

На правах рукописи



**ФЕДОТИКОВА МАРИЯ ВЛАДИМИРОВНА**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ  
ВЫРАБОТКИ ЭНЕРГИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ МОДИФИКАЦИЕЙ ИХ ПОВЕРХНОСТИ  
НАНОКЛАСТЕРАМИ СЕРЕБРА**

Специальность:

2.6.5. «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва, 2023 г.

Работа выполнена на кафедре «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
**Крит Борис Львович**

Официальные оппоненты: **Белянин Алексей Федорович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский  
технологический университет», ведущий  
научный сотрудник

**Рыжиков Илья Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБУН Институт теоретической и  
прикладной электродинамики РАН,  
заведующий лабораторией

Ведущая организация: ФГБУН Институт химии растворов им.  
Г.А. Крестова Российской Академии Наук,

Защита диссертации состоится «21» декабря 2023 г. 16<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 24.2.327.04 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3. ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте [https://mai.ru/upload/iblock/096/etalsv2agb6jz815izvcd642s7qw3sub/Dissertatsiya\\_Fedotikova.pdf](https://mai.ru/upload/iblock/096/etalsv2agb6jz815izvcd642s7qw3sub/Dissertatsiya_Fedotikova.pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



С.В. Скворцова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

В настоящее время в связи со сложившейся тенденцией постоянного увеличения энергопотребления и изменением климатических условий, мировая общественность всё больше склоняется к необходимости перехода от энергии, получаемой традиционным методом (через сжигание топлива), на энергию, вырабатываемую возобновляемыми источниками энергии далее – ВИЭ). По мнению ряда экспертов, в пользу данного решения говорят аналитические показатели, согласно которым запасы минерального топлива (уголь, нефть, газ) и ядерного (в основном урана) могут быть исчерпаны к концу XXI века.

Непрерывный рост цен на традиционные энергоносители и на электрическую энергию, получаемую, в основном, от сжигания ископаемого топлива, обусловлен, прежде всего, ростом себестоимости добываемого топлива и увеличением затрат на его транспортировку. В то же время наметилась устойчивая тенденция снижения стоимости энергии, получаемой от ВИЭ. По этой причине наблюдается снижение потребления традиционных топливно-энергетических ресурсов за счёт использования альтернативных источников энергии.

Согласно данным компании Bloomberg, в 2022 году мировые инвестиции в технологии энергоперехода составили 1,1 трлн долларов США, что превысило показатели 2021 года более чем на 250 млрд долларов. Из них инвестиции в ВИЭ составили 495 млрд долларов, из которых большая часть приходится на солнечную энергетику, что говорит о перспективности получения электроэнергии посредством преобразования солнечной радиации. Солнечный свет – возобновляемый и неисчерпаемый источник, который используется для получения как тепловой, так и электрической энергии. Кроме того, солнечная энергетика является наиболее экологически чистой, практически не имеющей вредных выбросов. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли за неделю, превышает энергию всех мировых запасов нефти,

газа, угля и урана. В настоящее время преобразование солнечной энергии в электрическую является одним из самых актуальных и перспективных направлений, а создание и совершенствование фотовольтаических энергоустановок является одной из приоритетных задач в обеспечении энергетической безопасности России.

Преобразование солнечного излучения в электричество осуществляется при помощи солнечных фотоэлектрических элементов/преобразователей (далее – ФЭП). Наибольшее распространение получили полупроводниковые ФЭП на основе монокристаллического либо поликристаллического кремния. При этом коэффициент преобразования солнечной радиации в электрическую энергию современными серийными кремниевыми фотоэлектрическими модулями не превышает 15–20%. Фотоэлементы на основе поликристаллического кремния имеют самый дешёвый ватт электроэнергии, но их выработка ещё ниже. Большой проблемой при использовании солнечных установок также является невысокая плотность и непостоянство потока солнечной радиации. Недостаточная эффективность существующих гелиотехнических материалов является одной из главных причин, препятствующих развитию солнечной энергетики. В этом смысле задача повышения выработки энергии промышленно выпускаемых ФЭП является важной как для научного сообщества, так и для производителей и потребителей данного вида изделий.

В результате выполненного анализа релевантных публикаций было выявлено, что наиболее перспективным способом повышения выработки энергии ФЭП является применение различных функциональных покрытий приёмной поверхности фотоэлектрических элементов, позволяющих повысить эффективность без увеличения площади приёмной поверхности ФЭП. Наиболее результативным следует считать модифицирование наноразмерными частицами Ag и Au, которые характеризуются малым поглощением в широком диапазоне солнечного спектра и покрытия из которых представляют собой дискретные плёнки металлов с неоднородной поверхностью, обладающими уникальными

оптическими свойствами, обусловленными эффектом поверхностного плазмонного резонанса (далее – ППР).

Существующие способы нанесения наночастиц металлов, такие как золь-гель метод, CVD, PVD и другие, имеют свои ограничения, из-за которых возникает необходимость в разработке новых методов нанесения, которые бы обеспечивали:

- высокую производительность;
- дискретность расположения наночастиц на поверхности;
- минимальную трудоёмкость;
- отсутствие вероятности деформации подложки (ФЭП);
- приемлемую стоимость.

