

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ХИМИИ РАСТВОРОВ**  
**им. Г.А. КРЕСТОВА**  
**РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

(ИХР РАН)

Академическая ул., д.1, Иваново, 153045  
Тел./факс (4932) 336259 / 336265  
E-mail: adm@isc-ras.ru, http://www.isc-ras.ru  
ОКПО 04740840, ОГРН 1023700546066  
ИНН/КПП 3730001757/370201001

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института химии  
растворов им. Г.А. Крестова  
Российской академии наук (ИХР РАН)

М.Г. Киселев

«21» ноября 2023г.

21.11.23 № 12206-360

## **ОТЗЫВ**

### **ведущей организации**

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук на диссертационную работу Федотиковой Марии Владимировны «Теоретические и прикладные аспекты повышения выработки энергии фотоэлектрическими преобразователями модификацией их поверхности нанокластерами серебра», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 «Порошковая металлургия и композиционные материалы»

Непрерывный рост цен на традиционные энергоносители и на электрическую энергию, получаемую, в основном, от сжигания ископаемого топлива, обуславливает необходимость разработки и развития альтернативных источников энергии. Одним из вариантов подобных источников энергии является солнечная энергетика. В настоящее время преобразование солнечной энергии в электрическую является одним из самых актуальных и перспективных направлений энергетики, а создание и совершенствование фотовольтаических энергоустановок является одной из приоритетных задач в обеспечении энергетической безопасности России.

Целью диссертационной работы Федотиковой М. В. является установление влияния параметров процесса электрофоретического

осаждения наночастиц серебра на эксплуатационные свойства кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа Федотиковой М.В. имеет логичную и законченную структуру повествования. Выводы соответствуют выполненным исследованиям и полученным результатам.

В работе описана теория, поясняющая увеличение выработки энергии ФЭП при наличии на их приёмной поверхности наночастиц металлов. Представлена феноменологическая модель, описывающая условия возникновения поверхностного плазмонного резонанса и влияние примесей на возникновение поверхностного плазмонного резонанса.

Выполнены экспериментальные исследования, доказывающие возможность формирования покрытия из наночастиц серебра на приёмной поверхности ФЭП электрофоретическим методом. Выполненное исследование адгезионной прочности показало удовлетворительную прочность сцепления покрытия и приёмной поверхности ФЭП.

Зафиксировано повышение выработки энергии ФЭП при наличии на его поверхности покрытия из наночастиц серебра, нанесённого электрофоретическим методом. Наличие эффекта поверхностного плазмонного резонанса подтверждено результатами тестирования модифицированных фотоэлектрических преобразователей в лабораториях «Нанотехнологии» и «Прикладная плазмоника» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Результаты работы были успешно внедрены для энергообеспечения медицинского оборудования в санаторно-курортном комплексе Крыма

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных учёных в данной области исследований.

### **Актуальность темы исследований**

Современные тенденции энергопотребления и скорость выработки природных ресурсов диктуют необходимость использования возобновляемых

источников энергии (ВИЭ). В настоящее время наиболее развитым и применяемым из всех ВИЭ является получение энергии посредством преобразования электромагнитного излучения, получаемого от Солнца. Недостатком солнечной энергетики, препятствующим её повсеместному распространению, является низкая эффективность фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), составляющая 15-20% от попадающего на их приёмную поверхность солнечного излучения.

В настоящее время существует значительное количество способов повышения данного показателя, однако наиболее перспективным является применение наноструктурированных функциональных покрытий, которые обеспечивают повышение выработки энергии без увеличения площади приёмной поверхности ФЭП за счёт наличия эффекта локального поверхностного плазмонного резонанса. Существующие способы нанесения таких покрытий не могут обеспечить одновременно высокую производительность, дискретность расположения наночастиц, минимальную трудоёмкость, отсутствие вероятности деформации подложки, приемлемую стоимость.

Таким образом, выбор темы представленной диссертационной работы Федотиковой М.В. является актуальным, а задачи, поставленные в работе и направленные на выявление возможности нанесения на приёмную поверхность ФЭП наноразмерных частиц Ag электрофоретическим методом, а также на исследование влияния покрытия, сформированного данным методом, на выработку энергии, имеют научную и практическую значимость.

### **Научная новизна исследования**

Научная новизна диссертационной работы Федотиковой М.В. заключается в следующем:

- доказана возможность формирования нанопокрyтия на приёмной поверхности фотоэлектрических преобразователей электрофоретическим методом, обеспечивающего повышение выработки энергии в среднем на 20%;

- сформулирована феноменологическая модель возникновения локального поверхностного плазмонного резонанса;
- рассчитана максимально допустимая концентрация неметаллической примеси (бора) в наночастице для сохранения условий возникновения поверхностного плазмонного резонанса – не более 0,1 ат. %;
- разработана методика тестирования на основе измерения коэффициента обратного рассеяния, позволяющая оценить качество приёмной поверхности ФЭП, а также подтвердить или опровергнуть возможность возникновения поверхностного плазмонного резонанса.

