



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»

---

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»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Крит Борис Львович

Москва 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Актуальные проблемы и тенденции современной фотовольтаики .....	13
1.1 Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП).....	13
1.1.1 Принцип действия фотоэлектрических преобразователей.....	13
1.1.2 Основные характеристики фотоэлектрических преобразователей....	15
1.1.3 Эффективность фотоэлектрического преобразователя.....	19
1.1.4 Виды фозлектрических элементов .....	20
1.2 Предпосылки повышения выработки энергии ФЭП нанесением функциональных покрытий .....	24
1.2.1 Поверхностный плазмонный резонанс .....	28
1.2.2 Материалы наночастиц.....	33
1.2.3 Форма наночастиц.....	34
1.3 Способы нанесения наночастиц.....	36
1.4 Выводы и постановка задач исследования .....	41
2 Материалы, оборудование и методики исследования.....	43
2.1 Объекты исследования.....	43
2.1.1 Монокристаллические ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ».....	44
2.1.2 Монокристаллические ФЭП производства Allmejores Factory Store.	46
2.1.3 Поликристаллические ФЭП производства Allmejores Factory Store .	47
2.1.4 Аморфные ФЭП производства Lich Official Store .....	48
2.2 Коллоидный раствор серебра .....	49
2.2.1 Установка синтеза наночастиц металлов.....	49
2.2.2 Методика получения коллоидного раствора серебра электроимпульсным методом .....	51
2.2.3 Коллоидный раствор и строение мицеллы .....	53
2.3 Лабораторный стенд для фотоэлектрических испытаний.....	58
2.3.1 Цифровой мультиметр Fluke 17B+ .....	60
2.3.2 Люксметр цифровой eЛайт-мини.....	63
2.3.3 Галогенные лампы Uniel GU5.3.....	64
2.4 Установка и методика электрофоретического осаждения наночастиц серебра на приёмную поверхность ФЭП .....	65

2.5	Установка и методика измерения обратного рассеяния лазерного излучения.....	67
2.5.1	Математическая модель использования метода обратного рассеяния для характеристики ФЭП .....	68
2.5.2	Установка и методика измерения обратного рассеяния лазерного излучения .....	71
2.6	Выводы.....	75
3	Теоретические и экспериментальные исследования модифицирования ФЭП электрофоретическим осаждением наночастиц Ag.....	76
3.1	Характеризация ФЭП в исходном состоянии.....	76
3.1.1	Измерение напряжения холостого хода.....	78
3.1.2	Измерение площади ФЭП .....	84
3.1.3	Измерение обратного рассеяния лазерного излучения .....	89
3.2	Исследование процесса нанесения наночастиц серебра на поверхность ФЭП.....	95
3.3	Определение параметров модифицированных ФЭП.....	101
3.3.1	Измерение напряжения холостого хода.....	101
3.3.2	Измерение обратного рассеяния лазерного излучения .....	103
3.3.3	Адгезия покрытия.....	104
3.3.4	Натурные испытания.....	106
3.4	Выводы по главе .....	108
4	Феноменологическая модель распределения рассеянной энергии вокруг наночастицы, осаждённой на поверхности ФЭП .....	110
4.1	Условия для возникновения поверхностного плазмонного резонанса. ....	110
4.2	Влияние примесей на возникновение поверхностного плазмонного резонанса.....	120
4.3	Выводы по главе .....	128
5	Технологические рекомендации по применению и имплементация результатов исследований.....	129
5.1	Общие технологические рекомендации.....	129
5.2	Алгоритмы последовательности действий .....	129
5.2.1	Алгоритм приготовления коллоидного раствора серебра .....	129
5.2.2	Алгоритм измерения обратного рассеяния .....	130
5.2.3	Алгоритм измерения напряжения холостого хода .....	131
5.2.4	Алгоритм модификации поверхности ФЭП.....	132

5.3 Использование результатов диссертационной работы.....	133
5.4 Выводы по главе .....	133
Заключение .....	134
Список использованных источников .....	140
Приложения .....	156



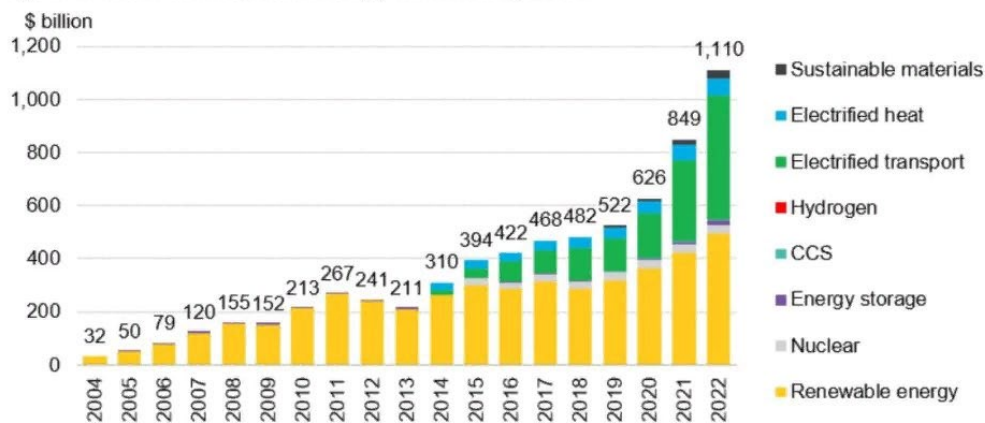
## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи со сложившейся тенденцией постоянного увеличения энергопотребления и изменением климатических условий, мировая общественность всё больше склоняется к необходимости перехода с энергии, получаемой традиционным методом (через сжигание топлива), на энергию, вырабатываемую возобновляемыми источниками энергии (далее – ВИЭ). В пользу данного решения говорят и аналитические показатели, согласно которым запасы минерального топлива (уголь, нефть, газ) и ядерного (в основном урана) могут быть исчерпаны к концу XXI века [1].

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 [2, 3].

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 (рисунок 1). Из них инвестиции в ВИЭ составили 495 млрд долларов, из которых большая часть приходится на солнечную энергетику, на втором месте – получение энергии при помощи ветра, что говорит о перспективности получения электроэнергии посредством преобразования солнечной радиации [4, 5].

Figure 1: Global investment in energy transition by sector



Source: BloombergNEF

Рисунок 1 – Глобальные инвестиции в энергетический переход

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 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% [6]. 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 каждый 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.

**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 (далее – БГУИР).

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 ФЭП, основанная на измерении коэффициента обратного рассеяния лазерного излучения.

### **Теоретическая и практическая значимость**

1. Установлено, что модифицирование поверхности фотоэлементов 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 освещены в 22 научных работах, из них 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК и 3 в журналах, включённых в международные системы цитирования.

### **Структура и объем диссертации**

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



# 1 Актуальные проблемы и тенденции современной фотовольтаики

## 1.1 Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП)

### 1.1.1 Принцип действия фотоэлектрических преобразователей

Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) – полупроводниковое устройство, прямопреобразующее солнечную энергию в постоянный электрический ток. Преобразование энергии в ФЭП основано на фотоэлектрическом эффекте, который возникает в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения [7].

ФЭП состоит из основания (подложки), полупроводников р- и n-типов, которые, в свою очередь, образуют р-n-переход, лицевых контактов – токосъёмной системы, расположенной поверх n-полупроводника, антиотражающего покрытия (рисунок 2) [8].

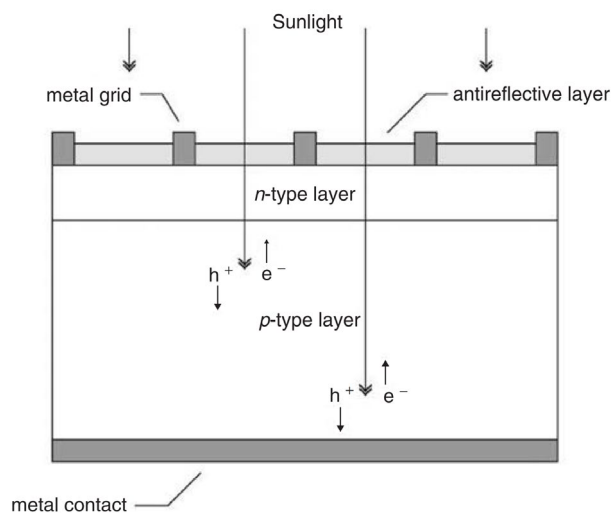


Рисунок 2 – Структурная схема ФЭП

Принцип действия ФЭП основан на р-n-переходе, образованном кремнием n-типа и р-типа, в которых основными носителями заряда являются избыточные электроны и дырки, соответственно (рисунок 3) [9]: при

соприкосновении двух видов кремния некоторые из свободных электронов n-типа мигрируют в область p-типа и заполняют имеющиеся вблизи соприкосновения двух видов кремния дыры, что формирует так называемую область истощения, которая не содержит свободных электронов и дырок. В результате миграции граница n-типа становится положительно заряженной, а p-типа – отрицательно заряженной, между ними образуется электрическое поле поперёк перехода, которое будет обеспечивать движение электронов только в одном направлении: из p-типа в n-тип (рисунок 4) [10-15].

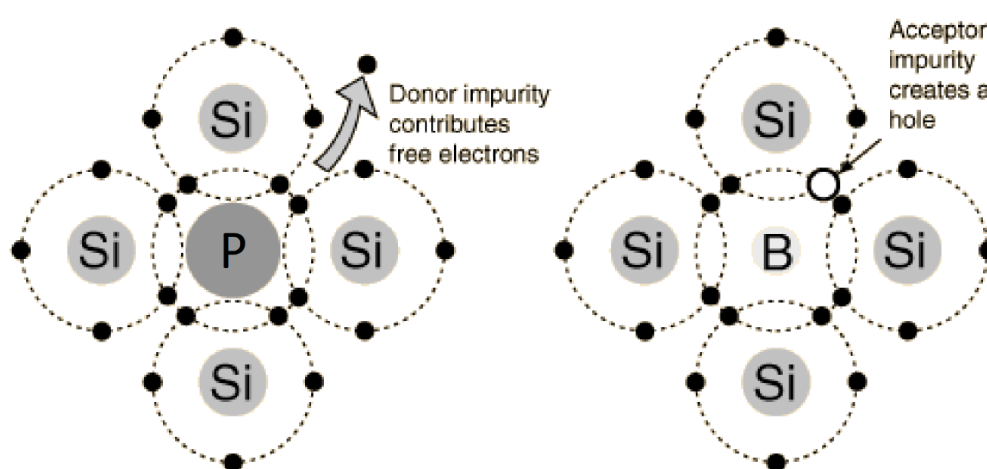


Рисунок 3 – Кремний n- и p-типов

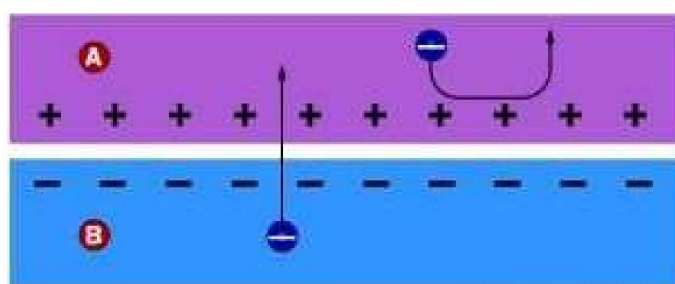


Рисунок 4 – Влияние внутреннего электрического поля ФЭП на движение электронов и дырок: А – кремний n-типа; В – кремний p-типа

При воздействии солнечного излучения на приёмную поверхность ФЭП, если энергия фотонов света превышает ширину запрещённой зоны полупроводника  $E_{\phi} \geq E_g$  (рисунок 5, уравнение (9) – описание  $E_{\phi}$ ), электроны перемещаются из валентной зоны в зону проводимости, создавая таким образом электронно-дырочные пары. Любая пара, образованная во внутреннем электрическом поле или вблизи него, разделяется, при этом электроны текут в

одном направлении, а дырки – в другом, создавая постоянный ток (рисунок 6) [14].

$$E_{\phi} = h \cdot \nu, \quad (1)$$

где  $E_{\phi}$  – энергия фотона;  $h$  – постоянная Планка ( $6,63 \times 10^{-34}$ );  
 $\nu$  – частота электромагнитного излучения (солнечного света).



Рисунок 5 – Зонное строение полупроводника

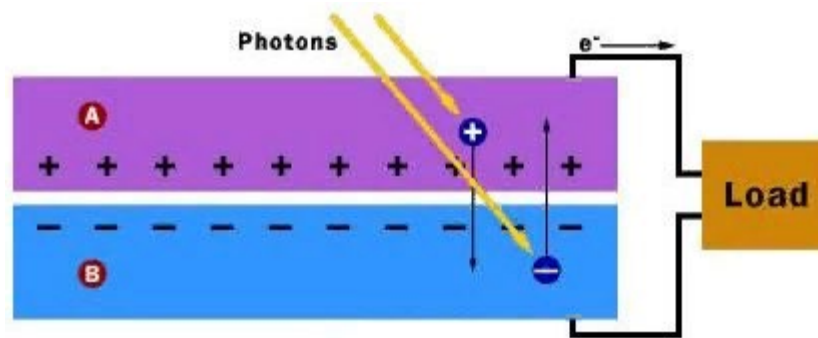


Рисунок 6 – Схема работы ФЭП: А – кремний n-типа; В – кремний p-типа

### 1.1.2 Основные характеристики фотоэлектрических преобразователей

Основными характеристиками ФЭП являются [16, 17]:

- напряжение холостого хода;
- ток короткого замыкания;
- коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики;
- коэффициент полезного действия.

Напряжение холостого хода  $V_{oc}$  (open circuit) – это максимальное напряжение, создаваемое солнечным элементом, возникающее при нулевом токе (рисунок 7). Оно равно прямому смещению, соответствующему изменению напряжения p-n-перехода при появлении светового тока (в зависимости от освещённости и качества ФЭП).



Рисунок 7 – Вольт-амперная характеристика солнечного элемента и напряжение холостого хода

Ток короткого замыкания  $I_{sc}$  (short circuit, I) – это ток, протекающий через ФЭП, когда напряжение равно нулю (рисунок 8). Он возникает в результате генерации и разделения сгенерированных светом носителей. В идеальном солнечном элементе при условии умеренных резистивных потерь он равен световому току. Поэтому ток короткого замыкания можно считать максимальным током, который способен создать солнечный элемент. Кроме того, он прямо пропорционально зависит от интенсивности света.

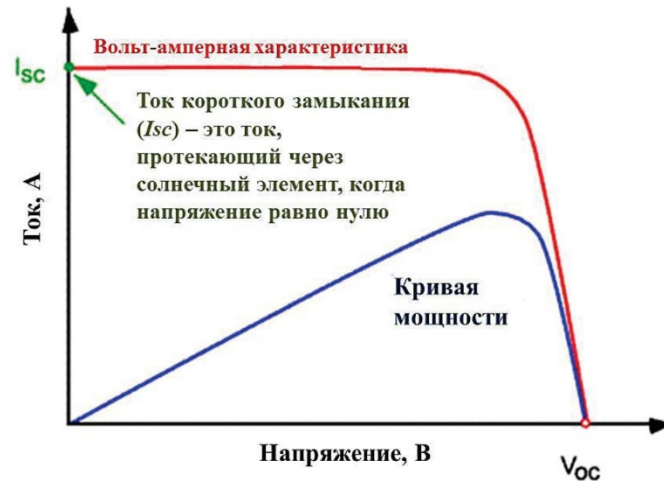


Рисунок 8 – Вольт-амперная характеристика солнечного элемента и ток короткого замыкания

На практике солнечный элемент работает при комбинации тока и напряжения, когда вырабатывается достаточная мощность. Лучшее их сочетание называется точкой максимальной мощности (далее – ТММ), соответствующие напряжение и ток обозначаются  $U_{ТММ}$  и  $I_{ТММ}$ .

Коэффициент заполнения вольт-амперной характеристики (далее – ВАХ) солнечного элемента FF (fill factor) – параметр, который в сочетании с напряжением холостого хода и током короткого замыкания определяет максимальную мощность солнечного элемента. Он вычисляется, как отношение максимальной мощности солнечного элемента к произведению напряжения холостого хода и тока короткого замыкания:

$$FF = \frac{(U_{ТММ} \cdot I_{ТММ})}{(I_{sc} \cdot V_{oc})}, \quad (2)$$

где  $U_{ТММ}$  – напряжение в ТММ, В;  $I_{ТММ}$  – ток в ТММ, А;  $V_{oc}$  – напряжение холостого хода, В;  $I_{sc}$  – ток короткого замыкания, А.