Таким образом, актуальной научной и практической задачей сегодня является повышение выработки энергии серийно выпускаемых ФЭП и разработка простой и относительно недорогой технологии, которая бы обеспечивала нанесение наночастиц на поверхность ФЭП и приводила к повышению выработки ими электрической энергии.

### **Цель и задачи**

**Целью** диссертационной работы является установление влияния параметров процесса электрофоретического осаждения наночастиц серебра на эксплуатационные свойства кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать установку для электрофоретического осаждения нанокластерного покрытия из коллоидного раствора серебра на приёмную поверхность фотоэлектрических преобразователей.
2. Разработать методику и соответствующее оборудование для характеристики фотоэлектрических преобразователей в исходном состоянии и с покрытием.

3. Исследовать влияние параметров процесса электрофоретического осаждения наночастиц серебра на формирование нанокластерного покрытия приёмной поверхности промышленных фотоэлектрических преобразователей.

4. Установить влияние нанокластерного покрытия на выработку энергии промышленными фотоэлектрическими преобразователями.

5. Установить влияние неметаллических технологических примесей на выработку энергии модифицированными промышленными фотоэлектрическими преобразователями.

6. Определить свойства промышленных фотоэлектрических преобразователей с покрытиями, сформированными электрофоретическим методом.

### **Научная новизна**

1. Обнаружен эффект локального поверхностного плазмонного резонанса при нанесении на приёмную поверхность кремниевых фотоэлектрических преобразователей наночастиц серебра методом электрофоретического осаждения из коллоидного раствора серебра, полученного плазменно-искровым методом диспергирования металла. Наличие эффекта поверхностного плазмонного резонанса подтверждено экспериментально зафиксированным повышением выработки энергии и результатами тестирования модифицированных фотоэлектрических преобразователей в лабораториях «Нанотехнологии» и «Прикладная плазмоника» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

2. Предложена феноменологическая модель и рассчитана вероятность возникновения поверхностного плазмонного резонанса при наличии на приёмной поверхности фотоэлектрических преобразователей нанокластерных Ag-покрытий.

3. Показано, что на возникновение поверхностного плазмонного резонанса в системе кремниевый фотоэлектрический преобразователь – наночастица Ag в области длин волн 270-370 нм существенное влияние оказывают

неметаллические примеси. В частности, наличие преципитатов бора снижает вероятность поверхностного плазмонного резонанса, а при концентрации более 0,1 ат. % исключает его.

4. Разработана и апробирована оригинальная методика тестирования фотоэлектрических преобразователей, основанная на измерении коэффициента обратного рассеяния лазерного излучения.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Установлено, что модифицирование поверхности фотоэлектрических преобразователей наночастицами серебра приводит к повышению выработки энергии на 20% за счёт инициирования эффекта поверхностного плазмонного резонанса, а также за счёт более полного преобразования потока падающей солнечной радиации даже при малых углах падения солнечных лучей на приёмную поверхность.

2. Предложена и конкретизирована концептуальная модель процесса электрофоретического осаждения наночастиц серебра из коллоидного раствора, полученного плазменно-искровым методом диспергирования металла.

3. Предложена и экспериментально верифицирована феноменологическая модель возникновения поверхностного плазмонного резонанса при наличии на приёмной поверхности фотоэлектрических преобразователей нанокластерных покрытий.

4. Разработана методика характеристики фотоэлектрических преобразователей с использованием метода обратного рассеяния лазерного излучения.

5. Сформулированы общие технологические рекомендации, представлена информация о возможностях применения результатов исследования. В алгоритмической форме разработаны регламенты проведения основных операций.

6. Результаты работы совместно с ООО «Энергоспецстрой» внедрены для энергообеспечения медицинского оборудования в санаторно-курортном комплексе Крыма, что подтверждено соответствующим Актом.

### **Методология и методы исследования**

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных учёных, государственные стандарты РФ.

При выполнении работы значительную часть исследований проводили с применением самостоятельно разработанных оригинальных методик и оборудования. Для решения поставленных задач в работе также были широко использованы конвенциональные современные экспериментальные и расчетные методы исследования и сертифицированное испытательное оборудование: оптическая и электронная микроскопия, испытания на адгезионную прочность, измерение коэффициента обратного рассеяния, численные методы моделирования.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Методика электрофоретического нанесения наночастиц из коллоидного раствора, полученного плазменно-искровым диспергированием серебра, на приёмную поверхность ФЭП.

2. Концептуальная модель процесса электрофоретического осаждения наночастиц серебра из коллоидного раствора, полученного плазменно-искровым методом диспергирования металла.

3. Методика тестирования ФЭП, включающая измерение коэффициента обратного рассеяния лазерного излучения, и результаты её апробации.

4. Феноменологическая модель возникновения ППР и её верификация при исследовании влияния микропримесей на выработку ФЭП.

