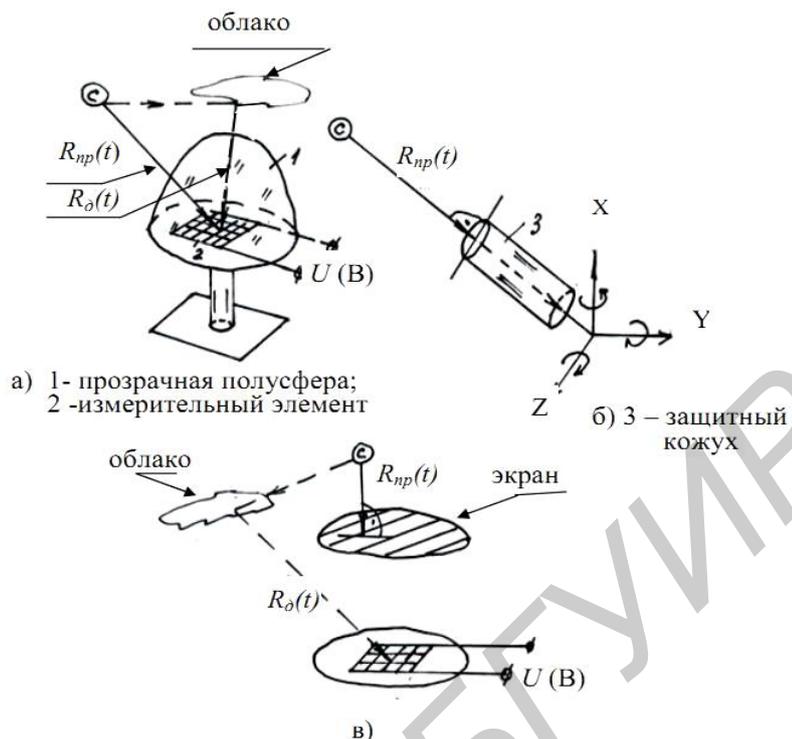


Рисунок 1 – Принципиальные схемы приборов для измерения солнечного излучения

а) - $R_{\Sigma}(t)$, б) - $R_{np}(t)$, в) - $R_{\delta}(t)$

СИ в мире измеряется с помощью двух основных видов приборов: актинометры (пиргелиометры) и солариметры (пиранометры). Актинометры (от греческого "aktis" – луч) предназначены для измерения прямого СИ. Солариметры или пиранометры измеряют как суммарное и напряжение одной только рассеянной радиации. Для этого нужно его защитить от действия прямых солнечных лучей небольшим экраном.

Пиранометр, обращенный к земле, может служить для измерения отраженной радиации, направленной снизу вверх от поверхности земли, растительного покрова и т. д. Пиргелиометр используется для абсолютных измерений потоков прямой солнечной радиации.

В настоящей работе предполагается для контроля солнечной радиации разработать и применить фотоэлектрический датчик с двухсторонней светочувствительностью, который позволит одновременно с прямой и рассеянной составляющими солнечного излучения контролировать составляющую, отраженную от поверхности земли, давая более полную информацию об энергетическом потенциале солнца в месте расположения фотоэлектрической системы электроснабжения.

В третьей главе проведены моделирования ФЭП.

Для моделирования данного ФЭП используем среду COMSOL Multiphysics. В результате моделирования были получены фотоэлектрические характеристики ФЭД.

Основные параметры ФЭП, получаемые при моделировании показаны в таблице 1

Таблица 1 – Основные параметры ФЭП при условии освещения AM 1,5

| Параметры | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| Ток короткого замыкания, А | 2,05 |
| Напряжение холостого хода, В | 0,56 |
| Ток максимальной мощности, А | 1,79 |
| Напряжение максимальной мощности, В | 0,51 |
| Максимальная мощность, Вт | 0,92 |
| КПД | 12% |
| Коэффициент заполнения, FF | 0,78 |

Данные, полученные в COMSOL Multiphysics, обрабатываются с помощью программной среды MATLAB Simulink. Рисунок 3 демонстрируют вольт-амперные характеристики и при различных значениях мощности освещения.