### **Практическая значимость полученных результатов в диссертации**

Практическая значимость работы не вызывает сомнений, поскольку на основании полученных в диссертационной работе Федотиковой М.В. результатов сформулированы общие технологические рекомендации и разработаны регламенты проведения основных операций в алгоритмической форме.

Результаты исследования могут быть применены для дальнейших теоретических и прикладных аспектов повышения выработки энергии ФЭП, а также при производстве различных фотоэлектрических устройств.

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

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных в работе результатов и выводов обеспечена использованием современной и проходящей периодическое тестирование аппаратуры, надежных и доказавших свою эффективность методик исследования, использованием методов, допускающих взаимопроверку результатов, а также согласием результатов экспериментов с надежными литературными данными в тех случаях, когда такое сопоставление возможно. Публикации прошли рецензирование в научных изданиях, входящих в международные библиографические базы данных.

Исследования в рамках диссертационной работы Федотиковой М.В. выполнены на высоком научном уровне, о чем свидетельствует публикация результатов в 22 научных работах, в том числе в 6 статьях в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций, из которых 3 статьи опубликованы в журналах, включённых в международные базы научного цитирования (Web of Science и Scopus) по научной специальности и соответствующей отрасли науки: 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки). Результаты работы представлялись автором на 11 научно-технических конференциях различного уровня. Автореферат и публикации полностью соответствуют содержанию диссертации.

Диссертация Федотиковой М.В. состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников литературы и двух приложений. Объем диссертации составляет 158 страниц, включая 97 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 172 наименований.

Диссертация написана грамотным литературным языком, материал изложен последовательно и логично.

Во **Введении** приводится краткий обзор состояния вопроса в мировой энергетике по возобновляемым источникам энергии, представлены актуальность темы исследования, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, апробация результатов, публикации.

В **первой главе** проведен анализ литературных данных, посвященных актуальным проблемам и тенденциям современной фотовольтаики. В частности, 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%.

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

Во **второй главе** диссертационного исследования Федотиковой М.В. описываются материалы, оборудование и методики исследования.

В **третьей главе** диссертации представлены теоретические и экспериментальные исследования модифицирования ФЭП электрофоретическим осаждением наночастиц Ag. Показаны 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. Представлена разработанная автором диссертации установка и результаты, полученные на основе оригинальной методики тестирования ФЭП, основанной на измерении коэффициента обратного рассеяния лазерного излучения. Характеризация ФЭП в исходном состоянии показала необходимость доработки технологических процессов изготовления ФЭП. Для ФЭП с покрытием наночастицами серебра было установлено наличие эффекта поверхностного плазмонного резонанса. На базе Севастопольского государственного университета были выполнены натурные испытания заводских ФЭП и ФЭП с модифицированной приёмной поверхностью, которые продемонстрировали эффективность применения покрытия из наночастиц серебра на приёмной поверхности ФЭП с точки зрения отсутствия зависимости выработки энергии от угла падения солнечного излучения.

**Четвертая глава** посвящена рассмотрению феноменологической модели распределения рассеянной энергии вокруг наночастицы, осаждённой на поверхности ФЭП. Сформулированы условия и предложена феноменологическая модель возникновения явления поверхностного плазменного резонанса, в соответствии с которой возможно описание распределения интенсивности рассеянной энергии в окрестностях поверхностной наночастицы. Предложена феноменологическая модель и проведены расчёты в мультифизической среде COMSOL 5.5 для определения вероятности возникновения поверхностного плазмонного резонанса (ППР) при наличии на приёмной поверхности фотоэлектрических преобразователей нанокластерных покрытий. С использованием феноменологической модели показано, что на возникновение ППР в системе ФЭП-наноAg в области длин волн 270-370 нм существенное влияние оказывают неметаллические примеси. В частности, наличие преципитатов бора снижает вероятность ППР и делает его практически невозможным при концентрациях примесей около 0,1 ат. %. Выполнена экспериментальная верификация проведённых модельных расчётов. Проведённая экспериментальная проверка показала полное соответствие расчётам по модели.

В **пятой главе** приведены технологические рекомендации по применению и имплементация результатов исследований, в которой разработаны и представлены типовые регламенты проведения отдельных основных операций электрофоретического осаждения на приёмной поверхности ФЭП нанокластерного покрытия, из полученного плазменно-искровым диспергированием коллоидного раствора серебра. Предоставлена информация о возможностях применения результатов исследования. Результаты внедрены для энергообеспечения медицинского оборудования в санаторно-курортном комплексе Крыма.

В разделе **Заключение** обобщены и сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе, также имеется информация по использованию результатов диссертации, которые и перспективах

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

### **Замечания по работе**

1. В материалах диссертации отсутствуют такие разделы как: степень разработанности темы, связь с плановыми исследованиями соответствующей отрасли науки и личный вклад автора.