5. Результаты исследований и характеристики модифицированных ФЭП.



## **Степень достоверности результатов**

Все результаты получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно - технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO). Обоснованность научных положений, выводов и практических рекомендаций, полученных в диссертационной работе, обеспечивается результатами экспериментальных исследований, успешным представлением основных положений в ряде докладов на российских и международных конференциях, а также результатами натурных испытаний. Технологические рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы проведёнными исследованиями и могут служить руководством при решении практических задач.

## **Апробация результатов**

Материалы диссертации доложены на 11 научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: «Научно-практическая конференция учёных России и Хорватии» (Москва, 2019); «XVI Международная научно-техническая конференция "Быстрозакалённые материалы и покрытия"» (Москва, 2019); «XLVI Международная молодёжная конференция "Гагаринские чтения – 2020"» (Москва, 2020); «XV Международная научная школа-семинар "Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия"» (Йошкар-Ола, 2020); «VII Научно-практическая конференция памяти О.В. Успенского» (Москва, 2020); «XLVII Международная молодёжная конференция "Гагаринские чтения – 2021"» (Москва, 2021); «VIII Научно-практическая конференция памяти О.В. Успенского» (Москва, 2021); «XIII Плесская международная научная конференция "Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии"» (Плёт, 2022); «Международная научно-практическая конференция "Перспективные технологии и материалы"» (Севастополь, 2022); «XIX Международная научно-

техническая конференция "Быстрозакалённые материалы и покрытия"» (Москва, 2022); «Всероссийская научно-методическая конференция "Белкинские чтения"» (Кострома, 2023); «Международная научно-практическая конференция "Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2023"» (Севастополь, 2023).

### **Публикации**

Результаты проведённых исследований опубликованы в 22 научных работах, из них 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК и 3 в журналах, включённых в международные системы цитирования.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка цитируемой литературы и трёх приложений. Объём диссертации составляет 158 страниц, включая 97 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 172 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** показана актуальность исследования по теме диссертации, дана общая характеристика и представлены научная новизна и практическая значимость работы.

### **Глава 1. Актуальные проблемы и тенденции современной фотовольтаики**

В главе рассмотрены фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), их виды и основные характеристики. Показаны преимущества и недостатки монокристаллических, поликристаллических и аморфных ФЭП. Отмечено, что массово выпускаемые ФЭП имеют КПД (менее 20%), а их эксплуатационные свойства неоднородны даже внутри одной партии.

Рассмотрены способы повышения выработки ФЭП. Анализ литературы показал, что наибольшее применение получили функциональные покрытия

(рассеивающие, просветляющие и др.), которые, позволяют повысить выработку энергии на 2-3%.

В процессе выполнения литературного анализа были также обнаружены сведения о том, что нанесённые на поверхность полупроводника (например, Si) наночастицы ряда металлов (чаще всего Au, Ag) способствуют повышению выработки энергии в среднем на 19%. Данный эффект объясняется формированием наноструктур, в которых при определённых условиях возможно возникновение явления поверхностного плазмонного резонанса (ППР). Были изучены основные материалы и формы наночастиц, покрытия из которых с большей вероятностью приводят к созданию условий для возникновения ППР. Были рассмотрены основные способы нанесения металлических наночастиц на подложку, отмечены их преимущества и недостатки.

На основании анализа литературных данных была сформулирована цель работы и поставлены конкретные задачи исследований.

## **Глава 2. Материалы, оборудование и методики исследования**

Исследования проводились на следующих образцах ФЭП:

- монокристаллические производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ» двух форм: стандартной шестиугольной и круглой;
- монокристаллические производства Allmejores Factory Store (Китай), имеющие шестиугольную форму;
- поликристаллические производства Allmejores Factory Store (Китай), имеющие четырёхугольную (квадратную) форму;
- аморфные (гибкие) производства Lich Official Store (Китай), имеющие четырёхугольную (прямоугольную) форму.

Для получения коллоидного раствора серебра с концентрацией 50 мг/л была использована установка синтеза наночастиц металлов (УСНМ), в основе которой лежит метод электроимпульсного диспергирования металлов. Данная установка была разработана на кафедре «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» МАИ (НИУ).

Для характеристики ФЭП был использован специально созданный лабораторный стенд для фотоэлектрических испытаний, который включал в себя: корпус, цифровой мультиметр Fluke 17B+, четыре галогенные лампы Uniel GU5.3, цифровой люксметр eЛайт-мини.

Для нанесения наночастиц серебра на приёмную поверхность ФЭП была использована собственная установка для электрофоретического осаждения наночастиц металла, в основе которой лежит метод электрофореза. Прототипом данной установки служила разработка кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» МАИ (НИУ).

Была разработана оригинальная методика более полной характеристики ФЭП с использованием метода обратного рассеяния лазерного излучения. Для реализации данной методики была создана установка для измерения величины коэффициента обратного рассеяния лазерного излучения в режиме реального времени.

В процессе исследований также было задействовано стандартное научно-исследовательское, технологическое оборудование, контрольно-измерительную аппаратуру и соответствующие им методики.