Максимальная мощность, снимаемая с единицы площади солнечного элемента, вычисляется по формуле:

$$P_{max} = U_{ТММ} \cdot I_{ТММ} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}. \quad (3)$$

Графически коэффициент заполнения представляет собой меру квадратичности солнечного элемента и равен максимальной площади

прямоугольника, который можно вписать в вольт-амперную кривую (рисунок 9).

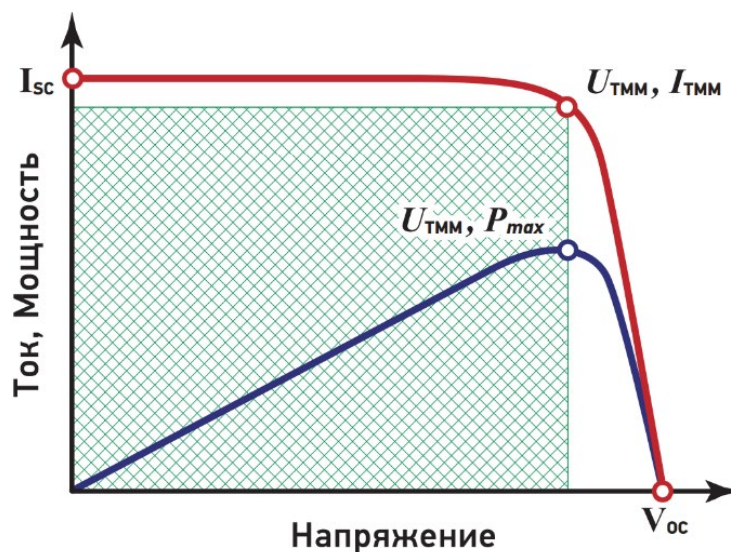


Рисунок 9 – Графическое представление коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента

Так как коэффициент заполнения является мерой квадратичности вольт-амперной кривой, солнечный элемент с более высоким напряжением будет иметь и более высокий возможный коэффициент заполнения, поскольку закруглённая часть кривой занимает меньше места.

Коэффициент заполнения ВАХ является одним из основных параметров, по которому можно судить о качестве фотоэлектрического преобразователя. Типичные качественные серийно выпускаемые солнечные элементы имеют коэффициент заполнения ВАХ более 0,7. Бракованные элементы имеют коэффициент заполнения ВАХ от 0,4 до 0,65. У аморфных элементов и других тонкопленочных фотоэлектрических преобразователей коэффициент заполнения ВАХ 0,4–0,7. Чем больше коэффициент заполнения ВАХ, тем меньше потери в элементе из-за внутреннего сопротивления.

График на рисунке 10 иллюстрирует ВАХ элементов с различным коэффициентом заполнения. Как видно, обе кривые имеют одинаковые значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, однако элемент с меньшим коэффициентом заполнения ВАХ (нижний график) вырабатывает меньше мощности в ТММ.

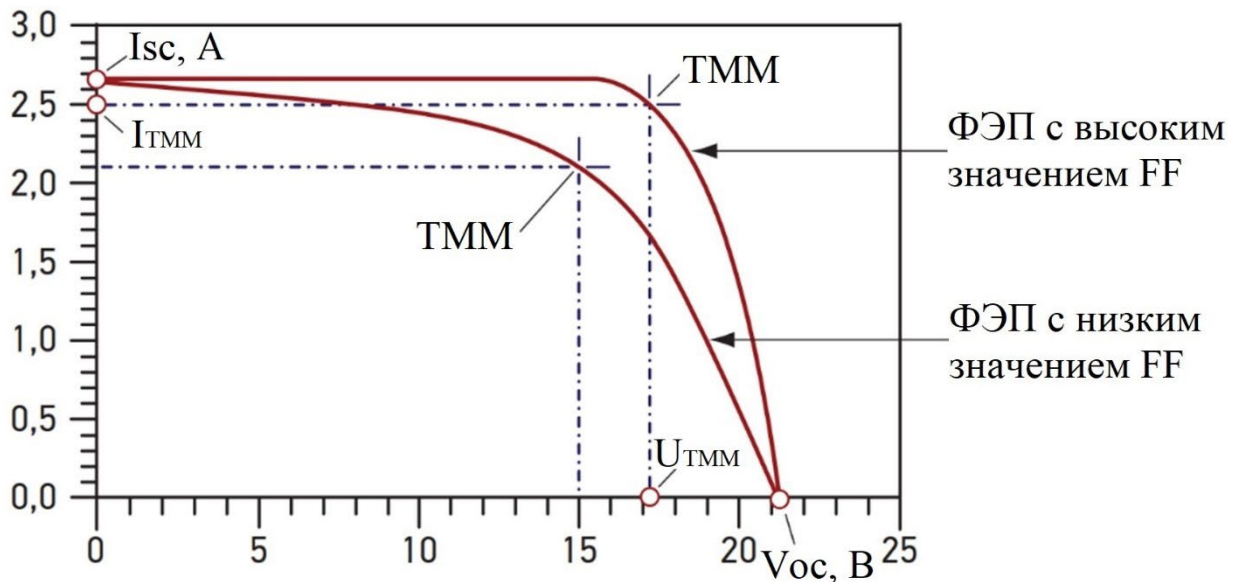


Рисунок 10 –ВАХ ФЭП с различным коэффициентом заполнения

Коэффициент полезного действия КПД – является самым распространённым параметром, по которому можно сравнить производительность двух солнечных элементов. Он определяется как отношение мощности, вырабатываемой солнечным элементом, к мощности падающего солнечного излучения. Кроме собственно производительности солнечного элемента, КПД также зависит от спектра и интенсивности падающего солнечного излучения и температуры солнечного элемента. КПД солнечного элемента определяется как часть падающей энергии, преобразованной в электричество:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{пад}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $P_{max}$  – максимальная мощность солнечного элемента, Вт (уравнение (11));  $P_{пад}$  – мощность падающего солнечного излучения, Вт.

### 1.1.3 Эффективность фотоэлектрического преобразователя

Коэффициент полезного действия (КПД) фотоэлектрических преобразователей составляет лишь малую часть от теоретически возможных показателей. Расчётный КПД доходит до 80-87 %, однако изъяны технологии, недостаточная чистота материалов и неточность сборки элементов

существенно снижают эти значения. Из излучения, падающего на ФЭП, только ~20 % солнечной энергии преобразуется в электричество. Также потери энергии в фотоэлектрических преобразователях связаны с [18-22]:

- отражением солнечного излучения от поверхности преобразователя;
- прохождением части излучения через ФЭП без поглощения в нем;
- поглощение излучения только определённого спектра (определённых длин волн);
- рассеянием на тепловых колебаниях решётки избыточной энергии фотонов;
- рекомбинацией образовавшихся фото-пар на поверхностях и в объёме ФЭП;
- электрическим сопротивлением ФЭП;
- другими физическими процессами.

#### **1.1.4 Виды фотоэлектрических элементов**

Существует значительное количество видов фотоэлектрических элементов, различающихся по типу фотоэлектрического слоя и КПД [23]:

1) фотоэлементы на основе кремния:

- кристаллический – до 24,7%;
- поликристаллический – до 18%;
- аморфный (тонкоплёночный) – до 9,5%;
- нанокристаллический – до 10,1%;

2) фотоэлементы на основе арсенида галлия GaAs и фосфида индия InP:

- GaAs кристаллический – до 25,1%;
- GaAs тонкоплёночный – до 24,5%;
- GaAs поликристаллический – до 18,2%;
- InP кристаллический – до 21,9%;



3) фотоэлементы изготовленные по CIGS технологии:

–  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  – до 19,9%;

–  $\text{CdTe}$  – до 16,5%;

4) фотоэлементы, изготовленные по принципу слоистых структур

–  $\text{GaInP - GaAs - Ge}$ , до 32,0%;

–  $\text{GaInP - GaAs}$ , до 30,3%;

–  $\text{GaAs - CuInSe}_2$ , до 25,8%;

– аморфный  $\text{Si}$  - монокристаллический  $\text{Si}$ , до 11,7%;

5) фотоэлементы на основе органических материалов

– органические красители, до 10,4%;

– полимеры, до 5,15%.

В фотоэлектрических энергетических установках можно использовать любой из указанных типов ФЭП, однако не все они удовлетворяют комплексу требований к таким системам [20]:

– высокая доступность сырья и возможность организации массового производства;

– приемлемые с точки зрения сроков окупаемости затрат на создание системы преобразования;

– высокая надёжность при длительном ресурсе работы;

– удобство техобслуживания.

В настоящее время в наибольшей степени удовлетворяют указанным требованиям только фотоэлементы на основе кремния, так как ФЭП на основе  $\text{GaAs}$ , несмотря на самый высокий показатель КПД, отличаются дороговизной производства и дефицитом материала, что препятствует их массовому производству и применению [24].

Далее будут рассмотрены монокристаллические, поликристаллические и аморфные ФЭП на основе кремния, как наиболее удовлетворяющие вышеуказанным требованиям.

Нанокристаллические ФЭП на основе кремния к рассмотрению не принимались, так как в настоящее время не применяются в массовом производстве.

#### **1.1.4.1 Монокристаллические кремниевые ФЭП**

Монокристаллические кремниевые ФЭП сделаны из единого кристалла чистого кремния. Производители для формирования слитка используют метод Чохральского для постепенного выращивания кристалла кремния из расплава. В качестве «затравки» используется маленький кристалл чистого кремния. По мере роста кристалла вокруг «затравки», его температура кремния постепенно падает, тем самым формируется кристалл чистого кремния цилиндрической формы. Монокристаллические модули можно отличить по их однородному цвету и структуре, что является признаком высокочистого кремния [25-27].

Преимущества:

- имеют самый высокий КПД из кремниевых ФЭП – от 15 до 24,7 %;
- занимают меньше места (за счёт высокого КПД);
- долговечность – большинство производителей предоставляет как минимум 25 лет гарантии на такие панели, кроме того, «стареет» в монокристаллической панели не сам кремний, а то, что его окружает – покрытия, плёнки, контакты и т.д. Сам монокристалл обладает стабильными характеристиками в течение практически всего срока службы;

- потеря эффективности ~ 1 % в год;

- окупаемость – 2 года.

Недостатки:

- относительная дороговизна;

- потребность в прямых солнечных лучах;

- высокий температурный коэффициент (стандартная температура работы ФЭП – 25°C, при превышении этого показателя происходит снижение номинальной мощности на 15-20 %);

– чувствительность к загрязнению – пыль рассеивает свет, поэтому у покрытых ею солнечных панелей резко снижается КПД.

#### **1.1.4.2 Поликристаллические кремниевые ФЭП**

Поликристаллические кремниевые ФЭП состоят из множества кристаллов. Вместо медленного и очень дорогого процесса выращивания единого кристалла, как у монокристаллических ФЭП, производители просто опускают кристаллическую «затравку» в ванну с расплавленным кремнием и дают ему остыть. При этом формируются разнонаправленные кристаллы, они небольшие и их много. Из такого большого кристалла нарезаются прямоугольные слитки, а потом из них – пластины. Отсюда и название – мульткристаллические (или поликристаллические, что одно и то же) солнечные элементы [25-27].

Преимущества:

- КПД – от 12 до 18 %;
- срок службы – не менее 25 лет;
- потеря эффективности ~ 1 % в год;
- окупаемость – 2-3 года;
- дешевле монокристаллических, т.к. процесс выращивания поликремния гораздо проще и менее энергоёмкий;
- меньше подвержены влиянию температуры, чем монокристаллические ФЭП;
- меньшая зависимость от затенённости, чем у монокристаллических ФЭП.

Недостатки:

- требуется большая площадь для генерации одинакового с монокристаллическими ФЭП количества энергии;

– высокий температурный коэффициент (стандартная температура работы ФЭП – 25°C, при превышении этого показателя происходит снижение номинальной мощности на 15-20 %).

### **1.1.4.3 Аморфные кремниевые ФЭП**

При производстве аморфных ФЭП используется не чистый кремний, а его гидрид, горячие пары которого осаждаются на подложку. В результате такой технологии классические кристаллы не образуются, а образуется слой кремния, который можно закрепить как на жёсткой, так и на гибкой подложке [25-27].

Преимущества:

- дешевизна;
- универсальность – возможность изготовления гибких и тонких панелей, монтаж батарей на любые архитектурные формы;
- меньшее падение КПД при рассеянном свете, запылённости поверхности и высоких температурах, чем у кристаллических аналогов.

Недостатки:

- КПД – от 6 до 9,5 %
- срок службы – от 10 до 20 лет;
- потеря эффективности ~ 2-3 % в год;
- требуется значительная площадь;
- окупаемость – 6-7 лет.

## **1.2 Предпосылки повышения выработки энергии ФЭП нанесением функциональных покрытий**

Для повышения выработки энергии ФЭП применяются следующие способы [20]:

- ориентирование солнечных панелей по Солнцу;

- использование концентраторов солнечного излучения;
- создание текстурированной фронтальной поверхности;
- использование полупроводников с оптимальной для солнечного излучения шириной запрещённой зоны;
- направленное улучшение свойств полупроводниковой структуры путём её оптимального легирования и создания встроенных электрических полей;
- переход от гомогенных к гетерогенным и варизонным полупроводниковым структурам;
- оптимизация конструктивных параметров ФЭП (глубины залегания р-п-перехода, толщины базового слоя, частоты контактной сетки и др.);
- применение функциональных оптических покрытий, обеспечивающих просветление, терморегулирование и/или защиту ФЭП от космической радиации;
- разработка ФЭП, прозрачных в длинноволновой области солнечного спектра за краем основной полосы поглощения;
- создание каскадных ФЭП из специально подобранных по ширине запрещённой зоны полупроводников, позволяющих преобразовывать в каждом каскаде излучение, прошедшее через предыдущий каскад;
- создание преобразователей с двухсторонней чувствительностью;
- применения люминесцентно переизлучающих структур;
- предварительное разложение солнечного спектра на две или более спектральные области с помощью многослойных плёночных светоделителей (дихроичных зеркал) с последующим преобразованием каждого участка спектра отдельным ФЭП.

Наиболее перспективным решением представляется применение функциональных покрытий, так как их внедрение в производственный процесс требует минимального изменения жизненного цикла изготовления ФЭП, не требует модификации конструкции ФЭП и увеличения площади

приёмной поверхности, при этом получаемый эффект – один из лучших среди способов повышения эффективности работы фотоэлектрического элемента.

Наиболее широкое применение получили покрытия на основе: нитрида кремния ( $\text{SiN}_x$ ), оксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ), диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ), диоксида олова ( $\text{SnO}_2$ ), сульфида цинка ( $\text{ZnS}$ ), оксида цинка ( $\text{ZnO}$ ), оксида индия ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) [28-38]. Их основная задача – уменьшение отражения падающего света за счёт уменьшения показателя преломления (как правило, полированная поверхность кремния отражает более 35% падающего света [39, 40]). И хотя теоретический КПД ФЭП с такими покрытиями превышает 90 %, реальное значение КПД ФЭП без покрытия увеличивается всего на 2-3 % [40].

В процессе анализа информации были обнаружены исследования, направленные на повышение выработки энергии ФЭП посредством применения функциональных покрытий из наночастиц металлов: покрытие из металлических наноструктур (отдельных наночастиц или решёток) создаёт условия возникновения поверхностного плазмонного резонанса (далее – ППР), который обеспечивает перенаправление и концентрирование электромагнитного излучения вблизи вещества, позволяющего генерировать электронно-дырочные пары и создавать электрический ток (рисунок 11) [41].