2. Не совсем удачно сформулирована цель исследования. «...Установление влияния параметров процесса электрофоретического осаждения наночастиц серебра на эксплуатационные свойства кремниевых фотоэлектрических преобразователей» может являться одной из задач исследования. Тем более, что формулировка цели работы перекликается с п. 3 научных задач. Одним из вариантов цели работы мог бы быть: «Разработка научных и технологических основ методологии повышения выработки энергии кремниевыми фотоэлектрическими преобразователями энергии путем модификации их поверхности нанокластерами серебра».

3. В диссертации не приведены погрешности измеряемых величин (напряжений холостого хода, коэффициентов обратного рассеяния и др.), что затрудняет объективную оценку получаемых и расчетных величин.

4. В диссертационной работе несколько раз указывается на необходимость дискретного расположения наночастиц серебра, однако нет чёткого обоснования, почему использование сплошного покрытия нежелательно.

5. Автором кратко представлены режимы нанесения наночастиц на приёмную поверхность ФЭП методом электрофореза. Для более полного описания режимов нанесения стоило бы включить в диссертационную работу фотографии, сделанные при помощи растрового электронного микроскопа, отражающе результат различных режимов нанесения нанопокрyтия.



6. В диссертационной работе отсутствует обоснование, почему при представлении результатов измерения коэффициента обратного рассеяния представлен результат только для  $\lambda = 0,688$ .

7. Рисунки 80 и 81 не позволяют оценить результат проверки адгезионной прочности покрытия. Возможно, целесообразно было бы выделить определённую область и сделать РЭМ-изображения нанопокрyтия до и после проверки.

8. На рис. 79 приведена схема электрофореза. Однако, из этого рисунка и пояснений к нему непонятно, какой химический состав имеют: твёрдое тело, потенциалобразующий слой ионов, противоионы в адсорбционном слое, противоионы в диффузном слое, входящие в состав мицеллы? Отсутствие этой информации затрудняет восприятие разработанной авторами концептуальной модели, которая должна была облегчить понимание и конкретизировать суть процессов, происходящих при электрофоретическом осаждении наночастиц Ag из коллоидного раствора.

Высказанные замечания не затрагивают основных результатов работы и не ставят под сомнение обоснованность и достоверность сделанных выводов.

Представленные в диссертационной работе результаты и технические рекомендации могут быть использованы в организациях, занимающихся исследованиями и разработками в области полупроводниковых преобразователей солнечной энергии, а также в области использования плазмохимических процессов в материаловедении, а именно: в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технологический институт имени К.А. Валиева РАН Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (г. Москва), Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова (г. Москва), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых Российской академии наук (г. Нижний Новгород), Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский

государственный химико-технологический университет» (г. Иваново), ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова» (г. Ярославль), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт химии растворов им. Г. А. Крестова РАН» (г. Иваново), Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (г. Казань).

### **Специальность, которой соответствует диссертация.**

Работа соответствует паспорту специальности 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки) по областям исследования:

- п. 2. Исследование и моделирование физико-химических процессов получения полуфабрикатов и изделий из порошковых, композиционных материалов с металлической, углеродной, керамической матрицей и армирующими компонентами различной неорганической природы, разработка оборудования и технологий;
- п. 6. Разработка и совершенствование технологических процессов производства, контроля и сертификации полуфабрикатов и изделий различного назначения из порошковых и композиционных материалов, а также материалов и изделий с покрытиями и модифицированными слоями.

### **Заключение**

Диссертация Федотиковой Марии Владимировны «Теоретические и прикладные аспекты повышения выработки энергии фотоэлектрическими преобразователями модификацией их поверхности нанокластерами серебра», является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором экспериментальных и теоретических исследований изложены научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны, направленные на повышение выработки энергии ФЭП и

формирование покрытия из наночастиц серебра на приёмной поверхности ФЭП электрофоретическим методом.

Представленная диссертационная работа по научной новизне, актуальности, уровню и объёму проведенных исследований, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов удовлетворяет критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук в соответствии с п. п. 9-11, 13, 14 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции, а её автор, Федотикова Мария Владимировна, заслуживает присуждения искомой учёной степени по специальности: 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки).

Отзыв на диссертацию и автореферат обсуждён и одобрен на заседании расширенного научного семинара ИХР РАН и научно-исследовательского отдела 2 (Протокол №12 от 16 ноября 2023 г.).

Составитель отзыва:

Парфенюк Владимир Иванович  
доктор химических наук, профессор,  
научно-исследовательский отдел 2 ИХР РАН,  
главный научный сотрудник



« 21 » ноября 2023г


Адрес организации: 153045, г. Иваново, ул. Академическая, д. 1

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук

Электронный адрес: vip@isc-ras.ru

Телефон: +7 9109812623

Подпись Парфенюка Владимира Ивановича удостоверяю:

Учёный секретарь ИХР РАН  к.х.н. Иванов Константин Викторович

21 ноября 2023 года