### **Глава 3. Теоретические и экспериментальные исследования модифицирования ФЭП электрофоретическим осаждением наночастиц Ag**

Глава посвящена изучению возможности формирования нанокластерного покрытия на приёмной поверхности ФЭП.

Выполнена характеристика ФЭП в исходном состоянии. Для характеристики были измерены значения трёх параметров:

- напряжение холостого хода;
- площадь ФЭП;
- коэффициент обратного рассеяния.

Характеристика ФЭП в исходном состоянии показала, что существующие в настоящее время технологии изготовления ФЭП имеют недостатки, главным следствием которых является наличие «мёртвых» ФЭП, у которых напряжение

холостого не превышает значение 0,2 мВ. По результатам тестирования составлена дефектная ведомость и отмечена необходимость доработки технологических процессов изготовления ФЭП.

Были выполнены экспериментальные исследования, направленные на формирование нанокластерного покрытия на приёмной поверхности ФЭП. По результатам предложена концептуальная модель и определён рациональный режим нанесения наночастиц серебра на приёмную поверхность ФЭП электрофоретическим методом: напряжение электрофореза 42 В, продолжительность процесса 10 минут. Структуры поверхности ФЭП до и после осаждения наночастиц серебра показаны на рисунке 1.

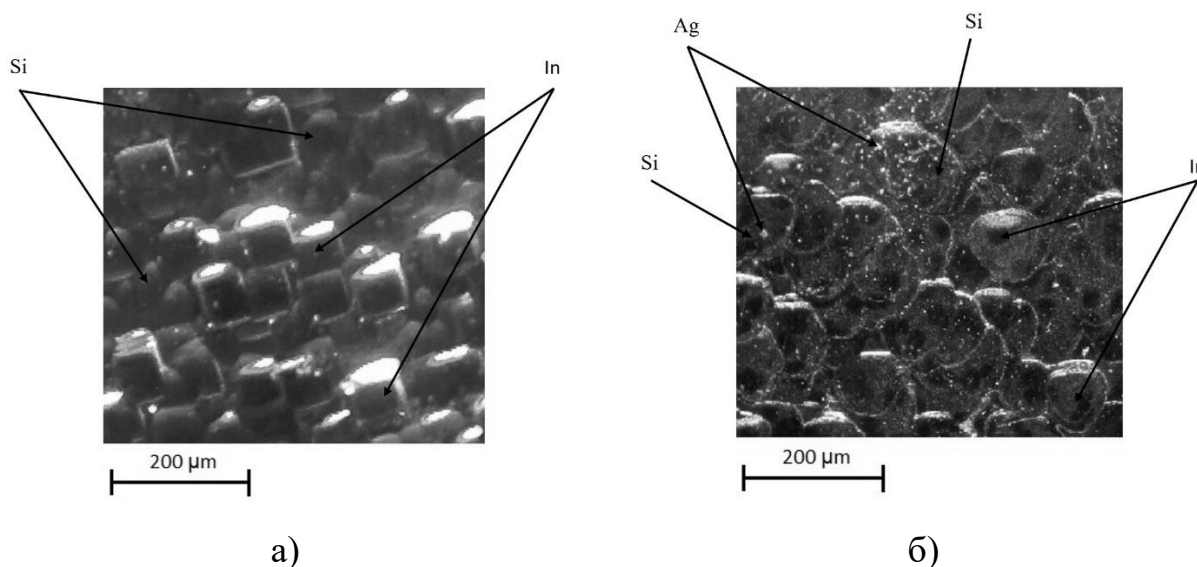


Рисунок 1 – Структура приёмной поверхности ФЭП: а) – в исходном состоянии; б) – после осаждения наночастиц серебра

Оценка адгезионной прочности покрытия, выполненная согласно ГОСТ Р 56127-2014, показала удовлетворительную прочность сцепления полученного покрытия с основой.

Натурные испытания модифицированных ФЭП, проведённые на базе Севастопольского государственного университета (широта 45°, в апреле, открытая площадка при естественном постоянном солнечном освещении около 950 Вт/м<sup>2</sup>), показали увеличение выработки ими электроэнергии в среднем на 20%. Помимо увеличения выработки, была также зафиксирована схожесть форм

графиков теоретической и экспериментально полученной зависимостей выработки энергии ФЭП от угла падения солнечного излучения (рисунки 2 и 3).

Для ФЭП с покрытием было установлено наличие эффекта поверхностного плазмонного резонанса, подтверждаемого экспериментально зафиксированным повышением выработки энергии и результатами тестирования модифицированных фотоэлектрических преобразователей в лабораториях «Нанотехнологии» и «Прикладная плазмоника» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (подтверждено актом).