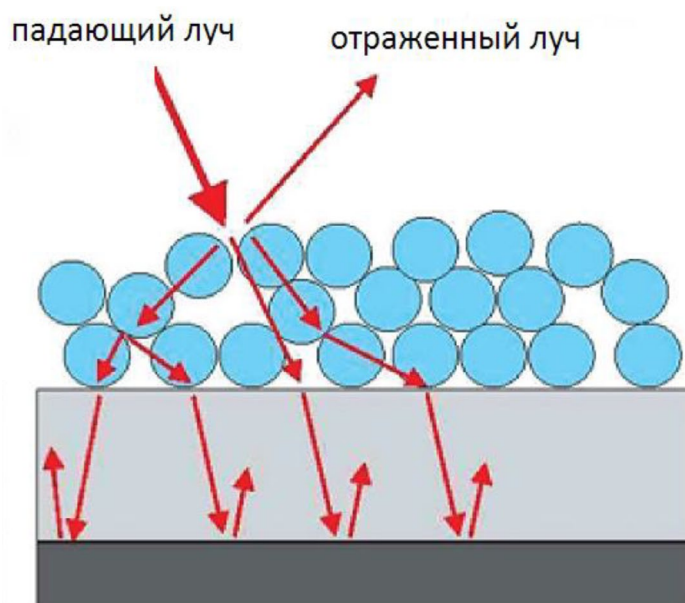


Рисунок 11 – Диффузное отражение от поглощающего слоя, покрытого неупорядоченным набором наносфер

Теоретические и практические исследования в данной области были начаты в 1998 г.: Н. R. Stuart и D. G. Hall показали, что возможно увеличение фототока до 18 раз для фотоприёмника с кремнием на изоляторе толщиной 165 нм при длине волны 800 нм с использованием наночастиц серебра на поверхности [42]. Использование наночастиц золота на тонкоплёночных солнечных элементах из аморфного кремния позволило достичь повышения эффективности преобразования на 8% [43]. Термическое осаждение частиц серебра на планарные солнечные элементы привело к общему увеличению фототока на 19% [44].

Структуры из наночастиц использовались, по меньшей мере, в трех различных конфигурациях (рисунок 12,12): на поверхности элемента (рисунок 12,а) [45-47], внедрённые в активный полупроводниковый слой (рисунок 12,б) [48-51] или на нижней границе раздела между полупроводником и металлом (рисунок 12,с) в виде отдельных наночастиц [52-55] или решёток [62-66]. В описанных схемах повышение эффективности работы элемента происходит за счёт различных физических принципов. В конфигурациях (а) и (с1) свет рассеивается и захватывается полупроводниковыми слоями за счёт многократного и высокоуглового рассеяния, что приводит к увеличению эффективной длины оптического пути внутри элемента. В конфигурации (б) сильная локализация и усиление ближнего поля вблизи частиц приводит к созданию дополнительных электронно-дырочных пар внутри полупроводника. В конфигурации (с2) наночастицы внедрены очень близко к задней поверхности ФЭП, что приводит к изменению направления света так, что оно становится параллельным, а не перпендикулярным задней поверхности.

В большинстве экспериментальных работ основное внимание уделяется использованию наночастиц на поверхности ФЭП (рисунок 12,а) солнечных элементов [45-47, 56-61] из-за проблем изготовления.

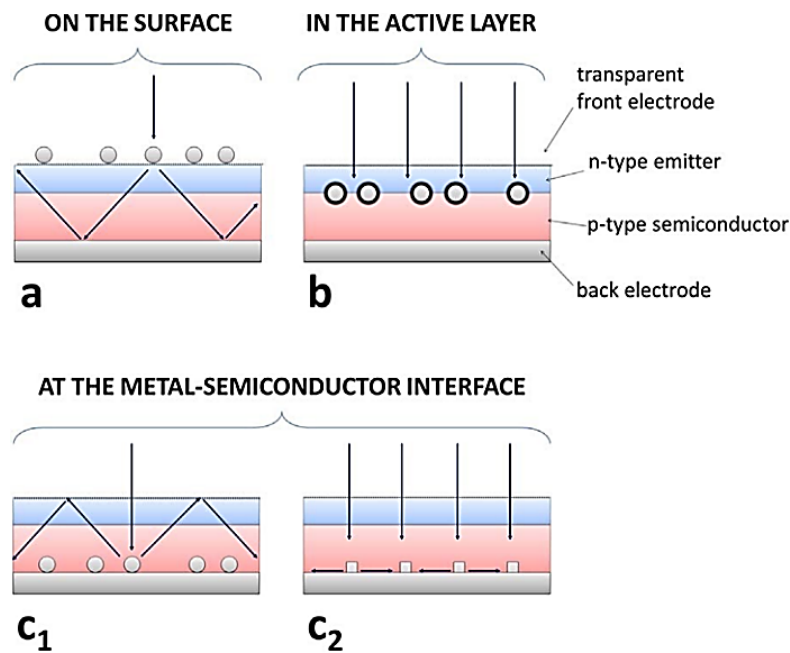


Рисунок 12 – Конфигурации плазмонного захвата света для тонкопленочных солнечных элементов: а – металлические наночастицы на поверхности ФЭП; б – металлические наночастицы, внедрённые в полупроводник близко к р-п-переходу; в – отдельные наночастицы или наноструктура в виде решётки на границе раздела металл-полупроводник, расположенные вблизи нижней части ФЭП

Таким образом, применение наноструктур позволяет увеличить выработку энергии ФЭП значительно больше, чем применение «сплошных» покрытий из других материалов.

Однако, в процессе анализа информации было выявлено, что исследования в области применения плазмонных наночастиц направлено в основном на создание новых тонкоплёночных ФЭП, а не на повышение выработки энергии существующих и массово выпускаемых ФЭП.

В связи с вышесказанным, нами было принято решение об использовании явления ППР в качестве способа повышения выработки энергии существующих и массово выпускаемых ФЭП.

### 1.2.1 Поверхностный плазмонный резонанс

Наночастицы металлов имеют электроны высокой подвижности. При попадании на такую наночастицу внешнего электромагнитного поля, длина волны которого больше размера наночастицы, происходит смещение этих



электронов относительно ядра, в результате чего возникает большой электрический диполь. Одновременно с этим явлением возникает восстанавливающая сила из-за кулоновского притяжения между электронами и ядрами. Силы инерции не позволяют электронам зафиксировать положение равновесия, они «проскакивают» ядро и оказываются с противоположной стороны. В результате постоянного перемещения электронов относительно ядра возникают резонансные колебания на определённой частоте, получившие название поверхностного плазмонного резонанса (рисунок 13) [67-69].

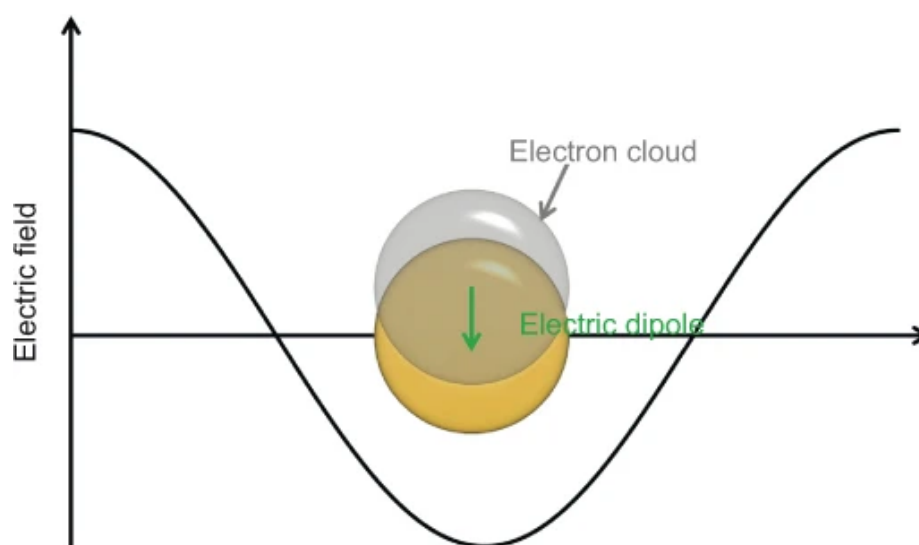


Рисунок 13 – Схематическое изображение возбуждения ППР для металлической наносферы

Поперечное сечение поглощения ППР в несколько раз превышает физическое поперечное сечение. Как показано на рисунке 13, ППР индуцирует большой электрический диполь, который колеблется с той же частотой, что и электрическое поле падающего света. Этот электрический диполь может создавать интенсивное электрическое поле вблизи наночастицы, интенсивность которого может в десятки и тысячи раз превышать интенсивность падающего света. Это так называемое явление усиления ближнего поля. Из-за физического происхождения усиления ближнего поля оно быстро затухает при удалении от наночастицы и, таким образом, ограничено самой близостью к наночастице [70-73]. Эти явления обеспечивают передачу энергии от наночастицы к ФЭП.

Генерация горячих электронов происходит в результате одного из двух процессов: излучательного или безизлучательного энергетического перехода [74]. Второй способ подразумевает отсутствие поглощения и излучения электромагнитного излучения и происходит за счёт электрон-электронного рассеяния, что приводит к внутри- и межзонному возбуждению свободных электронов (электронов проводимости) (рисунок 14, а, справа). Внутри- и межполосный переход требует энергетического перекрытия между частотой ППР и энергией перехода. Энергии горячих электронов имеют широкий диапазон распределения (рисунок 14, b). Для наночастиц серебра энергия горячих электронов составляет приблизительно от 1 эВ до 4 эВ. Такие электроны могут мигрировать в соседний полупроводник, если их энергия больше, чем барьер Шоттки на границе раздела между металлом и полупроводником (рисунок 14, c). Кроме того, хотя энергии некоторых горячих электронов недостаточно велики, чтобы преодолеть барьер Шоттки, они также могут инжектироваться в полупроводник за счёт эффекта туннелирования [75-85].

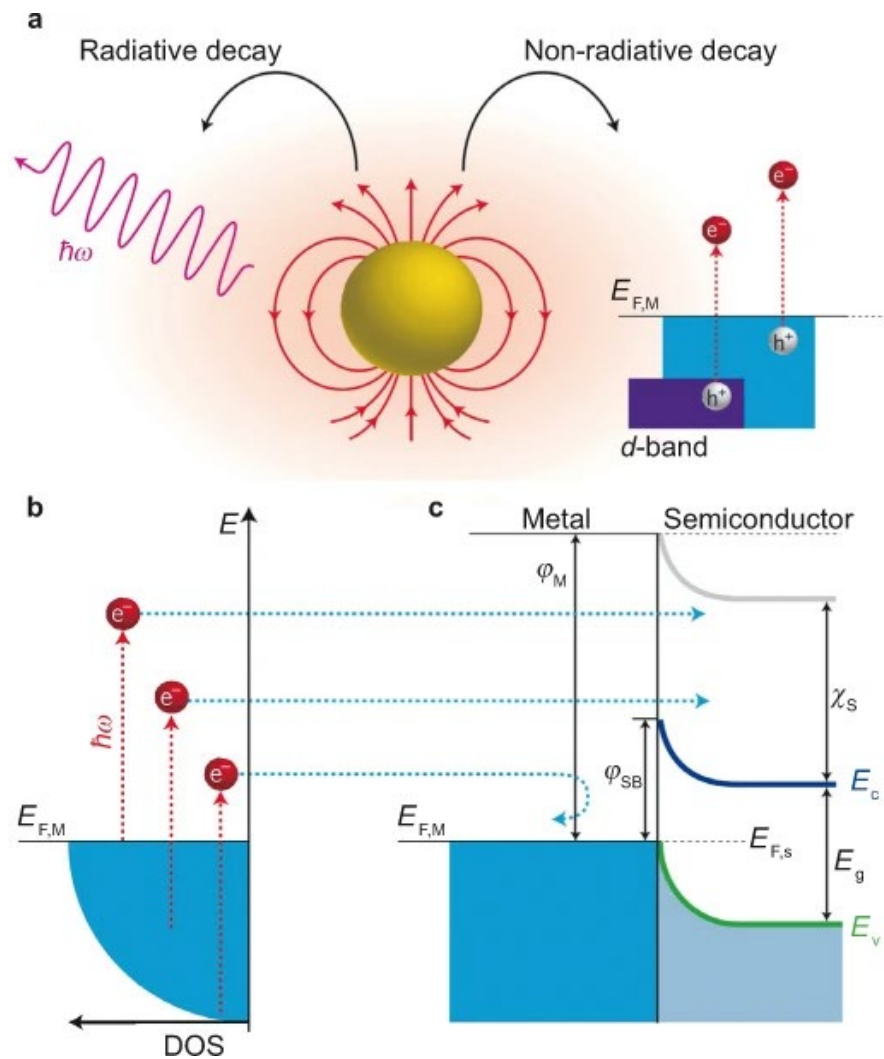


Рисунок 14 – Межзонные переходы: а – излучательный и безызлучательный энергетические переходы (при излучательном испускаются фотоны, при безызлучательном - горячие электроны могут генерироваться посредством внутри- и межзонного возбуждения электронов проводимости); б – энергии горячих электронов имеют широкий диапазон распределения; с – горячие электроны с большой энергией могут преодолевать межфазный барьер Шоттки, попадая таким образом в зону проводимости полупроводника

Существует две теории, поясняющие увеличение выработки энергии ФЭП при наличии наночастиц металлов на приёмной поверхности ФЭП [73, 86-88].

1. Индуцированное плазмонами ближнее поле может во много раз превышать интенсивность падающего света. Таким образом, ближнее поле может значительно усилить межзонные или другие оптические переходы в соседнем полупроводнике, если спектры ППР перекрываются с ними. Полное

усиление поглощения света ( $FE$ ) можно оценить, используя следующее уравнение:

$$FE = \frac{\int_V dz \int dx dy |E(x, y, z)|^2}{\int_V dz \int dx dy |E_0|^2}, \quad (5)$$

где  $V$  – интегрирующий объем, относящийся к объему в полупроводнике, покрытому ближним полем;  $E(x, y, z)$  – значение ближнего поля в точке  $(x, y, z)$ , а  $E_0$  – электрическое поле падающей электромагнитной волны.

2. ППР генерирует электронно-дырочные пары в полупроводнике путем соединения большого плазмонного диполя с диполем электронно-дырочной пары в полупроводнике: исходя из полуклассической теории возмущений, гамильтониан взаимодействия между диполем  $\vec{\mu}$  и электрическим полем  $\vec{E}$  может быть выражен как  $H' = -\vec{\mu} \cdot \vec{E}$ . Заменяя электрическое поле  $\vec{E}$ , индуцируемое плазмонным диполем, гамильтониан возмущений  $H'$  становится термином диполь-дипольного взаимодействия:

$$H_{AB} = \frac{\mu_A \mu_B}{r^2} (3(\hat{\mu}_A \cdot \hat{r})(\hat{\mu}_B \cdot \hat{r}) - (\hat{\mu}_A \cdot \hat{\mu}_B)), \quad (6)$$

где  $\mu_A$  и  $\mu_B$  относятся к плазмонному и электронно-дырочному диполям? соответственно. Затем можно получить вероятность перехода, используя золотое правило Ферми:

$$W_{AB} = \frac{2\pi}{\hbar^2} |H_{AB}|^2 (\delta(E_A - E_B - \hbar\omega) + \delta(E_A - E_B + \hbar\omega)), \quad (7)$$

Как можно видеть, две точки зрения идентичны и основаны на одном и том же физическом принципе, согласно которому плазмонный диполь связан с диполем электронно-дырочной пары в полупроводнике через индуцируемое им ближнее поле.

### 1.2.2 Материалы наночастиц

Серебро (Ag) и золото (Au) отличаются наличием в области видимого света ярко выраженной резонансной полосы, однако к рассмотрению принимались также другие материалы, которые могут обеспечить возникновение эффекта ППР: нитрид титана (TiN), нитрид циркония (ZrN), легированный алюминием оксид цинка (AZO), оксид цинка, легированный галлием (GZO), оксид индия-олова (ITO) (рисунок 15) [89, 90].