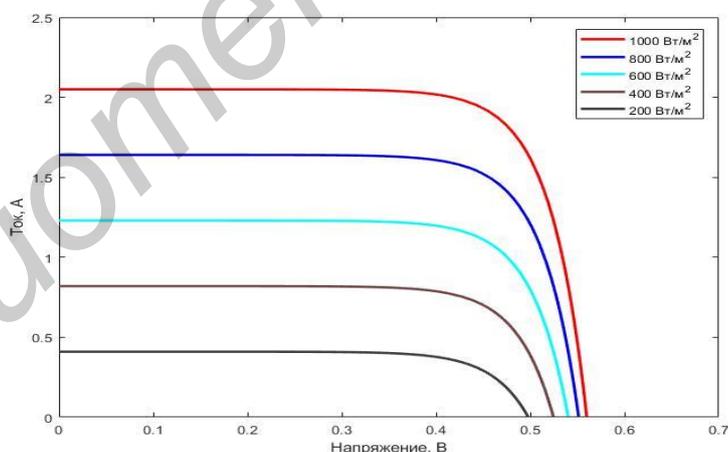


Рисунок 3 – Вольтамперные характеристики ФЭП при различных условиях освещения

Получена имитационная модель, позволяющая отображать семейство ВАХ и ВВХ ФЭП в зависимости от уровня интенсивности солнечного излучения. Разработанная модель описывает реальный ФЭП лишь с некоторой степенью приближения, с учетом принятых допущений.

Результаты моделирования показывают основные параметры ФЭП, из которых можно выбрать подходящие измерительные приборы для практического обследования.

В четвертой главе диссертационной работы описаны экспериментальные исследования лабораторных макетов.

Оригинальный трехвыводной фотоэлектрический датчик с двухсторонней светочувствительностью диаметром 100мм основан на монокристаллическом кремнии р-типа с симметричной относительно базовой области биполярной структурой $n^+ - p - n^+$. ФЭД был смонтирован на зеркальном пьедестале с помощью подвижного карданного устройства, позволяющего менять ориентацию ФЭД относительно пьедестала в различных плоскостях, (рисунок 4), создавая эффект отражения света от подстилающей поверхности.

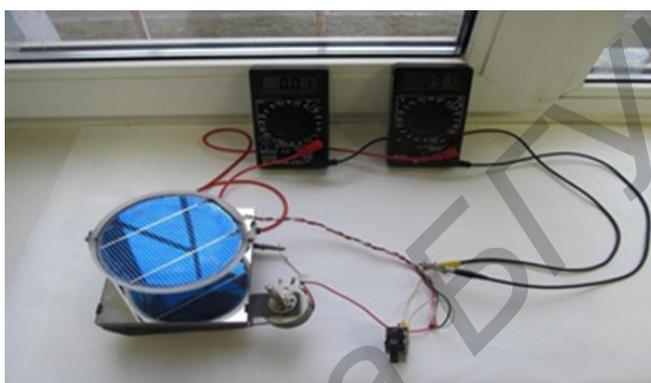


Рисунок 4 – Разработанный двухсторонний ФЭД

ВАХ ФЭД выглядят следующим образом:

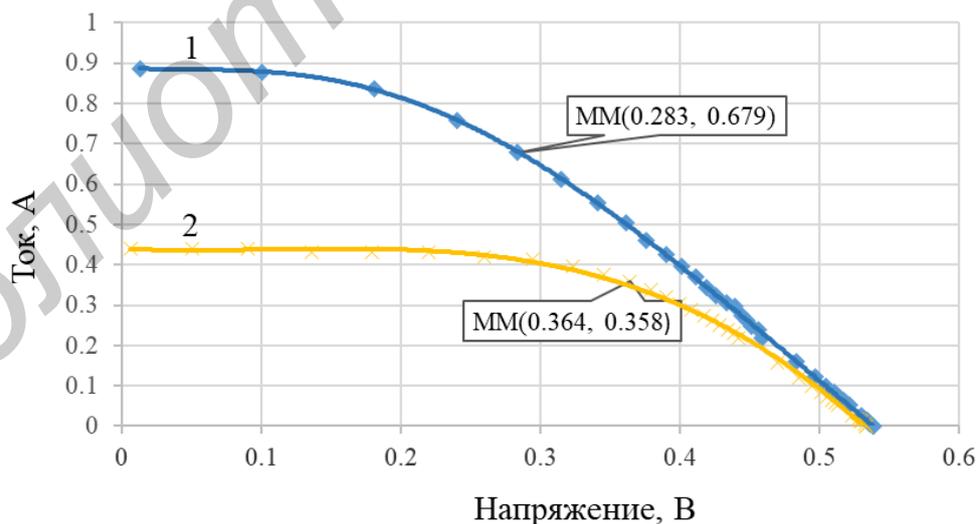


Рисунок 5 – Вольтамперная характеристика фотоэлектрического датчика при различных условиях освещенности

1 – С линзой френеля; 2 – без линзы френеля

Для измерения интенсивности освещения, собран лабораторный макет по электрической схеме, изображенной на рисунке 6.

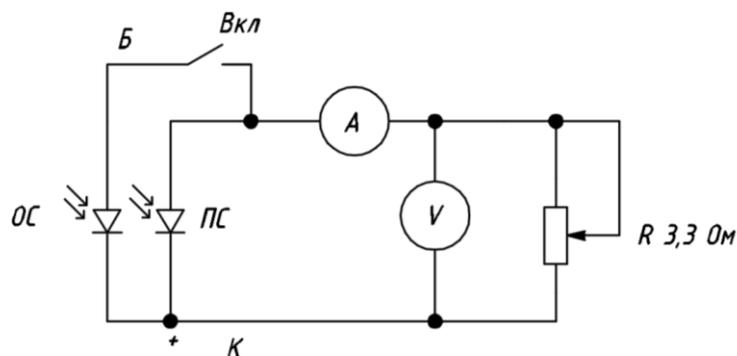


Рисунок 6 – Электрическая схема лабораторного макета

Двухсторонняя светочувствительность ФЭД в данном случае необходима для учета составляющей солнечного света, отраженной от поверхности земли (альбедо). Для измерения интенсивности света от галогенной лампы и белого светодиода двухсторонней светочувствительности фотоэлектрического преобразователя не требуется.

Результаты этих измерений приведены в таблице 2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений электрических параметров ФЭД

| Параметр ФЭД | Фронтальная сторона | Обе стороны |
|--|---------------------|-------------|
| Натурное солнечное излучение | | |
| $I_{кз}, A$ | 1,9 | 2,3 |
| $U_{хх}, B$ | 0,558 | 0,560 |
| Излучение галогенной лампы с тепловой температурой 3000К | | |
| $I_{кз}, A$ | 0,38 | – |
| $U_{хх}, B$ | 0,552 | – |
| Излучение белого люминофорного светодиода мощностью 5Вт | | |
| $I_{кз}, A$ | 0,017 | – |
| $U_{хх}, B$ | 0,420 | – |

Эксперименты показали, что разработанный фотоэлектрический датчик измеряет интенсивность светового потока источников света по величине тока короткого замыкания. При контроле интенсивности солнечного излучения возможно одновременное измерение полного потока излучения, включая составляющую излучения, отраженную от подстилающей поверхности (альбедо). Для применения прибора в мониторинге систем освещения необходима простая градуировка шкалы прибора в единицах освещенности – люмен/м² или люкс по эталонному прибору.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены характеристики солнечного излучения на поверхности земли. К ним относятся: прямая солнечная радиация, рассеянная радиация, отраженная радиация и суммарная солнечная радиация. Наблюдения за солнечным излучением на земной поверхности появилось задолго до появления систем солнечной энергетики. Традиционным датчиком интенсивности излучения является термоэлектрический преобразователь, работающий на термопарном эффекте Зеебека. На основе этих датчиков создан пиранометр – основной прибор метеостанций, имеющий несколько модификаций. Комбинация из инструментов для измерения суммарного потока, прямого и рассеянного солнечного излучения составляет «станцию солнечного мониторинга».