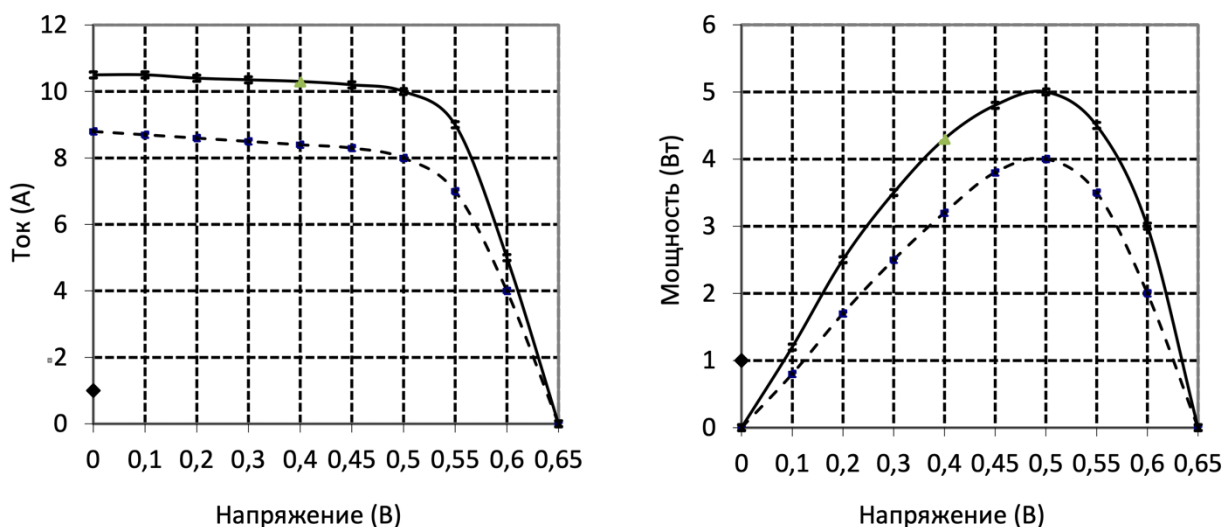


Рисунок 2 – Вольт-амперные и мощностные характеристики ФЭП: пунктирная линия – характеристики заводских ФЭП; сплошная линия – характеристики ФЭП с покрытием из наночастиц серебра (данные получены на площади приёмной поверхности  $0,37 \text{ м}^2$  при освещённости около  $950 \text{ Вт/м}^2$ )

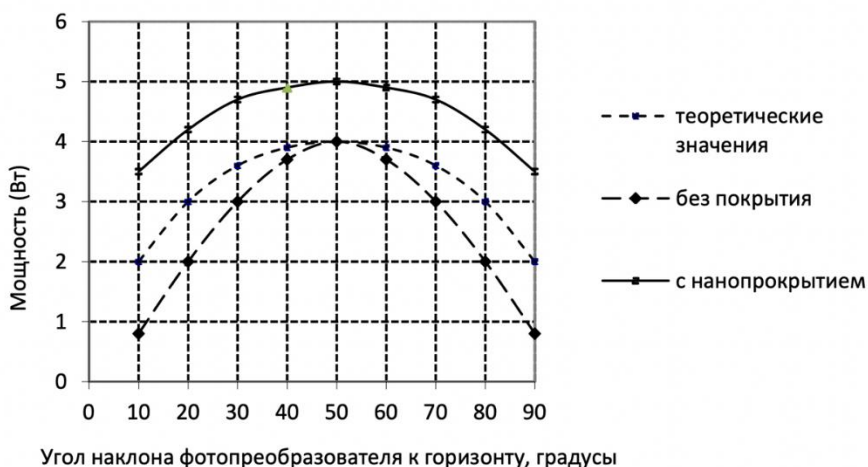


Рисунок 3 – Зависимость изменения выходной мощности ФЭП при изменении угла наклона к горизонту

#### **Глава 4. Теоретические и экспериментальные исследования модифицирования ФЭП электрофоретическим осаждением наночастиц Ag**

В главе представлена феноменологическая модель распределения рассеянной энергии вокруг наночастицы, осаждённой на поверхности ФЭП. Проведённые исследования показали, что модифицирование приёмной поверхности ФЭП нанокластерами серебра даёт ощутимое увеличение выработки энергии ФЭП. Данный феномен может быть объяснён наличием такого явления, как поверхностный плазмонный резонанс, который возникает при воздействии электромагнитного излучения определённых частот на плазмон, формирующийся в системе  $\text{наноAg-Si}$ . Предполагая, что все процессы происходят в скин-слое, в рамках приближения Друде-Лоренца для дисперсии электрического поля были рассчитаны показатель преломления и комплексная диэлектрическая проницаемость в зависимости от длины волны падающего излучения. Эти параметры позволяют определить возможность и условия возникновения ППР. Частота колебаний поверхностного плазмона определяется соотношением значений диэлектрических постоянных осаждённой частицы и подложки. Условия плазмонного резонанса на отдельной сфере следующие: когда электромагнитная волна падает на частицу, она стимулирует электронное облако двигаться к поверхности частицы в направлении, противоположном направлению вектора напряжённости электрического поля  $E$ . Поскольку электроны пространственно ограничены внутри наночастицы, на одной из её сторон накапливается отрицательный заряд, а на противоположной – равный ему положительный. Возникающий диполь генерирует электрическое поле внутри частицы, которое стремится вернуть электроны в положение равновесия. Вектор напряжённости этого поля противоположен вектору  $E$ . Чем сильнее смещение электронов, тем больше восстанавливающая сила. Колебание электронов в этом случае предполагает передачу дополнительной энергии от поглощённого оптического излучения. При этом, чем ближе частота оптического излучения к собственной частоте плазмона, тем выше амплитуда колебаний и тем больше генерируется энергии.