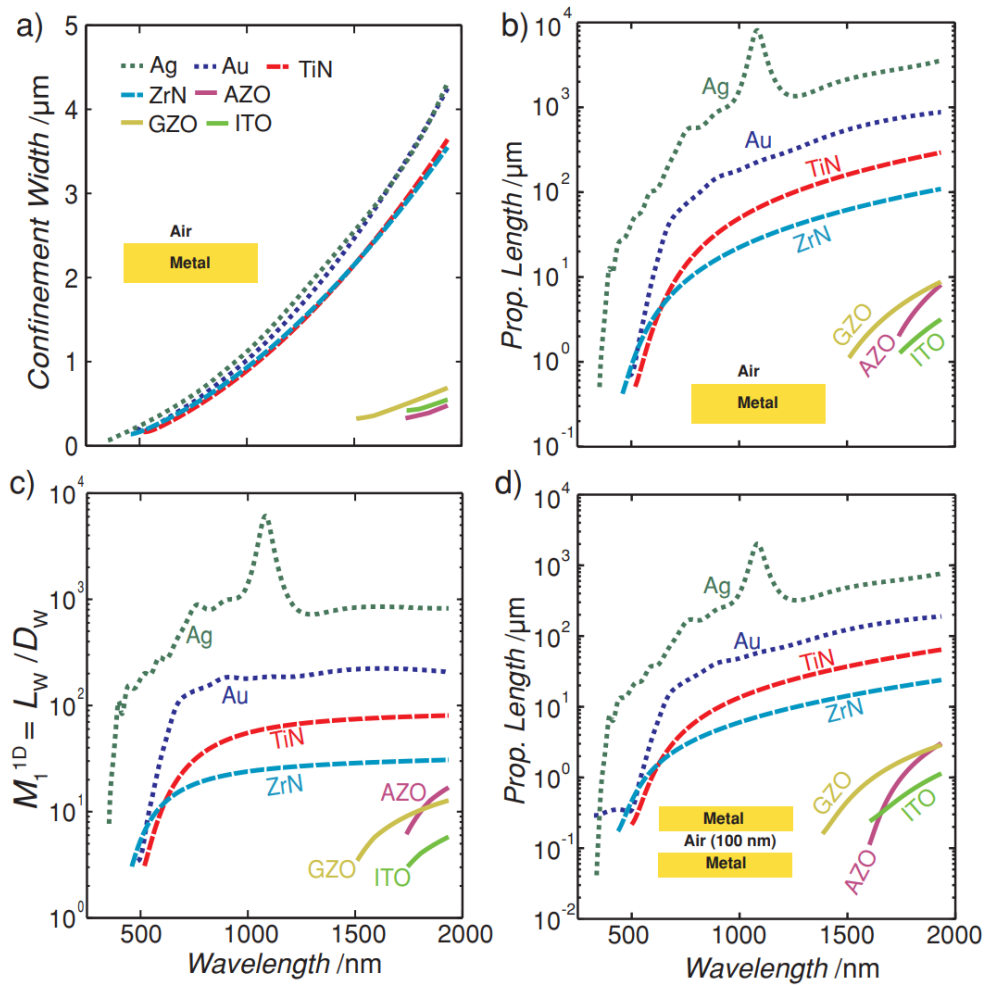


Рисунок 15 – Сравнительное исследование характеристик различных плазмонных материалов для возникновения ППР: а) ширина ограничения поля ( $D_W$ ) ППР на границе раздела плазмонный материал/воздух (вставка показывает геометрию структуры); б)  $1/e$  длина распространения ( $L_W$ ) ППР вдоль границы раздела плазмонный материал/воздух; в) показатель качества  $M_1^{1D}$  определяется как отношение длины распространения ( $L_W$ ) к ширине ограничения ( $D_W$ ) для ППР на границе раздела диэлектрик/металл; г) длина распространения дальнедействующей симметричной моды в

металле/изоляторе/металлическом волноводе с воздухом длиной волны 100 нм в качестве изолятора (вставка показывает геометрию структуры)

Как видно из рисунка 15, лучшими показателями, характеризующими распространение ППР, является серебро.

На рисунке показана зависимость поглощающей способности наносфер серебра различного диаметра от длины волны падающего электромагнитного излучения [91].

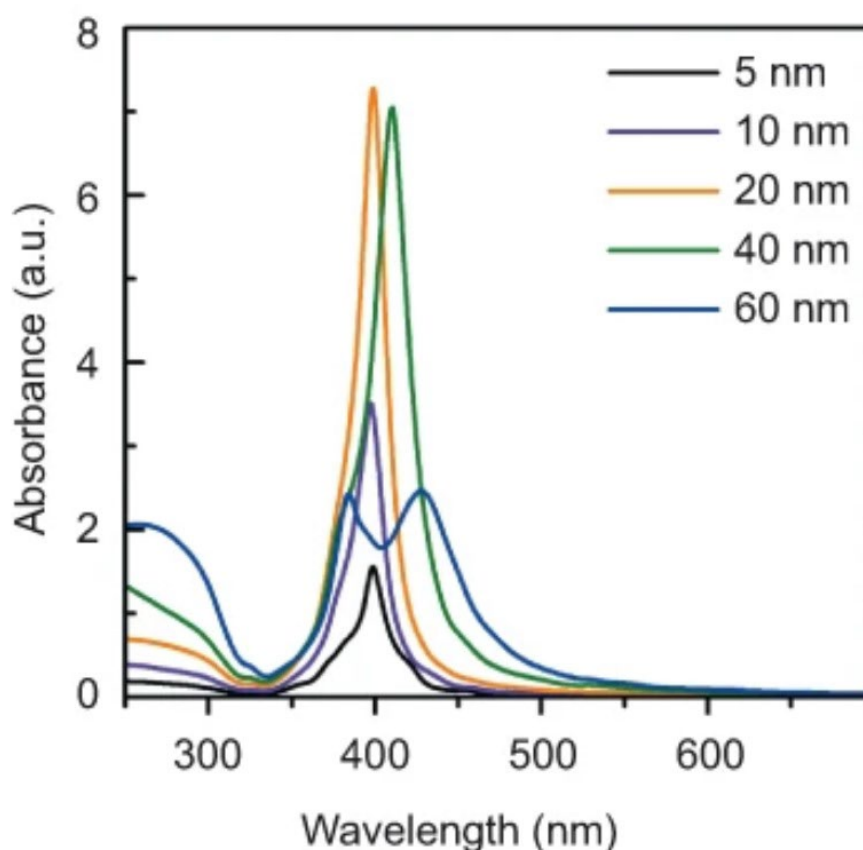


Рисунок 16 – Поглощение длин волн наносферами серебра различного диаметра

### 1.2.3 Форма наночастиц

На эффективность возникновения ППР также влияют размер и форма наночастиц. Для оценки влияния указанных параметров используют такой параметр, как доля света рассеянного наночастицей в подложку ( $f_{subs}$ ): мощность, рассеянная в подложку, делённая на общую рассеянную мощность.

Поскольку увеличение длины пути зависит от многократного рассеяния, доля света, теряемого в воздухе при каждом рассеянии на поверхности, должна быть небольшой. На рисунке 17 показаны  $f_{subs}$ , рассчитанные для частиц серебра (Ag) на подслое SiO<sub>2</sub> толщиной 10 нм на полубесконечной подложке Si различных форм [45].

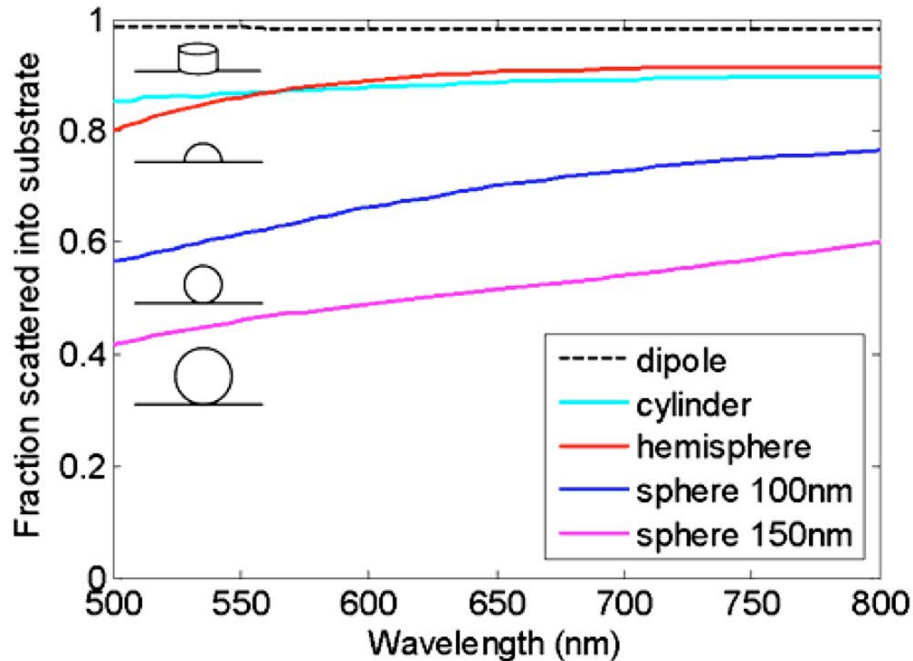


Рисунок 17 – Доля света, рассеянного в подложку,  $f_{subs}$ , для частиц Ag на подслое SiO<sub>2</sub> толщиной 10 нм на Si: цилиндр диаметром  $d=100$  нм и высотой  $h=50$  нм; полусфера диаметром 100 нм; сфера диаметром 100 нм; и сфера диаметром 150 нм. Также на графике изображены  $f_{subs}$  для параллельного электрического диполя, расположенного на расстоянии 10 нм от кремниевой подложки

На рисунке 18 показано максимальное увеличение длины пути в зависимости от доли света, рассеянной в подложку, для геометрий частиц, представленных на рисунке 17, при длине волны 800 нм [45].

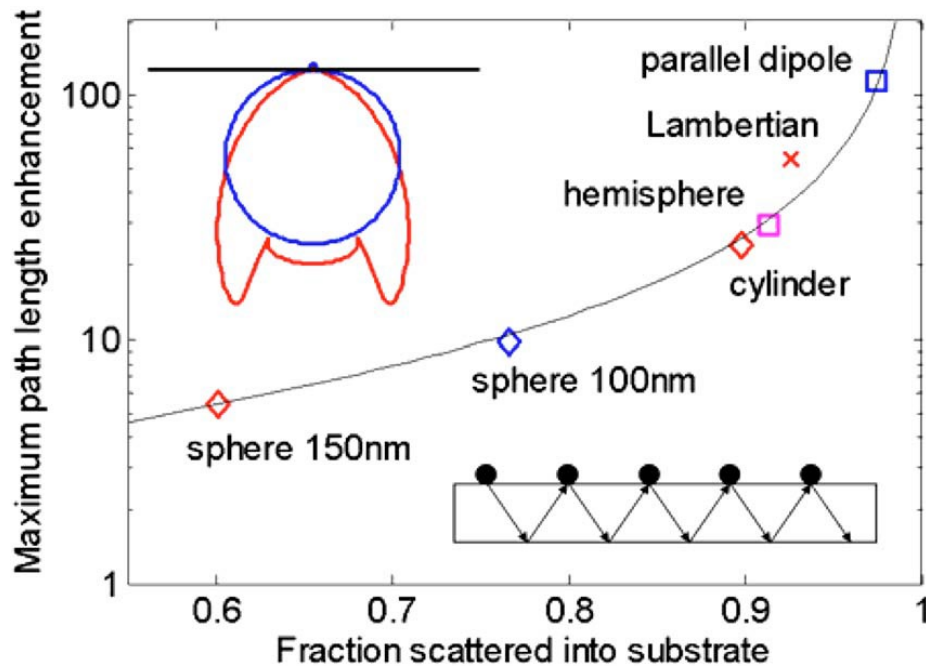


Рисунок 18 – Максимальное увеличение длины пути для той же геометрии частиц, что и на рис. 10, при длине волны 800 нм (слева вверху угловое распределение мощности рассеяния для параллельного электрического диполя, расположенного на 10 нм выше поверхности кремния и ламбертовского рассеивателя; правая нижняя геометрия, учитываемая для расчета увеличения длины пути)

Таким образом можно сделать вывод, что наночастицы, имеющие размер менее 100 нм, обеспечивают большее количество рассеянного в подложку света, что, в свою очередь, обеспечивает создание большего количества электронно-дырочных пар в ФЭП.

### 1.3 Способы нанесения наночастиц

В настоящее время существует значительное количество способов нанесения наночастиц металлов на подложку. На основании выполненного анализа была составлена таблица с описанием способов нанесения наночастиц на подложку, их преимуществ и недостатков (таблица 1) [92-103].



Таблица 1 – Способы нанесения наночастиц металлов

Наименование способа	Характеристика	Достоинства и недостатки
Золь-гель метод	<p>Выполняется следующая последовательность действий:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) приготовление истинного раствора;</li> <li>2) последовательный перевод раствора сначала в золь, а затем в гель за счёт процессов гидролиза и конденсации;</li> <li>3) последующие старение, высушивание и термообработка подложки с нанесённой плёнкой.</li> </ol>	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- прост в применении;</li> <li>- создание раствора и его нанесение на подложку на одном оборудовании.</li> </ul> <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- неконтролируемость процесса;</li> <li>- усадка в процессе сушки;</li> <li>- возможность возникновения дефектов при термообработке.</li> </ul>
Дип-покрытие (метод погружения)	<p>Выполняется следующая последовательность действий:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) подложку погружают в раствор при постоянной скорости;</li> <li>2) выдерживают подложку в растворе в неподвижном состоянии;</li> <li>3) подложку вынимают с постоянной скоростью.</li> </ol> <p>Чем быстрее подложка вынимается из раствора, тем толще будет слой материала на ней.</p>	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- покрытие материала с обеих сторон;</li> <li>- прост в применении;</li> <li>- простая автоматизация;</li> <li>- дешевизна.</li> </ul> <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- применение возможно только на стадии, когда пластина кремния подготовлена, но ещё не соединена с металлическими контактами;</li> <li>- не подходит для аморфных ФЭП из-за особенностей их изготовления;</li> <li>- в нижней части подложки толщина покрытия может быть больше, чем в верхней; -</li> </ul>

Наименование способа	Характеристика	Достоинства и недостатки
		на краях подложки покрытие может стекать неравномерно, из-за чего они будут иметь более толстый слой.
Центрифугирование	Выполняется следующая последовательность действий: 1) покрытие подложки раствором материала 2) увеличение скорости вращения подложки до требуемого значения; 3) вращение подложки с постоянной скоростью. На этом этапе происходит испарение жидкости и образование плёнки.	Достоинства: - дешевизна; - быстрота. Недостатки: - большой расход раствора; - утолщение на краях подложки; - вероятность возникновения неравномерного покрытия по всей/на части поверхности подложки из-за различных факторов.
CVD (Chemical Vapour Deposition)	Выполняется следующая последовательность действий: 1) подложка помещается в реактор 2) в реактор подаются пары одного или нескольких веществ 3) вещества вступают в реакцию и/или разлагаются на поверхности или вблизи поверхности нагретого объекта/подложки, при этом на поверхности объекта в виде тонкой пленки осаждается	Достоинства: - подходит для нанесения покрытий на несколько подложек одновременно; - равномерность покрытия; - чистота покрытия. Недостатки: - минимальная толщина покрытия – 4 мкм; - дороговизна; - применение температуры в диапазоне 200-1600°C может повредить ФЭП

Наименование способа	Характеристика	Достоинства и недостатки
	<p>необходимое вещество. Как правило, в ходе процесса образуется побочный газообразный продукт химических реакций, удаляемый из реактора с потоком газа.</p>	
PVD (Physical Vapour Deposition)	<p>Выполняется следующая последовательность действий:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) материал мишени переходит из твёрдого состояния в газовую фазу в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счёт кинетической энергии столкновения частиц материала;</li> <li>2) пучок полученной газовой фазы материала при помощи электромагнитного поля транспортируется к подложке, нагретой до температуры, не превышающей 500°C;</li> <li>3) ионизированный материал сталкивается и равномерно конденсируется на подложке.</li> </ol>	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- подходит для нанесения покрытий на несколько подложек одновременно;</li> <li>- равномерность покрытия;</li> <li>- чистота покрытия;</li> <li>- температура нанесения до 500°C.</li> </ul> <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- минимальная толщина покрытия – от 3 до 5 мкм;</li> <li>- дороговизна.</li> </ul>
Спрей-пиролиз	<p>Выполняется следующая последовательность действий:</p>	<p>Достоинства:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- возможность применения на больших</li> </ul>

Наименование способа	Характеристика	Достоинства и недостатки
	<p>1) раствор, содержащий соли или органические соединения металлических компонентов пленки, распыляют пневматической форсункой или ультразвуковым диспергатором и направляют полученный аэрозоль на нагретую подложку;</p> <p>2) при испарении растворителя на подложке образуется пленка исходных веществ и продуктов их частичного разложения;</p> <p>3) пленку подвергают отжигу и выдержке в атмосфере кислорода.</p>	<p>поверхностях (на нескольких ФЭП);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- скорость нанесения;</li> <li>- средняя стоимость относительно представленных в данной таблице методов.</li> </ul> <p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- сильна зависимость от температуры подложки;</li> <li>- образование капель при распылении раствора.</li> </ul>

Также в процессе исследования были обнаружены исследования, направленные на формирование наноструктур на подложке [104-107]:

- путём ионного обмена в расплавах с последующим отжигом в атмосфере водорода и термическим полингом (электрополевой модификацией);

- атомно-слоевого осаждения наночастиц;

- фемто(пико)секундной лазерной модификации подложки.

Однако, данные способы пока не получили распространения.