2. Сравнительный анализ существующих методов и приборов контроля солнечной радиации по плотности потока излучения (Вт/м^2). Для измерения солнечной радиации в широком спектральном диапазоне обычно используют термоэлектрический датчик (пиранометр, пиргелиометр). Фотоэлектрический датчик отличается от термоэлектрических малой инерционностью, а его спектральная чувствительность может быть достаточно близкой этому показателю у силовых фотопреобразователей солнечных электростанций. Это позволит оценивать уровень радиации, способный быть полностью преобразованным в электрическую энергию, отрезая при этом неэффективную теплообразующую длинноволновую часть солнечного спектра. К тому же фотоэлектрический датчик намного дешевле по сравнению с термоэлектрическим датчиком.

3. Выполнено моделирование полупроводниковой структуры фотоэлектрического датчика и выбраны контролируемые параметры. Физическая модель кремниевой полупроводниковой структуры фотоэлектрического датчика, полученная в среде COMSOL Multiphysics, имеет оригинальное просветляющее покрытие на основе пятиоксида тантала (Ta_2O_5), наносимое из пленкообразующего раствора экономичным методом центрофугирования. Получена имитационная модель датчика, позволяющая отображать семейство ВАХ и ВВХ ФЭП в зависимости от уровня интенсивности солнечного излучения. Разработанная модель описывает реальный ФЭП с некоторой степенью приближения с учетом принятых допущений, но позволяющая выбрать измеряемый параметр – ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$, линейно зависимый от интенсивности излучения.

4. Разработан и изготовлен безинерционный датчик суммарной солнечной радиации с линейной шкалой. Датчик основан на трехвыводном ФЭП,

преобразующим энергическую освещенность в электрический сигнал в аналоговой форме. Оригинальный трехвыводной фотоэлектрический датчик диаметром 100 мм с двухсторонней светочувствительностью разработан на основе монокристаллического кремния р-типа с симметричной относительно базовой области биполярной структурой $n^+ - p - n^+$. ФЭД был смонтирован на зеркальном пьедестале с помощью подвижного карданного устройства, позволяющего менять ориентацию ФЭД относительно пьедестала в различных плоскостях, создавая эффект отражения света от подстилающей поверхности.

Выполнены экспериментальные исследования датчика при оптическом излучении различной интенсивности. Эксперименты показали, что разработанный фотоэлектрический датчик измеряет интенсивность светового потока источников света по величине тока короткого замыкания. При контроле интенсивности солнечного излучения возможно одновременное измерение полного потока излучения, включая составляющую излучения, отраженную от подстилающей поверхности (альбедо). Для применения прибора в мониторинге систем освещения необходима простая градуировка шкалы прибора в единицах освещенности – люмен/м² или люкс по эталонному прибору.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

[1-А.] Василевич В. П., Фотоэлектрический преобразователь для мониторинга систем освещения/ Василевич В. П, Нгуен В.З., Дятлов Е. К.,// – Доклады БГУИР № 7 (117), С 144 – 147.

[2-А.] Василевич В. П., Использование аккумуляторно-емкостного накопления в фотоэлектрических системах/ Василевич В. П., Дятлов Е. К., Нгуен В. З.// Сборник МНПК «Техника и технологии: инновации и качество» 2018, БарГУ, Барановичи, Беларусь. С 110-111.

[3-А.] Нгуен В.З., Повышение мощности солнечного элемента в условиях двустороннего освещения // 55-я юбилейная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22-26 апреля 2019 г., БГУИР, Минск, Беларусь: тезисы докладов. – Мн. – 2019. – 649 с.; ил. С 341–342.

[4-А.] Нгуен В.З., Световая вольтамперная характеристика фотоэлектрического датчика контроля солнечной радиации // 56-я конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники». » 18-20 мая 2020 г. – Минск : БГУИР, 2020. С 360-361.