Выполненные расчёты в мультифизической среде COMSOL 5.5 показали совпадение диапазона длин волн максимальной глубины поверхностного слоя и экстремумов на кривой потерь энергии от длины волны падающего света на наночастицу чистого серебра сферической формы, что говорит о вероятности возникновения плазмонных колебаний в диапазоне частот падающего света от 200 до 370 нм. Вследствие симметрии задачи, результаты моделирования представлены на рисунке 4 в виде одной четверти сферы, и демонстрируют регулярность дисперсии электрического поля вокруг наночастицы. Эта регулярность способствует возникновению резонансных явлений. Усиление может достигать сотен раз в ансамбле взаимодействующих наночастиц в результате локального усиления амплитуды поля.

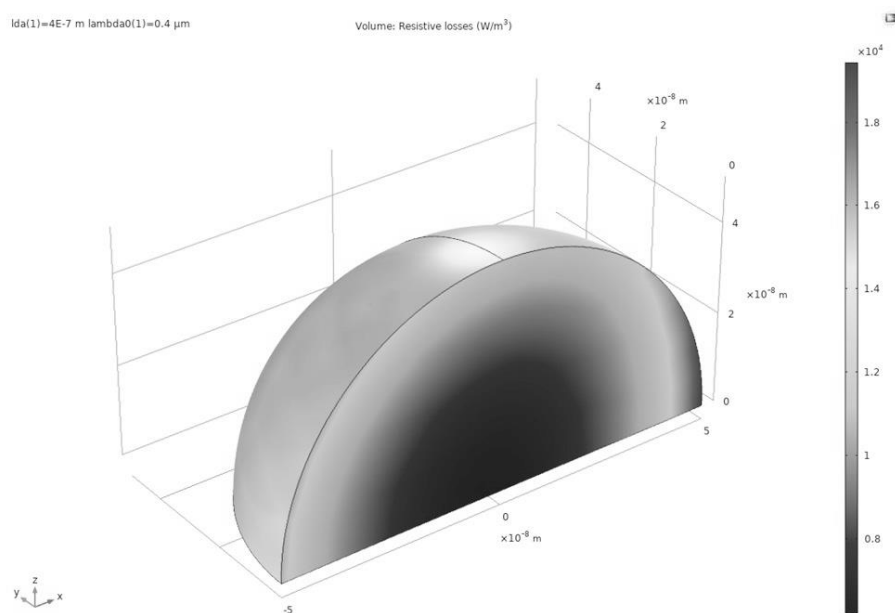


Рисунок 4 – Распределение рассеянной энергии вокруг наносферы чистого серебра размером 30 нм

Способность наночастиц к созданию ППР зависит от многих факторов, одним из которых является наличие даже небольшого количества примесных элементов. При этом примеси металлов могут оказывать влияние лишь на изменение основных резонансных частот, в то время как наличие преципитатов неметаллических элементов может снизить вероятность возникновения плазмонного резонанса.



Анализ элементного состава ФЭП показал, что основными неметаллическими диффузорами потенциально являются бор и фосфор. Их параметры, влияющие на диффузию, а также вероятный источник происхождения, указаны в таблице 1.

На основании вышеизложенных фактов можно сделать вывод, что наиболее вероятным примесным элементом следует считать бор (В).

Таблица 1 – Параметры потенциальных примесных элементов в серебре при  $T = 20^\circ \text{C}$

Диффузانت (его источник)	Коэффициент диффузии $K_D, \text{см}^2/\text{с}$	Атомный радиус, пм	Ковалентный радиус, пм
Фосфор (ортофосфорная кислота)	$6.8 \cdot 10^{-12}$	128	106
Бор (борная кислота)	$1.0 \cdot 10^{-10}$	90	82

Проведённые расчёты показателей преломления и комплексной диэлектрической проницаемости для различных концентраций бора в структуре плазмона позволили установить, что содержание в наночастице серебра примеси бора свыше 0,1 ат.% существенно меняет вид энергетического распределения (рисунок 5) и делает практически невозможным возникновение ППР.

Для подтверждения модельных расчётов были выполнены измерения вольт-амперных характеристик немодифицированных ФЭП, ФЭП с наночастицами серебра на приёмной поверхности, нанесёнными при помощи электрофоретического метода, а также ФЭП, выдержанных в коллоидном растворе серебра в течение 48 часов, результаты которых приведены на рисунке 6.