В результате выполненного анализа способов формирования наноструктурированных покрытий было выявлено, что в настоящее время не существует такого способа нанесения, которое бы обеспечивало строгую

регулярность расположения наночастиц на подложке, отсутствие вероятности деформации подложки, высокую производительность, минимальную трудоёмкость и дешевизну.

В настоящее время всё больше получают распространение методы формирования покрытий из наночастиц, в основе которых лежит воздействие электрического поля на дисперсную систему. Одним из таких методов является электрофорез. Наибольшее распространение он получил в качестве способа окрашивания изделий сложных форм, таких как автомобили, радиаторы отопления и др. [108]. Это происходит из-за того, что такое электрофоретический способ нанесения обладает следующими преимуществами:

- минимальное воздействие на окружающую среду;
- высокая коррозионная стойкость покрытия;
- равномерное окрашивание по всей поверхности, даже изделий сложных форм;
- высокая адгезия и механическая стойкость покрытия
- низкая трудоёмкость;
- более низкие требования к квалификации обслуживающего персонала относительно других способов нанесения покрытия;
- небольшая продолжительность процесса.

В работе [109] был представлен способ электрофоретического осаждения наночастиц электрофоретическим методом на материал бусофит. Данная концепция вызвала интерес, в связи с чем нами было принято решение об исследовании данного способа для нанесения наночастиц серебра на ФЭП с целью получения покрытия, увеличивающего выработку энергии.

#### **1.4 Выводы и постановка задач исследования**

На основании анализа релевантной информации установлено, что получение электрической энергии посредством преобразования солнечной

радиации осуществляется при помощи фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). При этом главным недостатком современных ФЭП является недостаточная эффективность выработки энергии, сдерживающая их широкое использование.

Одним из наиболее популярных способов повышения выработки энергии ФЭП является применение функциональных покрытий, так как их внедрение в производственный процесс требует минимального вмешательства в цикл изготовления ФЭП, не требует принципиальных изменений конструкции ФЭП, и при этом достигаемый результат – один из лучших среди существующих способов повышения эффективности работы фотоэлектрического элемента.

При формировании функциональных покрытий перспективным направлением является использование нанотехнологий: структуры из наночастиц металлов позволяют перенаправлять, мультиплицировать и концентрировать электромагнитное излучение благодаря явлению поверхностного плазмонного резонанса (далее – ППР).

По совокупности технико-экономических показателей наиболее подходящим материалом наночастиц, способствующих возникновению ППР, является серебро. Размер наночастиц при этом должен быть менее 100 нм.

В настоящее время существует достаточно большое количество способов нанесения наночастиц металлов на подложку, однако они не гарантируют отсутствие деформации подложки, высокую производительность, минимальную трудоёмкость и разумную стоимость процесса нанесения.

В связи с вышесказанным, актуальным трендом сегодня является повышение выработки энергии серийно выпускаемыми ФЭП и разработка простой и относительно недорогой технологии, которая бы обеспечивала нанесение наночастиц серебра для формирования функциональных покрытий на поверхности ФЭП. На этом основании были сформулированы представленные во введении цель и задачи диссертационной работы.

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

### **2.1 Объекты исследования**

Первоначально планировалось использование ФЭП исключительно отечественного производства, однако в связи с пятым пакетом санкций, введённым в апреле 2022 г. Евросоюзом в отношении России, который включает запрет на поставку кремния [110]), их выпуск значительно снизился в связи с тем, что в России при производстве ФЭП использовалось импортное сырьё [111, 112].

В настоящее время в России производится так называемый металлургический (технический) кремний, который может быть использован для производства ФЭП только после специального процесса очистки, не реализованного на территории РФ до недавнего времени. Однако, в июле 2022 года на выставке «Иннопром-2022» холдингом «Росэлектроника» был продемонстрирован первый образец монокристаллического кремния диаметром 107 мм, который создали из материалов российского производства [113], однако о массовом производстве говорить пока не приходится, также, как и о возможности использования полученного чистого кремния при производстве ФЭП, так как более актуальна проблема создания микросхем [112].

В связи с вышесказанным при проведении исследования были использованы также ФЭП китайского производства, оставшиеся доступными для покупки и использования на территории Российской Федерации.

В качестве объектов исследования были использованы следующие фотоэлектрические преобразователи:

– 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.

### 2.1.1 Монокристаллические ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

ФЭП изготовлены по ТУ-3487-027-33919617-2002 «Элементы солнечные кремниевые». Настоящие технические условия распространяются на монокристаллические кремниевые ФЭП, предназначенные для преобразования солнечного света в электрический ток, со следующими техническими характеристиками (таблица 2).

Таблица 2 – Технические требования к электрическим параметрам и характеристикам

Наименование параметра (характеристики), буквенное обозначение, единица измерения	Норма, не менее
Коэффициент полезного действия, $\eta$ , %	13
	14
	15
Коэффициент формы ВАХ (филл-фактор), FF, %	70
Шунтирующее сопротивление, Rsh, Ом	7
Напряжение холостого хода, Uoc, В	0,57
	0,58

Согласно ТУ-3487-027-33919617-2002, структура ФЭП состоит из 9 элементов, которые условно показаны на рисунке 19 и в таблице 3.



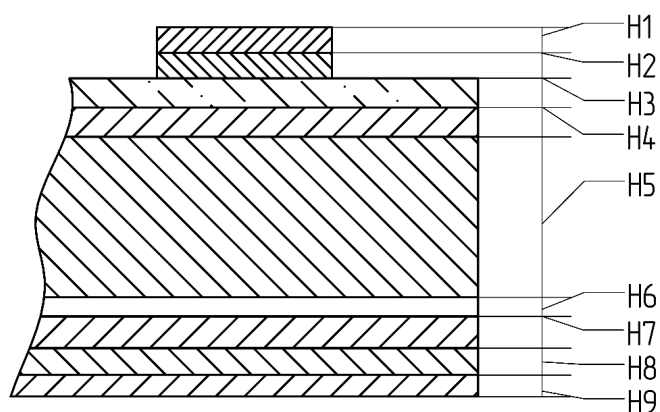


Рисунок 19 – Схема фотоэлектрического преобразователя (разрез)

Таблица 3 – Требования к электрическим параметрам и характеристики

Элементы структуры и обозначение	Толщина, мкм	Тип проводимости	Поверхностное сопротивление	Наименование, марка используемого материала
Н1	0,7	-	-	Припой ПОВИ-0,5
Н2	2	-	-	Медь М1
Н3	0,07	-	30-80	Индий ИН 2
Н4	0,7	N	50-80	Кислота ортофосфорная ОСЧ 13-3
Н5	300	P	3-10	Кремний марки ПСККДБ 3-10
Н6	2	N	4-8	Кислота борная ОС413-4
Н7	0,05	-	-	Титан Вг1-00
Н8	0,8	-	-	Медь М1
Н9	0,7	-	-	Припой ПОВИ-0,5

Фотография ФЭП представлена на рисунке 20.

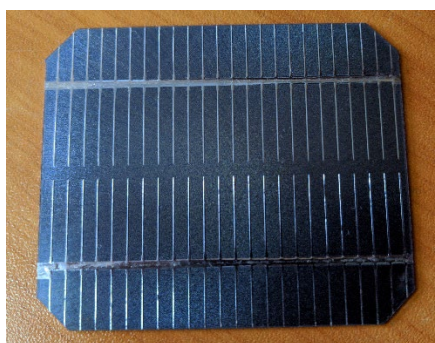


Рисунок 20 – Монокристаллическая ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

## 2.1.2 Монокристаллические ФЭП производства Allmejores Factory Store

Паспортные характеристики монокристаллических ФЭП производства Allmejores Factory Store (Китай) представлены на рисунке 21.

MECHANICAL DATA AND DESIGN		TEMPERATURE COEFFICIENTS	
Dimension	125mm*125mm, tolerance $\pm 0.5$ mm	TkCurrent	+0.10%/°C
Thickness	200 $\mu$ m $\pm 20$ $\mu$ m	TkVoltage	-0.38%/°C
Front(-)	Blue silicon nitride anti-reflection coating	TkPower	-0.47%/°C
Back(+)	Aluminum back surface field		

Eff	Pmax	Vmp	Imp	Voc	Isc
20.00%	3.078W	0.575V	5.353A	0.665V	5.997A
19.80%	3.047W	0.570V	5.346A	0.660V	5.948A
19.60%	3.017W	0.560V	5.388A	0.655V	5.901A
19.40%	2.986W	0.550V	5.429A	0.650V	5.851A
19.20%	2.955W	0.545V	5.422A	0.645V	5.803A
19.00%	2.924W	0.540V	5.415A	0.640V	5.753A
18.80%	2.893W	0.530V	5.408A	0.635V	5.802A
18.60%	2.863W	0.530V	5.401A	0.635V	5.744A

### INTENSITY DEPENDENCE

Intensity [W/M <sup>2</sup> ]	Isc	Voc
1000	1.0	1.000
900	0.9	0.995
500	0.5	0.969
300	0.3	0.946
200	0.2	0.929

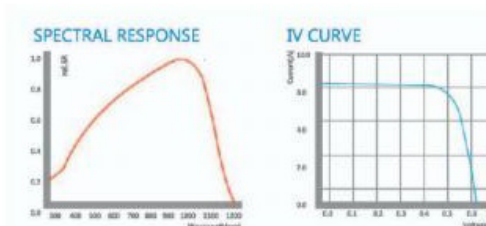


Рисунок 21 – Паспортные характеристики монокристаллического ФЭП производства Allmejores Factory Store

Фотография ФЭП представлена на рисунке 22.



Рисунок 22 – Монокристаллическая ФЭП производства Allmejores Factory Store

### 2.1.3 Поликристаллические ФЭП производства Allmejores Factory Store

Паспортные характеристики поликристаллических ФЭП производства Allmejores Factory Store (Китай) представлены на рисунке 23.

Product Characteristics						
Cell Technology	Polycrystalline					
Dimensions	156 × 156 mm					
Cell Thickness	200 ± 15 µm					
Front Surface (-)						
No. of Busbars	5					
Busbar Width	0.7 mm					
Busbar Material	Silver					
Anti Reflection Coating	Silicon nitride					
Back Surface (+)						
No. of Soldering Pads	5					
Soldering Pad Width	2 mm					
Soldering Pad Material	Silver					
Back Surface Field (BSF)	Aluminium					
Electrical Data at STC						
Maximum Power (Pmax)	4.47 W	4.52 W	4.55 W	4.57 W	4.59 W	4.62 W
Voltage at Maximum Power Point (Vmpp)	0.5333 V	0.5371 V	0.5395 V	0.5389 V	0.5422 V	0.5443 V
Current at Maximum Power Point (Impp)	8.431 A	8.417 A	8.424 A	8.48 A	8.473 A	8.487 A
Open Circuit Voltage (Voc)	0.6296 V	0.6321 V	0.6342 V	0.6347 V	0.637 V	0.6387 V
Short Circuit Current (Isc)	8.93 A	8.911 A	8.913 A	8.975 A	8.963 A	8.977 A
Cell Efficiency	18.3-18.4 %	18.4-18.5 %	18.5-18.6 %	18.6-18.7 %	18.7-18.8 %	18.8-18.9 %
Fill Factor (FF)	79.97 %	80.26 %	80.4 %	80.22 %	80.46 %	80.57 %

Рисунок 23 – Паспортные характеристики поликристаллического ФЭП производства Allmejores Factory Store

Фотография ФЭП представлена на рисунке 24.



Рисунок 24 – Поликристаллическая ФЭП производства Allmejores Factory Store

#### **2.1.4 Аморфные ФЭП производства Lich Official Store**

Характеристики аморфных ФЭП производства Lich Official Store:

- напряжение: 1,5 В;
- рабочий ток: 240 мА;
- напряжение холостого хода: 2,0 В;
- ток короткого замыкания: 260 мА;
- мощность: 0,3 Вт;
- размер: 190x35 мм.

Согласно данным производителя, в качестве антиображающего покрытия используется оксид индия-олова (ИТО) (рисунок 25), а в качестве защитного покрытия – этилен-тетрафторэтилен.

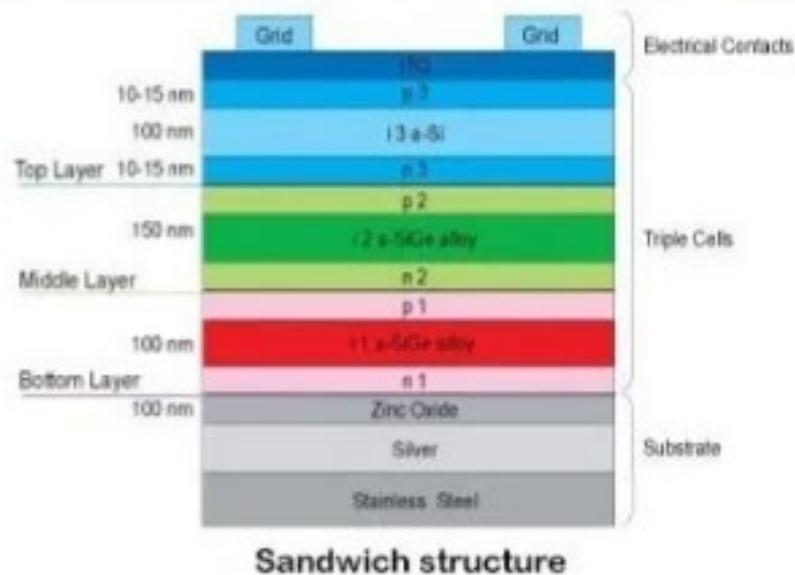


Рисунок 25 – Структура аморфных ФЭП производства Lich Official Store  
Фотография ФЭП представлена на рисунке 26.



Рисунок 26 – Аморфная ФЭП производства Lich Official

## 2.2 Коллоидный раствор серебра

### 2.2.1 Установка синтеза наночастиц металлов

Для создания коллоидного раствора была использована установка синтеза наночастиц металлов (далее – УСНМ), в основе которой лежит метод электроимпульсного диспергирования металлов (рисунок 27). Данная установка была разработана на кафедре «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» МАИ (НИУ) [109, 114, 115].

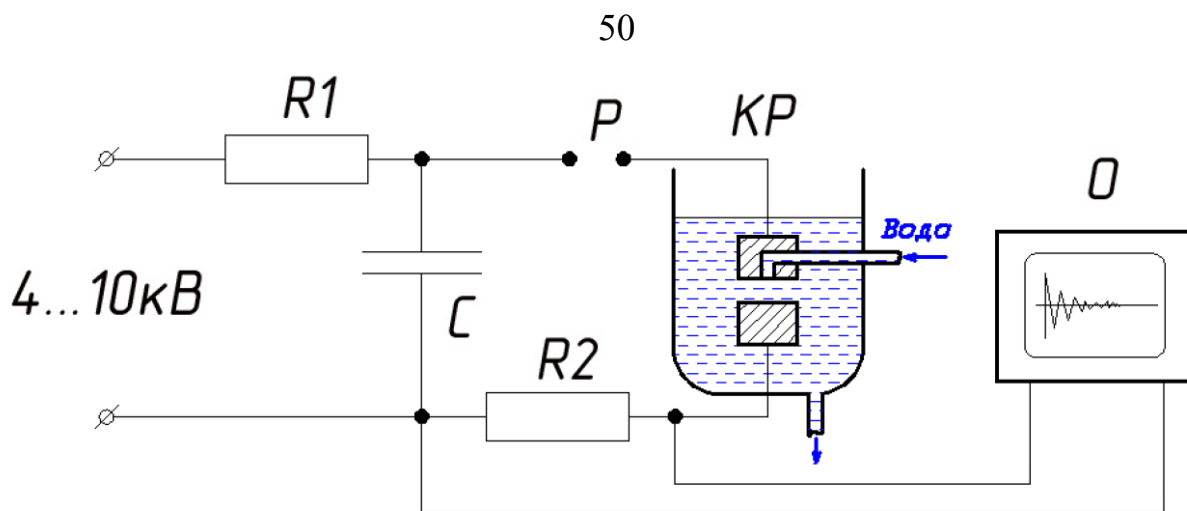


Рисунок 27 – Принципиальная электрическая схема установки УСНМ: С – высоковольтный конденсатор 15 кВ; Р – разрядник воздушный (высоковольтный коммутатор); П – пояс Роговского; О – осциллограф; КР – камера разрядная; R2-измерительный резистор; R1-балластный резистор

Параметры установки:

- рабочее напряжение:  $5 \div 10$  кВ;
- энергия импульса:  $1 \div 5$  Дж;
- амплитуда импульса тока:  $0.5 \div 2$  кА;
- производительность реактора: 8-10 л/ч (концентрация 50 мг/л).

Питание установки для генерации разрядов в жидкой среде обеспечивает источник питания Sh-0105, на котором выставляется требуемые режимы работы (напряжение). Высоковольтный блок питания Sh-0105 обеспечивает требуемый для работы реактора диапазон напряжений  $4 \div 10$  кВ. Высокое напряжение с блока питания Sh-0105 заряжает разрядный конденсатор С до установленного на высоковольтном коммутаторе Р амплитудного значения напряжения. При достижении заданного на высоковольтном коммутаторе Р пробивного напряжения, через электродную систему, помещённую в рабочую жидкость, возникает искровой разряд, вызывая их эрозию. Электрические параметры разряда, протекающие в разрядном контуре, контролируются осциллографом О (Agilent 54621A), соединённым с датчиком П (пояс Роговского). Дополнительно для предварительной настройки работы установки используется высоковольтный делитель. Технологические режимы

подбираются таким образом, чтобы на выходе иметь раствор с заданными характеристиками.

### **2.2.2 Методика получения коллоидного раствора серебра электроимпульсным методом**

Методика получения коллоидного раствора серебра на установке УСНМ следующая.

Оператор при помощи тумблера «Сеть» включает блок управления, на него от сети подаётся 220В. Загорается индикатор, сообщающий о разведённом состоянии электродов. Далее выполняется сведение электродов, индикатор отключается.

После этого оператор выставляет требуемый зазор между электродами, загорается определённый индикатор. Установка переходит в режим готовности. В ванну УСНМ происходит закачка дистиллированной воды из накопителя.

С помощью высоковольтного блока на электроды подаётся высокое импульсное напряжение, а также, с помощью блока управления, запускается вращение электрода, начинается производство коллоидного раствора. Во время вращения электродов, в зазоре возникает искровой разряд. Во время работы установки возникает эрозия, благодаря которой происходит насыщение дисперсионной жидкой среды наночастицами, полученными из электродов при их химическом взаимодействии с элементами жидкой среды под действием импульсных электрических разрядов между электродами. Длительность разряда от  $10^{-6}$ с до  $10^{-8}$ с, в зависимости от расстояния между электродами, насыщения среды и изменения размеров эродирующих электродов.

В месте катодного пятна происходит нагрев до крайне высоких температур, в результате чего малая часть электрода переходит из твёрдой фазы в жидкую. С жидкой фазой происходит сразу два процесса:



- часть испаряется;
- часть выбрасывается из зоны разряда в среду за счёт возникновения взрыва возникающей в этом месте (месте разряда) парогазовой смеси.

Та часть, которую выбросило из зоны разряда, расширяется и охлаждается, образуя зародыши докритического размера, а после зародыши критического размера. В конечном итоге данные зародыши стабилизируются и образуют наночастицы.

Из-за эрозии электродов увеличивается расстояние между электродами, что приводит к увеличению разрядного промежутка и прекращению работы разрядного устройства. Для коррекции увеличения разрядного промежутка и происходит выставка электродов перед каждым запуском процесса производства коллоидных растворов.

По окончании процесса раствор попадает в реактор коллоидного раствора.

По данной методике был создан коллоидный раствор серебра с концентрацией 50 мг/л с узким распределением размеров наночастиц: средний номинальный диаметр для более чем 80% наночастиц находится в диапазоне 20-40 нм (рисунок 28).

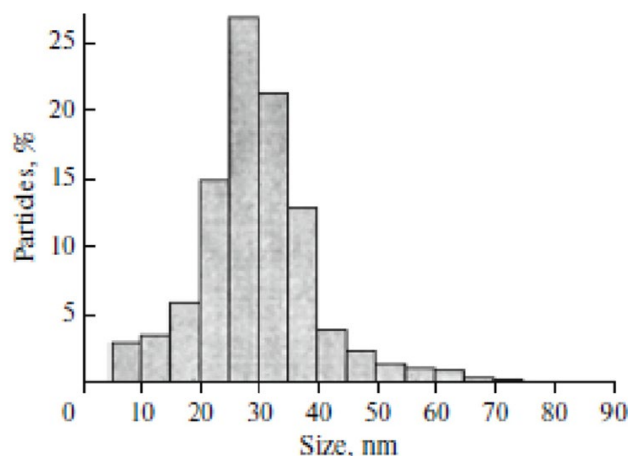


Рисунок 28 – Распределение наночастиц серебра по размерам в коллоидном растворе

На рисунке 29 показана фотография наночастицы, сделанная при помощи электронного микроскопа [109].



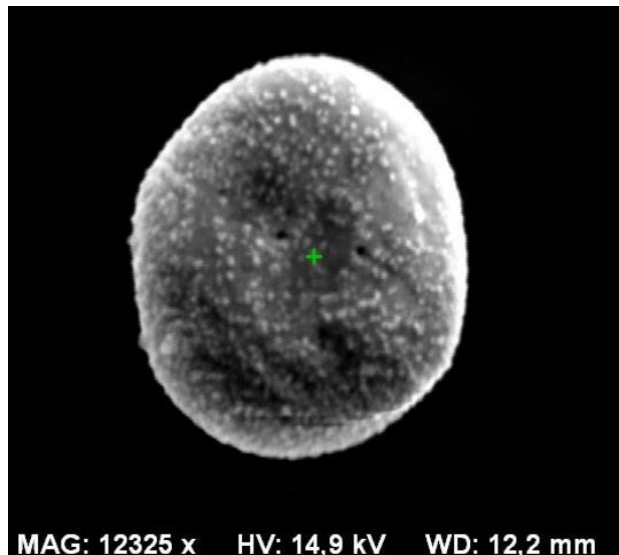


Рисунок 29 – Фотография наночастицы серебра, сделанная при помощи электронного микроскопа

Как видно из рисунка 29, форма наночастицы близка к сферической, но при этом отлична от неё, имея выпуклости и вогнутости.

### 2.2.3 Коллоидный раствор и строение мицеллы

Коллоидный раствор (коллоидная система) представляет собой дисперсионную систему, в которой частицы дисперсной фазы (наночастицы) распределены в дисперсионной среде (жидкости).

Структурной единицей коллоидного раствора, отражающей её состав и специфические свойства, является макромолекула, или мицелла. Строение последней зависит от ряда факторов, но это всегда многослойная частица, состоящая из агрегата (множество молекул простого вещества), потенциалобразующих ионов и противоионов (рисунок 30) [116, 117].

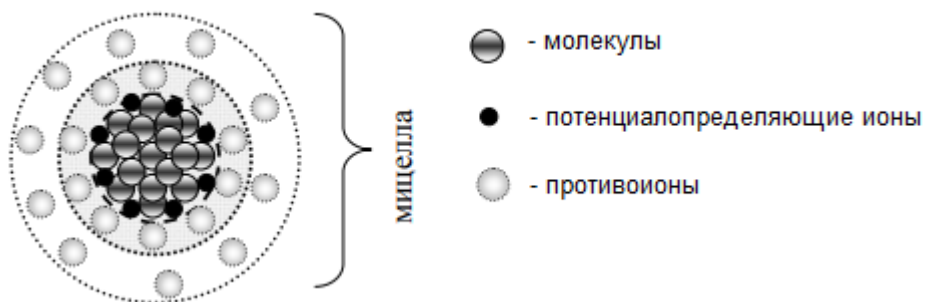


Рисунок 30 – Строение мицеллы суспензоеидов

Агрегат – основное вещество (в данном случае – серебро), обладающее большой адсорбционной способностью. Согласно правилу Пескова-Фаянса-Панета, на поверхности агрегата адсорбируются ионы электролита-стабилизатора, входящие в состав агрегата, либо имеющие общую природу с ним, либо специфически взаимодействующие с ним и находящиеся в избытке. Такие ионы получили название «потенциалобразующие» и они, совместно с агрегатом, образуют ядро мицеллы.

Ядро мицеллы, обладая большим зарядом, притягивает из жидкой среды ионы противоположного знака, получивших название противоионы. Часть противоионов находится в непосредственной близости от ядра, прочно связана с ним за счёт адсорбционных и электростатических сил. Данный слой получил название «адсорбционный». Ядро с адсорбционным слоем противоионов образуют гранулу или коллоидную частицу. Электрический заряд коллоидной частицы равен алгебраической сумме электрических зарядов потенциалопределяющих ионов и противоионов адсорбционного слоя.

Коллоидную частицу (гранулу) окружают противоионы диффузного слоя – остальная часть противоионов, подвергающихся броуновскому движению, которая притягиваются к частице только за счёт электростатических сил, в связи с чем их связь значительно слабее, чем у ядра с адсорбционным слоем противоионов.

Коллоидная частица совместно с диффузным слоем противоионов образует мицеллу.

В мицелле, на границе раздела твёрдой и жидкой фаз, возникает тонкий поверхностный слой из пространственно разделённых электрических зарядов противоположного знака, получивший название «двойного электрического слоя» (далее – ДЭС) [118]. ДЭС состоит из потенциалобразующих ионов, противоионов адсорбционного и диффузного слоёв. В связи с тем, что суммы электрических зарядов в нём равны друг другу по абсолютной величине и

На рисунке 31 представлена схема ДЭС, на которой показано изменение потенциала ДЭС ( $\varphi$ ) с расстоянием ( $x$ ) от границы раздела фаз. Полное падение потенциала ДЭС, получившее название термодинамического потенциала ( $\varphi_0$ ) складывается из падения потенциала в адсорбционном ( $\varphi_\delta$ ) и диффузном ( $\varphi_d$ ) слоях:

$$\varphi_0 = \varphi_\delta + \varphi_d. \quad (8)$$

Также потенциалом, характеризующим ДЭС, является электрокинетический или  $\xi$ -потенциал: часть потенциала в диффузном слое, где жидкость подвижна. Согласно теории Штерна, граница скольжения, определяющая  $\xi$ -потенциал, не обязательно должна совпадать с границей между прочно связанной частью ДЭС (потенциалобразующие ионы и адсорбционные противоионы) и диффузной частями. Таким образом, в различных электрокинетических явлениях, таких как электрофорез, принимает участие только часть противоионов диффузного слоя.

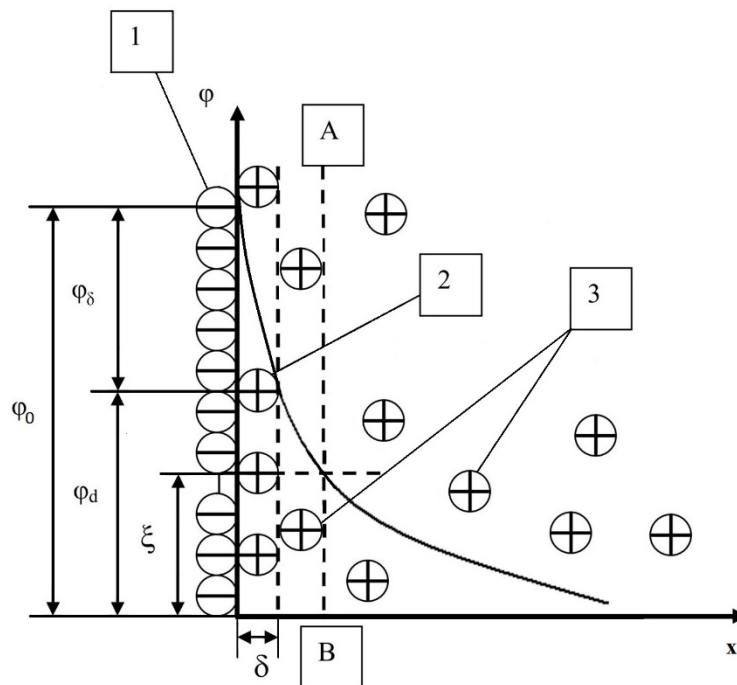


Рисунок 31 – Строение ДЭС: 1 – потенциалобразующий слой ионов; 2 – противоионы в адсорбционном слое; 3 – противоионы в диффузном слое;  $\delta$  – толщина адсорбционного слоя; АВ – граница скольжения;  $\varphi_0$  – термодинамический потенциал;  $\varphi_\delta$  – адсорбционный потенциал;  $\varphi_d$  – диффузный потенциал;  $\xi$  – электрокинетический потенциал

Образование коллоидного раствора серебра электроимпульсным методом осуществляется следующим образом: в процессе действия установки УСНМ происходит искровой разряд, во время которого одновременно существуют и взаимодействуют четыре отдельных эффекта (рисунок 32):

- сильное электрическое поле;
- высокая температура плазмы;
- активные атомы серебра, выделяемые из стержня Ag;
- атомы водорода и кислорода, выделяемые из молекул воды.

В результате реакции между активными атомами образовывается ионоподобное соединение серебра, а также в процессе «бомбардировки» электродов искровым разрядом, благодаря водородной связи, атомарный кислород может прилипать к поверхности заряженных наночастиц Ag (отмечены пунктирной линией на рисунке 32). Модель мицелл наночастиц серебра показана на рисунке 33.

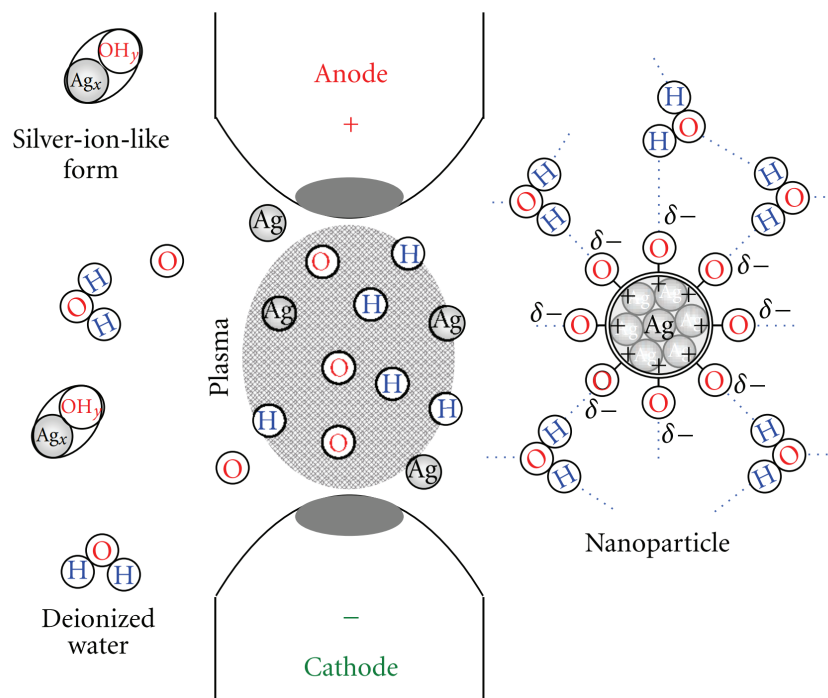


Рисунок 32 – Образование коллоидного раствора серебра

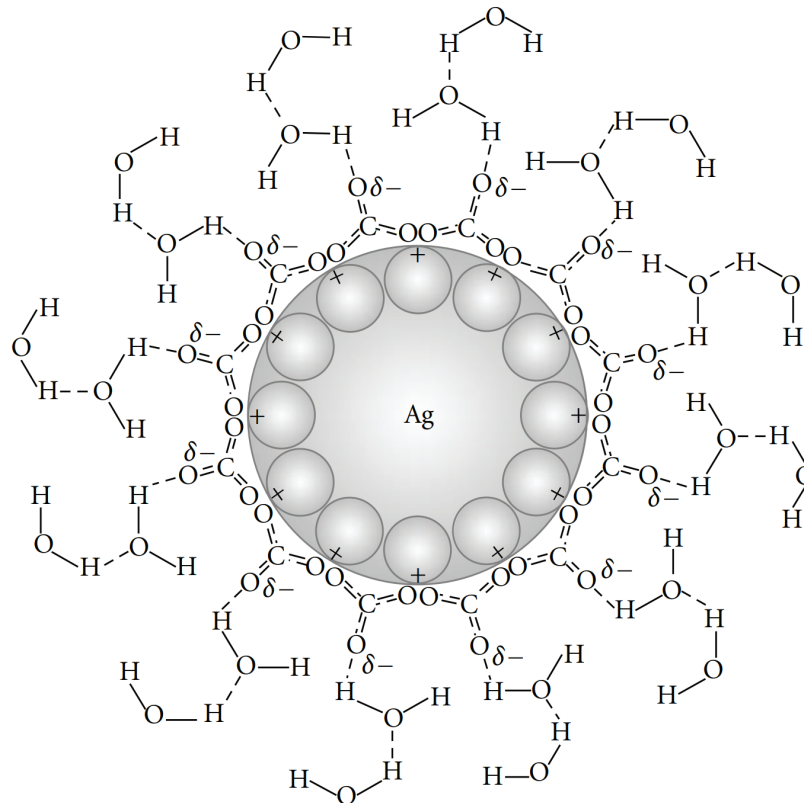


Рисунок 33 – Модель мицеллы наночастицы, полученной электроимпульсным методом в дистиллированной воде

Максимальный  $\xi$ -потенциал водного коллоидного раствора серебра достигает приблизительно  $-45$  мВ (рисунок 34) ( $\xi$ -потенциал водного коллоидного раствора определяется  $\xi$ -потенциалом частиц). Наночастицы серебра, диспергированные в воде, были заряжены отрицательно из-за их ионных характеристик мицелл Ag. Электростатические силы отталкивания между наночастицами серебра защищают их от агломерации и осаждения в водной суспензии.