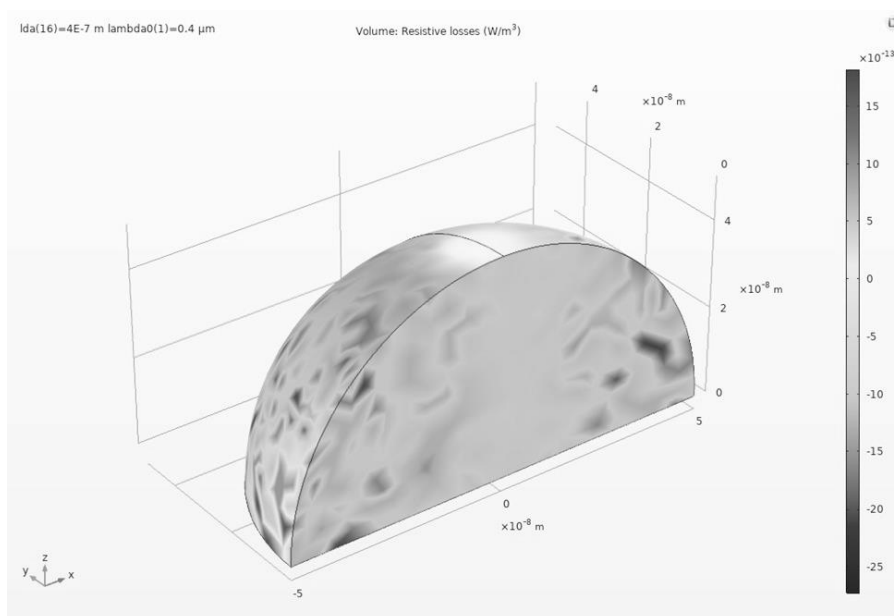


Рисунок 5 – Распределение рассеянной энергии вокруг наносферы серебра размером 30 нм с примесью бора

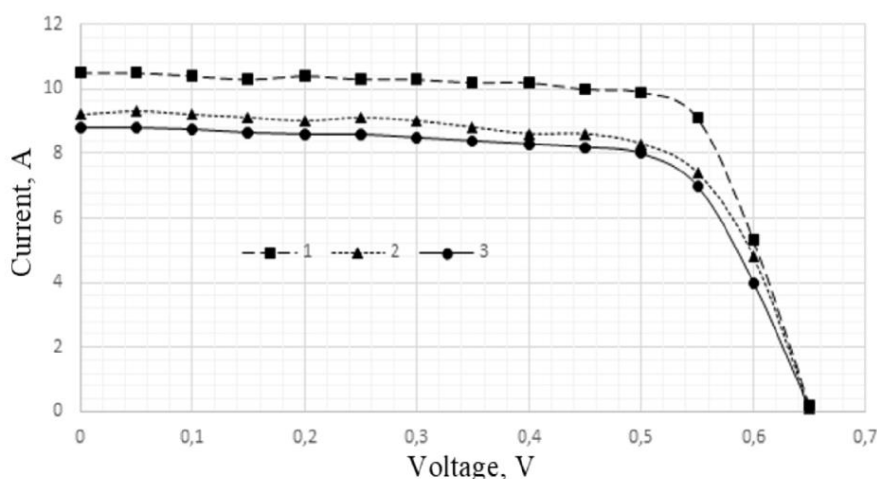


Рисунок 6 – Вольт–амперные характеристики фотоэлементов:  
 1 – с нанокластерным покрытием (электрофоретическое осаждение),  
 2 – с нанокластерным покрытием (выдержка в коллоидном растворе в течение 48 ч), 3 – без нанопокрyтия

Проведённая экспериментальная проверка показала, что осаждённые частицы, содержащие минимальное количество загрязняющих веществ, обеспечивают максимальное увеличение выработки энергии, обеспечиваемое плазмонными покрытиями (в среднем на 20% по сравнению с немодифицированными пластинами). При выдержке ФЭП в коллоидном

растворе происходит высвобождение примесей, диффундирующих в наночастицы Ag, что нивелирует эффективность нанесённого покрытия, поскольку выработка энергии ФЭП практически не отличаются от того уровня, что был до нанесения. Наиболее вероятной причиной этого является снижение роли ППР из-за загрязнения локальных зон неметаллическими примесями. Кроме того, агломерация наночастиц в более крупные кластеры со сложной конфигурацией возможна благодаря свойствам наночастиц «слипаться» на примесях, что также препятствует возникновению ППР.

## **Глава 5. Технологические рекомендации по применению и имплементация результатов исследований**

В главе сформулированы общие технологические рекомендации, предоставлена информация о возможностях применения результатов исследования. Разработаны следующие регламенты в алгоритмической форме проведения основных операций:

- приготовление коллоидного раствора серебра;
- измерение обратного рассеяния;
- измерение напряжения холостого хода;
- модификация поверхности ФЭП.

Результаты исследования внедрены для энергообеспечения медицинского оборудования в санаторно-курортном комплексе Крыма.

ООО «Энергоспецстрой» были установлены два фотоэлектрических модуля PSM 4 мощностью 135 W, собранных из модифицированных наносеребром ФЭП, в обслуживаемых этой организацией пансионатах. Конструктивно модуль представляет собой панель из последовательно соединённых 72 ФЭП из монокристаллического кремния.

Проведённые замеры в стандартных условиях тестирования (температура 25°C, интенсивность освещения 1000 Вт\*м<sup>2</sup>) показали величину тока 4,6 А и напряжение 34 В при максимальной мощности. Было сделано заключение, в

котором отмечено увеличение энергетической эффективности экспериментального модуля по сравнению с контрольным на 15,8%, предположительно – за счёт повышения КПД ФЭП.

## **ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

По итогам выполнения диссертационной работы сделано заключение о том, что поставленная цель достигнута, заявленные задачи решены. Основные общие выводы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Разработано и апробировано оригинальное исследовательское оборудование и соответствующие методики, предназначенные для проведения характеристики фотоэлектрических преобразователей в исходном состоянии и с покрытием, использующие обратное рассеяние лазерного излучения.

2. Создана оригинальная установка для электрофоретического осаждения нанокластерного покрытия из коллоидного раствора серебра на приёмную поверхность фотоэлектрических преобразователей. Предложена концептуальная модель механизма и определён рациональный режим формирования покрытия.

3. Для фотоэлектрических преобразователей с полученным нанокластерным покрытием было установлено наличие эффекта поверхностного плазмонного резонанса.

4. Испытания (лабораторные и натурные) модифицированных фотоэлектрических преобразователей показали увеличение в среднем в 3 раза значения коэффициента обратного рассеяния по сравнению с исходными, что наряду с наличием поверхностного плазмонного резонанса способствовало росту выработки ими электроэнергии в среднем на 20%. Кроме того, для модифицированных фотоэлектрических преобразователей установлено отсутствие зависимости выработки энергии от угла падения солнечного излучения.

5. Сформулированы условия и предложена феноменологическая модель, описывающая возможность возникновения явления поверхностного плазмонного резонанса по виду распределения интенсивности рассеянной

энергии в окрестностях поверхностной наночастицы. С использованием феноменологической модели показано, что на возникновение поверхностного плазмонного резонанса в системе фотоэлектрический преобразователь – наночастица Ag в области длин волн 270-370 нм существенное влияние оказывают неметаллические примеси. В частности, наличие преципитатов бора снижает вероятность поверхностного плазмонного резонанса и делает его практически невозможным при концентрациях примесей около 0,1 ат. %. Выполнена экспериментальная верификация проведённых модельных расчётов.

6. Сформулированы общие технологические рекомендации, представлена информация о возможностях применения результатов исследования. В алгоритмической форме разработаны регламенты проведения основных операций.

7. Результаты работы нашли применение в учебном процессе МАИ и совместно с ООО «Энергоспецстрой» внедрены для энергообеспечения медицинского оборудования в санаторно-курортном комплексе Крыма.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

1. Krit B.L., Fedotikova M.V., Sleptsov V.V., Kukushkin D.Yu., Gorozheev M.Yu., Kuvshinov V.V., Morozova N.V. Change of photoelectric elements power characteristics by silver nanoclusters modification of receiving surface // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – 1396. 012024. 10.1088/1742-6596/1396/1/012024 **(Scopus)**

2. Mogilnaya T.Yu., Krit B.L., Morozova N.V., Kuvshinov V.V., Sleptsov V.V., Fedotikova M.V., Vasiliev A.M., Diteleva A.O., Pagava L.L., Gorozheev M.Yu. Evaluation the Influence of Impurities on the Occurrence of a Local Surface Plasmon Resonance Effect // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2021. – 57. 567-571. 10.3103/S1068375521050094 **(Scopus)**

3. Mogilnaya T.Yu., Krit B.L., Morozova N.V., Kuvshinov V.V., Sleptsov V.V., Vasiliev A.M., Diteleva A.O., Fedotikova M.V., Pagava L.L., Gorozheev M.Yu. The effect of nonmetallic impurities on the occurring of the surface plasmon resonance

at the deposition of nanocluster coatings onto the surface of photo-electric converters  
// Optics Communications, 2021. – 494. 127065. 10.1016/j.optcom.2021.127065  
**(Scopus)**

4. Могильная Т.Ю., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Кувшинов В.В., Слепцов В.В., Федотикова М.В., Пагава Л.Л., Горожеев М.Ю. Оценка влияния примесей на достижение эффекта локального поверхностного плазмонного резонанса // Электронная обработка материалов, 2020. – № 56(6). – С. 67-72 **(ВАК)**

5. Крит Б.Л., Федотикова М.В., Могильная Т.Ю., Горожеев М.Ю., Петелин Н.А., Бабенков И.А., Пагава Л.Л., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Разработка методики контроля параметров фотоэлектрических преобразователей // Приборы, 2023. – № 2(272). – С. 42-46 **(ВАК)**

6. Исса Х. А., Абдали Л. М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В., Морозова Н. В., Федотикова М. В. Сравнение эффективности различных методов управления энергетическими параметрами фотоэлектрических систем // Труды МАИ, 2023. – № 128 (17). <https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17> **(ВАК)**