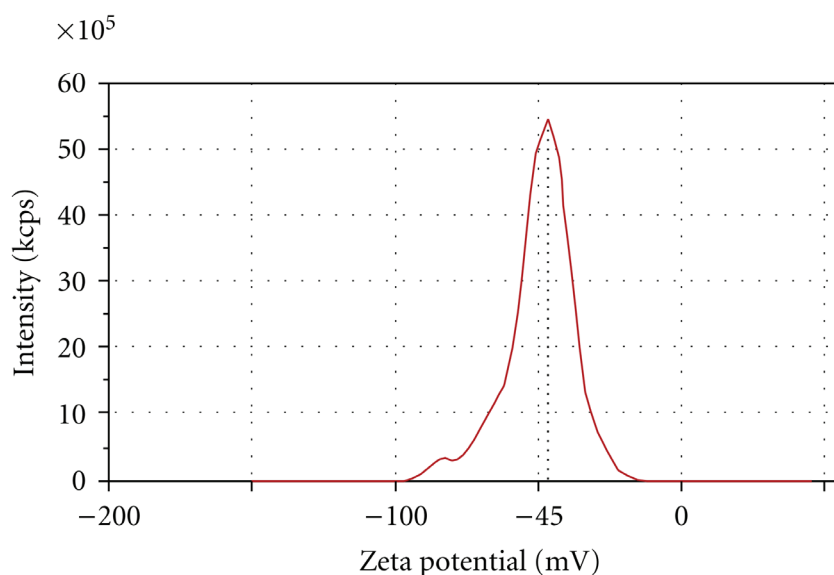


Рисунок 34 –  $\xi$ -потенциал водного коллоидного раствора серебра

Коллоидные частицы, образованные благодаря связи между молекулами воды и атомами кислорода на поверхности наночастиц Ag, создают стабильную суспензию без добавления каких-либо стабилизаторов и поверхностно-активных веществ.

### 2.3 Лабораторный стенд для фотоэлектрических испытаний

Для фотоэлектрических испытаний был разработан лабораторный стенд (рисунок 35), который включает в себя:

- корпус;
- 4 галогенные лампы Uniel GU5.3;
- цифровой люксметр eЛайт-мини;
- цифровой мультиметр Fluke 17B+;
- трансформатор.

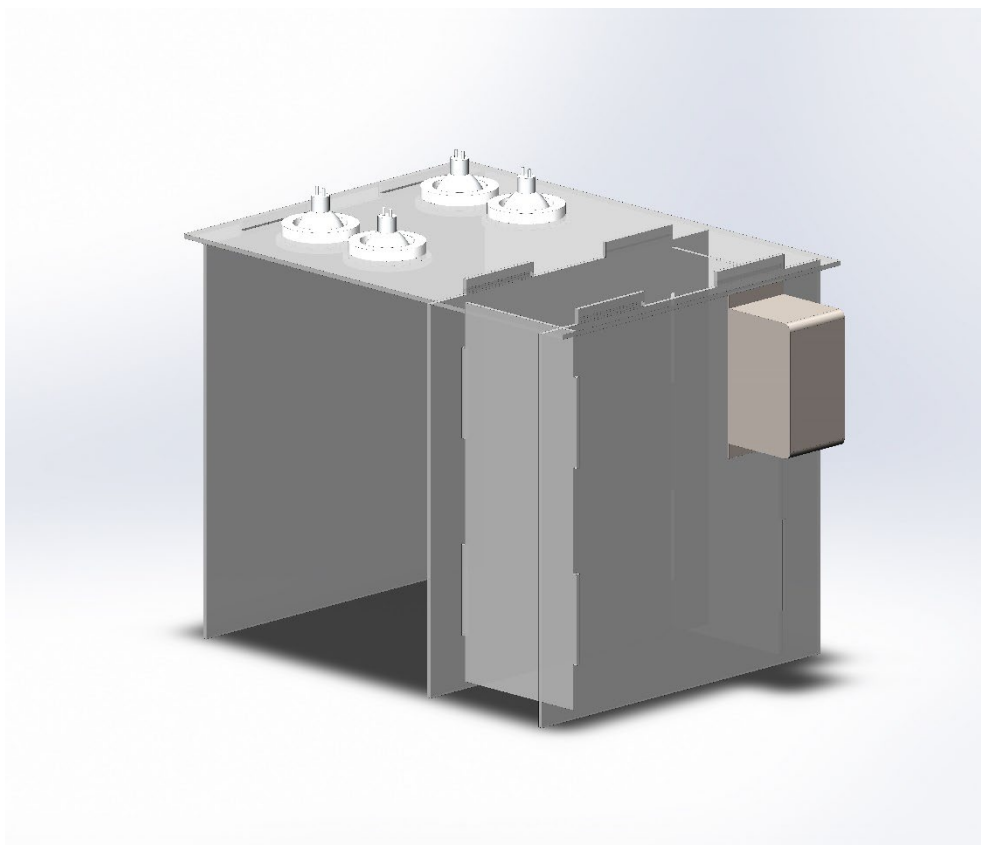


Рисунок 35 – Лабораторный стенд для фотоэлектрических испытаний

Данный лабораторный стенд использовался для измерения напряжения холостого хода ФЭП:

- 1) включается освещение, состоящее из 4 галогенных лам (обеспечивается уровень освещённости, равный 623 лк);
- 2) производится измерение освещённости при помощи люксметра;
- 3) ФЭП помещается внутрь корпуса стенда и центрировался по специализированной разметке;
- 4) измеряется значение напряжения холостого ФЭП при помощи мультиметра;
- 5) полученное значение фиксируется;
- 6) повторяется последовательность действий 3-5 для всех ФЭП.

После модификации ФЭП производится повторное измерение согласно последовательности 1-6. Полученные значения сравниваются.

### 2.3.1 Цифровой мультиметр Fluke 17B+

Для измерения параметров ФЭП был использован цифровой мультиметр Fluke 17B+ (рисунок 36) с техническими характеристиками, представленными в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики цифрового мультиметра Fluke 17B+

Функция	Диапазон	Разрешение	Точность
Напряжение переменного тока, В	4.000 В	0.001 В	1.0 % + 3
	40.00 В	0.01 В	
	400.0 В	0.1 В	
	1000 В	1 В	
Напряжение постоянного тока, В	4.000 В	0.001 В	0.5 % + 3
	40.00 В	0.01 В	
	400.0 В	0.1 В	
	1000 В	1 В	
Напряжение переменного тока, мВ	400.0 мВ	0.1 мВ	3.0 % + 3
Напряжение постоянного тока, мВ	400.0 мВ	0.1 мВ	1.0 % + 10
Тесты диодов	2.000 В	0.001 В	10%
Сопротивление, Ом	400.0 Ω	0.1 Ω	0.5 % + 3
	4.000 кΩ	0.001 кΩ	0.5 % + 2
	40.00 кΩ	0.01 кΩ	0.5 % + 2
	400.0 кΩ	0.1 кΩ	0.5 % + 2
	4.000 МΩ	0.001 МΩ	0.5 % + 2
	40.00 МΩ	0.01 МΩ	1.5% + 3
Емкость	40.00 нФ	0.01 нФ	2 % + 5
	400.0 нФ	0.1 нФ	2 % + 5
	4.000 мкФ	0.001 мкФ	5 % + 5
	40.00 мкФ	0.01 мкФ	5 % + 5
	400.0 мкФ	0.1 мкФ	5 % + 5
	1000 мкФ	1 мкФ	5 % + 5



Функция	Диапазон	Разрешение	Точность
Частота Гц (10 Гц – 100 кГц)	50.00 Гц 500.0 Гц 5.000 кГц 50.00 кГц 100.0 кГц	0.01 Гц 0.1 Гц 0.001 кГц 0.01 кГц 0.1 кГц	0.1 % + 3
Скважность	1 % to 99 %	0.1 %	1 % typical
Переменный ток, мкА (40 Гц - 400 Гц)	400.0 мкА 4000 мкА	0.1 мкА 1 мкА	1.5 % + 3
Переменный ток, мА (40 Гц -400 Гц)	40.00 мА 400.0 мА	0.01 мА 0.1 мА	1.5 % + 3
Переменный ток, А (40 Гц -400 Гц)	4.000 А 10.00 А	0.001 А 0.01 А	1.5 % + 3
Постоянный ток, мкА	400.0 мкА 4000 мкА	0.1 мкА 1 мкА	1.5 % + 3
Постоянный ток, мА	40.00 мА 400.0 мА	0.01 мА 0.1 мА	1.5 % + 3
Постоянный ток, А	4.000 А 10.00 А	0.001 А 0.01 А	1.5 % + 3
Температура	50 °С- 400 °С 0 °С- 50 °С -55 °С- 0 °С	0.1С	2 % ± 1 °С ± 2 °С 9 % ± 2 °С
Подсветка	-	-	есть
Параметр	Значения		
Общие характеристики			
Максимальное напряжение между любым терминалом и заземлением	1000 В		

Функция	Диапазон	Разрешение	Точность
Дисплей (LCD)	4000 отчетов, обновления 3/сек		
Тип батареи	2 AA, NEDA 15A, IEC LR6		
Время работы от батареи	500 часов минимум (50 часов в режиме теста диодов без нагрузки. Время с нагрузкой, зависит от типа светодиодных стадий тестирования.)		
Температура			
Рабочая	0 °C to 40 °C		
Хранения	-30 °C to 60 °C		
Относительная влажность			
Влажность при эксплуатации	Без образования конденсата (<10°C) ≤90% RH от 10 °C до 30 °C; ≤75% RH от 30 °C до 40 °C		
	40 MΩ диапазон ≤80% RH от 10 °C до 30 °C; ≤70% RH от 30 °C до 40 °C		
Высота			
Рабочая	2000 m		
Хранения	12,000 m		
Температурный коэффициент	0.1 X (указанная точность) /°C (<18 °C or >28 °C)		
Предохранитель для токовых входов	440 mA, 1000 V быстрый предохранитель 11A, 1000V быстрый предохранитель		
Габаритные размеры (ВхШхД)	183 x 91 x 49.5 мм		
Вес	455 г		
IP rating	IP 40		

Функция	Диапазон	Разрешение	Точность
Безопасность	IEC 61010-1, IEC61010-2-030 CAT III 600 В, CAT II 1000 В, Pollution Degree 2		
Электромагнитная обстановка	IEC 61326-1: портативный		

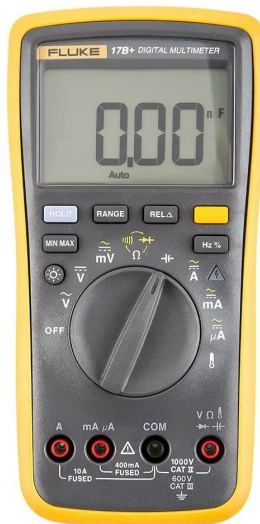


Рисунок 36 – Цифровой мультиметр Fluke 17B+

### 2.3.2 Люксметр цифровой eЛайт-мини

Для измерения параметров освещённости был использован цифровой люксметр eЛайт-мини (рисунок 37) с техническими характеристиками, представленными в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики цифрового люксметра eЛайт-мини

Параметр	Значение
Диапазон измеряемой освещённости	1 ... 200 000 лк
Относительная погрешность определения освещённости	8 %
Напряжение питания: - встроенного аккумулятора - внешнего источника питания	3,6 ... 4,2 В 4,5 ... 5.5 В
Ток потребления: - от встроенного аккумулятора:	не более 30 мА

Параметр	Значение
- от внешнего источника питания:	не более 200 мА
Время непрерывной работы на одной зарядке встроенного аккумулятора	не менее 8 часов
Время зарядки встроенного аккумулятора	не более 6 часов
Время установления рабочего режима после включения	не более 5 сек.
Наработка на отказ	10000 часов
Срок службы	10 лет
Рабочий диапазон температур	-20 ... +50 °С
Относительная влажность при нормальной температуре	не более 90 %
Атмосферное давление	84 ... 106 кПа
Габаритные размеры	100 x 18 x 42 мм
Масса	не более 50 г



Рисунок 37 – Люксметр цифровой еЛайт-мини

### 2.3.3 Галогенные лампы Uniel GU5.3

Для создания заданных условий освещённости был создан лабораторный испытательный стенд, в котором использованы четыре

галогенные лампы Uniel GU5.3 (рисунок 38) с техническими характеристиками, представленными в таблице 6.

Таблица 6 – Технические характеристики лампы галогенной Uniel GU5.3

Параметр	Значение
Отделка стекла	Прозрачный
Температура цвета (в К)	3000
Световой поток (Лм)	430
Гарантия (лет)	0
Мощность (Вт)	35
Технология	Галогенный
Напряжение (В)	12
Особенности продукта	Товар без особенностей



Рисунок 38 – Лампа галогенная Uniel GU5.3

#### **2.4 Установка и методика электрофоретического осаждения наночастиц серебра на приёмную поверхность ФЭП**

Нанесение наночастиц серебра на приёмную поверхность ФЭП осуществлялось при помощи установки электрофоретического осаждения (далее – ЭО) (рисунок 39), при разработке которой использовалась модель, разработанная на кафедре «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» МАИ (НИУ) [109].

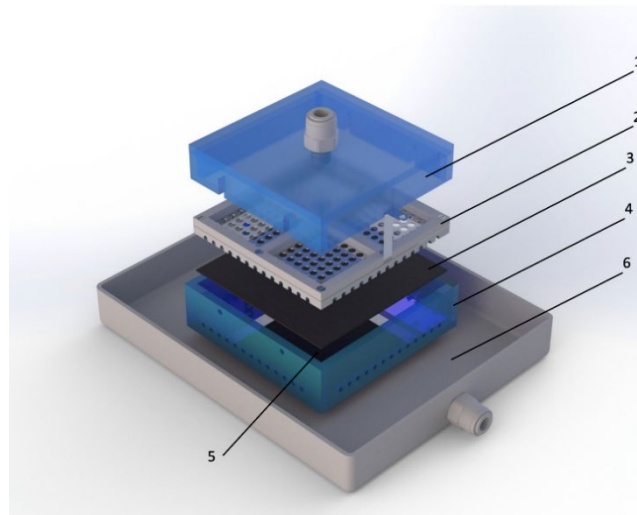


Рисунок 39 – Общий вид установки ЭО: 1 - верхняя прижимная крышка со штуцером; 2 - верхний электрод, зафиксированный в рамке из оргстекла; 3 - образец модифицируемого материала; 4 - основание; 5 - нижний электрод; 6 - поддон, накапливающий коллоидный раствор, с выводным штуцером

Основание (4) выполнено в виде коробки. Внутренняя часть основания (4) имеет форму и размеры ФЭП (3). Нижний электрод (5) установлен на нижней части основания. Контактный конец нижнего электрода проходит через боковую стенку основания; ФЭП (3) помещён на нижний электрод (5). Верхняя прижимная крышка (1) прижимает ФЭП к нижнему электроду и обеспечивает надёжный электрический контакт ФЭП с нижним электродом, а также служит для подачи раствора коллоидного серебра в рабочее пространство между электродами. Верхний электрод (2) прикреплён к верхней прижимной крышке (1) снизу. В верхнем электроде (2) имеется несколько сквозных отверстий для прохода коллоидного раствора серебра в рабочее пространство между электродами. Высота границы верхней прижимной крышки определяет расстояние между ФЭП и верхним электродом. Прижимная крышка (1) и основание (4) имеют несколько сквозных отверстий, через которые коллоидный раствор выливается в поддон (6), сливное отверстие в котором выполнено таким образом, что в зазоре между ФЭП и верхним электродом всегда будет находиться раствор коллоидного серебра, и он будет постоянно обновляться.

Кроме перечисленных составляющих установка содержит: лабораторный автотрансформатор регулируемый (ЛАТР), набор силиконовых трубок, насос с пластиковыми лопатками, ёмкость с коллоидным раствором.

Методика формирования нанокластерного покрытия на приёмной поверхности ФЭП следующая.

1. Взять немодифицированный ФЭП.
2. Выполнить его предварительную – протереть приёмную поверхность ФЭП нетканым полотенцем, предварительно смочив его спиртом.
3. Поместить фотоэлемент на нижний электрод из нержавеющей стали разработанной электрофоретической установки.
4. Накрыть конструкцию крышкой.
5. Включить насос и дождаться заполнения пространства между крышкой и основанием установки.
6. Подключить напряжение определённого значения. Зафиксировать время.
7. По прошествии заданного временного значения отключить напряжение и прекратить подачу раствора.
8. Дождаться, когда раствор стечёт из конструкции с специальную тару.
9. Поднять крышку.
10. Извлечь ФЭП.
11. Выполнить сушку фотоэлемента.

## **2.5 Установка и методика измерения обратного рассеяния лазерного излучения**

Современные методики контроля ФЭП, применяемые как при выходном, так и при входном контроле на производстве, осуществляемом перед сборкой и монтажом солнечных панелей, включают в себя в основном визуальный осмотр и измерение таких характеристик, как: напряжение холостого хода, вольт-амперная характеристика, ток короткого замыкания.

При визуальном осмотре ФЭП были обнаружены цветовые различия приёмных поверхностей ФЭП, в связи с чем была выявлена необходимость в разработке собственной методики контроля, позволяющей оценивать ФЭП как в изначальном состоянии (до модификации), так и после нанесения нанокластерного покрытия.

В связи с тем, что в настоящей работе рассматривается повышение выработки энергии ФЭП посредством нанесения на приёмную поверхность нанокластерного покрытия, было принято решение об использовании такого метода контроля, как измерение обратного рассеяния. Данный метод был выбран на основании его использования для контроля различных параметров нанопокровтий, в том числе толщины, однородности покрытия, а также дисперсных систем [119, 120].

Однако, существующие в настоящее время методики, основанные на методе измерения обратного рассеяния, не применяются для обнаружения наличия поверхностного плазмонного резонанса в покрытии из наночастиц, так как для этого необходимо вычисление определённого угла падения электромагнитного излучения, который, в свою очередь, зависит диэлектрической проницаемости всех материалов и эффективной диэлектрической проницаемости границы раздела [121-122].

### **2.5.1 Математическая модель использования метода обратного рассеяния для характеристики ФЭП**

При построении математической модели были использованы следующие начальные условия: плоская электромагнитная волна падает на проволочную решётку из серебра, расположенную на диэлектрической подложке с показателем преломления  $n_\beta$ . Постоянная решётки, или расстояние между проводами, равна  $d$ . Плоскополяризованная волна, проходящая через среду с показателем преломления  $n_\alpha$ , падает на решётку под углом  $\alpha$  в плоскости, перпендикулярной решётке (рисунок 40) [123].



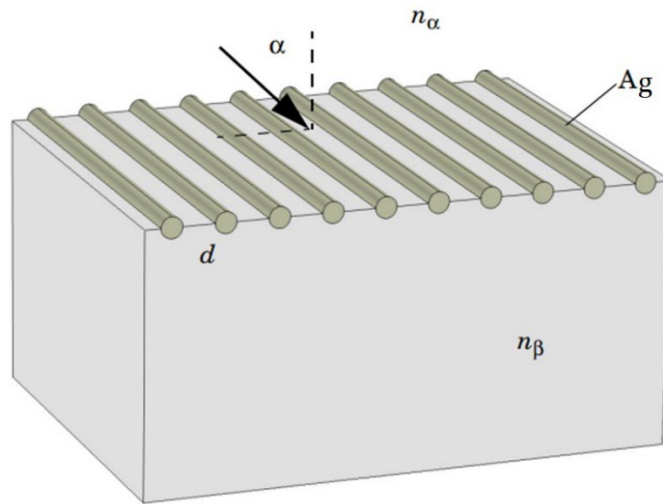


Рисунок 40 – Модель решётки на диэлектрики в предположении, что решётка состоит из бесконечного числа бесконечно длинных проволок

Если предположить, что длины волн достаточно малы по сравнению с постоянной решётки, то может присутствовать один или несколько порядков дифракции. На рисунке 41 представлена диаграмма с двумя путями лучей света, падающих на соседние решётки с разницей ровно в одну постоянную решётки. При этом длина оптического пути – это геометрическая длина пути, умноженная на локальный показатель преломления.

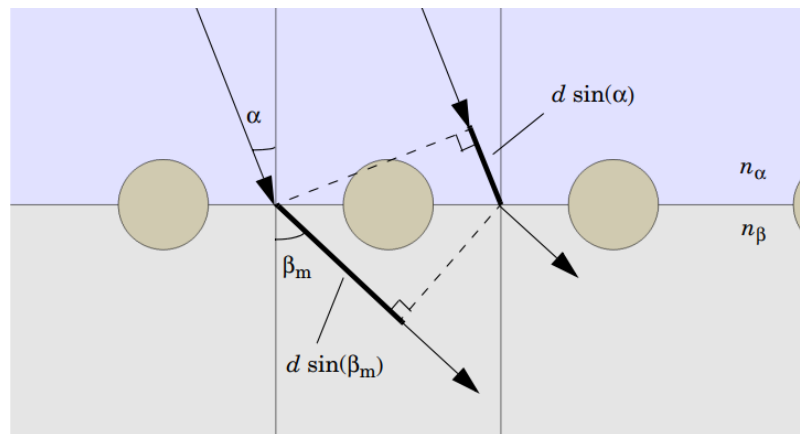


Рисунок 41 – Траектории двух параллельных путей света

Критерием положительной интерференции является то, что разница в длине оптического пути вдоль двух путей равна целому числу длин волн вакуума, или:

$$m\lambda_0 = d(n_\beta \sin \beta_m - n_\alpha \sin \alpha), \quad (9)$$

где  $\lambda_0$  – длина волны в вакууме;  $\beta_m$  – прошедший дифрагированный пучок порядка  $m$ ;  $m$  – порядок дифракции, равный  $0, \pm 1, \pm 2$ , т.д. При  $m = 0$  уравнение (9) сводится к преломлению, описанному законом Снелла:

$$\sin \beta_0 = \frac{n_\alpha}{n_\beta} \sin \alpha. \quad (10)$$

Поскольку синусоидальные функции могут изменяться только в пределах от -1 до 1, существование более высокого порядка дифракции требует, чтобы:

$$-(n_\alpha + n_\beta) < \frac{m\lambda_0}{d} < (n_\alpha + n_\beta). \quad (11)$$

Однако, в связи с тем, что моделирование охватывает только дифракцию первого порядка, оно действительно только при условии:

$$2\lambda_0 > d(n_\alpha |\sin \alpha| + n_\beta). \quad (12)$$

При помощи программного пакета COMSOL 5.5 были выполнены расчёты зависимости коэффициента обратного рассеяния от угла падения излучения определённых длин волн (рисунок 42) [124].

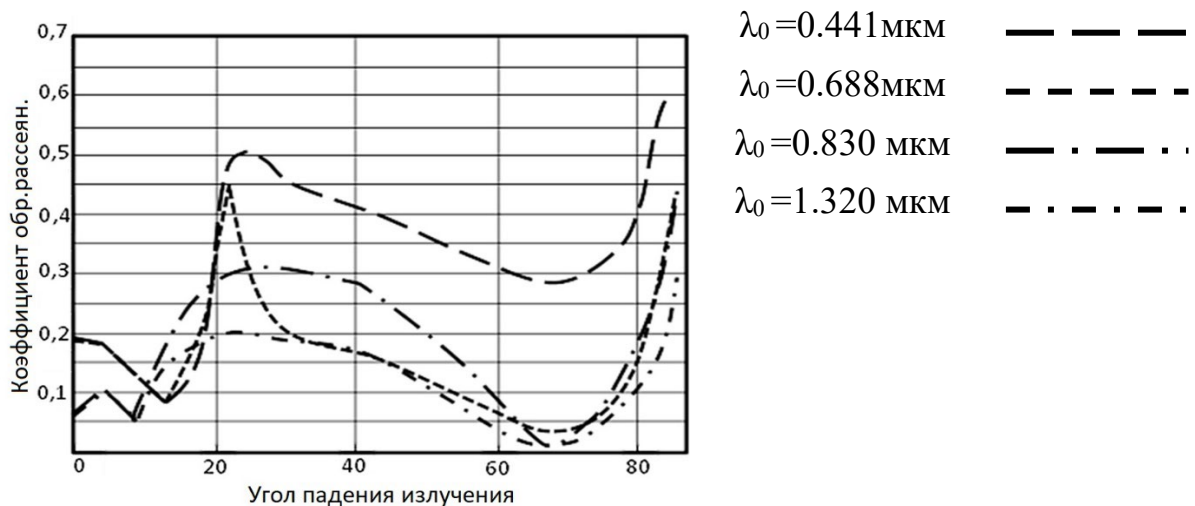


Рисунок 42 – Зависимость коэффициента обратного рассеяния от угла падения излучения

В связи с тем, что плазмон способствует значительному увеличению интенсивности как поглощённого, так и рассеянного излучений, был выбран диапазон углов падения излучения от 20 до 40 градусов.

На основании математической модели была разработана установка измерения обратного рассеяния.

### **2.5.2 Установка и методика измерения обратного рассеяния лазерного излучения**

Для измерения коэффициента обратного рассеяния была разработана установка измерения обратного рассеяния лазерного излучения в режиме реального времени (далее – ИОР), внешний вид которой представлен на рисунке 43. При разработке установки ИОР были использованы математическое моделирование, теоретические и экспериментальные исследования.



Рисунок 43 – Установка измерения обратного рассеяния лазерного излучения  
Установка ИОР состоит из оптического и электронного блоков.

Оптический блок содержит оптическую головку, которая состоит из основания, на котором установлены три источника излучения: полупроводниковые лазеры с длинами волн 0,83 мкм, 0,688 мкм и 1,32 мкм. На основании также расположены фотоприёмники, преобразующие интенсивность обратно рассеянного излучения в электрический сигнал: фотоприёмники типа ФДГ-100 для регистрации излучения лазера с  $\lambda = 1,32$  мкм и ФД-24К для регистрации излучения лазеров с длинами волн  $\lambda = 0,83$  мкм и  $\lambda = 0,688$  мкм. С обратной стороны основания на стойках установлены три печатные платы блока питания лазеров и плата приёмников. Платы закрыты кожухом, на крышке которого установлен штепсельный разъем.

Электронный блок включает: источник питания, блок управления и панель индикации. Имеется возможность подключения электронного блока к ПЭВМ по интерфейсу RS232. Конструктивно выполнен в виде трёх печатных плат блока управления, выполненных на микросхемах в климатическом исполнении для эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом (далее – УХЛ) по ГОСТ В 20.39, установленных в корпусе, панели индикации и клавиатуры. Блок питания обеспечивает питание прибора от сети переменного тока с напряжением 220В и частотой 50 Гц. Мощность, потребляемая от сети, не более 30 ВА. Панель индикации состоит из четырёх светодиодных индикаторов и цифро-синтезирующей жидкокристаллической матрицы на четыре знакоместа с подсветкой и предназначена для вывода цифровой и буквенной информации. Клавиатура электронного блока включает в себя:

– десять цифровых клавиш (0-9) для набора чисел – позволяют выбрать источник излучения в зависимости от требуемой длины волны (обозначаются номерами каналов 1, 2 и 3 для 0,688 мкм, 0,83 мкм, и 1,32 мкм, соответственно);

– клавишу «СБРОС», для выхода из любого режима работы;

– экран панели индикации;

– клавишу «Т» (сокращённо от «Test») – нажатие на данную клавишу обеспечивает выбор режима работы, характеризующийся считыванием полученного значения обратного рассеяния с того из фотоприёмников, который связан с выбранным для проведения исследования полупроводниковым лазером требуемой длины волны;

– клавишу «Е» (сокращённо от «Enter») – нажатие на эту клавишу подтверждает выбор полупроводникового лазера требуемой длины волны (обозначаются на дисплее номерами каналов 1, 2 и 3 для 0,688 мкм, 0,83 мкм, и 1,32 мкм, соответственно), обеспечивает начало измерения в выбранном режиме работы и прекращение измерения.

Выполненные на установке ИОР эксперименты подтвердили правильность построенной математической модели: коэффициент обратного рассеяния, полученный с приёмной поверхности ФЭП до нанесения наночастиц серебра, увеличился после нанесения покрытия в несколько раз (таблица 7).

Таблица 7 – Значения коэффициентов обратного рассеяния приёмной поверхности ФЭП до и после нанесения нанокластерного покрытия для длины волны 0,688 мкм

До нанесения покрытия	После нанесения покрытия
21	66
83	260
25	48

Методика измерения коэффициента обратного рассеяния следующая:

1. Взять изначальный, немодифицированный образец.
2. Подготовить образец для измерения коэффициента обратного рассеяния, выполнив его предварительную очистку – протереть приёмную поверхность ФЭП нетканым полотенцем, предварительно смочив его спиртом.
3. Включить установку ИОР.
4. Нажать на клавишу «Т» для выбора режима работы «Test».
5. Дождаться установки нуля.

6. Поместить подготовленный образец на предметный столик таким образом, чтобы сторона, для которой будет измеряться коэффициент обратного рассеяния, была обращена к источникам излучения.

7. Указать номер канала 1 для использования лазера с длиной волны 0,688 мкм.

8. Нажать на клавишу «Е».

9. Измерить значения коэффициента обратного рассеяния для трёх зон образца и заполнить соответствующие поля в форме, представленной на рисунке 44, в столбцах «До».

10. Вычислить среднее значение полученных коэффициентов.

Длина волны	Измерения по левому краю	Измерения в середине	Измерения по правому краю	Среднее значение
	Образец №			
	До			
0.68 нм				
0.83 нм				
1.32 нм				
	После			
0.68 нм				
0.83 нм				
1.32 нм				

Рисунок 44 – Деление образца на зоны

11. Нажать на клавишу «Е».

12. Повторить этапы 7-11 для каналов 2 и 3 (для лазеров с длиной волны 0,83 мкм и 1,32 мкм, соответственно).

13. Убрать измеряемый образец.

14. Выключить установку ИОР.

После того, как было выполнено модифицирование приёмной поверхности ФЭП, повторить описанную выше методику. Сравнить полученные значения коэффициентов обратного рассеяния до и после нанесения нанокластерного покрытия (в зависимости от необходимой детализации сравниваются либо все значения, либо только средние).

## 2.6 Выводы

При выполнении диссертационной работы были использованы 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.

В процессе исследований применяли:

- стандартное научно-исследовательское, технологическое оборудование, контрольно-измерительную аппаратуру и соответствующие им методики;
- коллоидный раствор серебра, полученный на установке синтеза наночастиц металлов (УСНМ), в основе работы которой лежит принцип электроимпульсного диспергирования металлов;
- разработанный нами лабораторный стенд для фотоэлектрических испытаний;
- разработанная нами установка электрофоретического осаждения (ЭО), предназначенная для нанесения покрытий из наночастиц на поверхность модифицируемого материала в статическом режиме;
- разработанная нами установка для измерения обратного рассеяния лазерного излучения в режиме реального времени (далее – ИОР).

Для регламентации подходов при проведении исследований на созданном нами оборудовании, были разработаны соответствующие методики. При выполнении работы было задействовано численное математическое моделирование.

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

Результаты исследования, представленные в данной главе, были освещены в [125-143].

#### **3.1 Характеризация ФЭП в исходном состоянии**

Визуальный осмотр ФЭП выявил наличие цветовых и геометрических различий, что показано на рисунке 45. Под данными характеристиками подразумеваются в данной работе:

– цветовые характеристики – цвет приёмной поверхности ФЭП – зависит от типа ФЭП и химического состава защитного/антиотражающего покрытия. В на поглощающую и отражающую способности ФЭП;

– геометрические характеристики – площадь ФЭП – зависит от используемого при производстве оборудования. Влияет на размер приёмной поверхности ФЭП, расположение проводников (второе особенно важно, так как при соединении их в солнечную панель влияет на расположение проводов).

В связи с этим было принято решение о необходимости использования не только стандартной методики характеризации ФЭП, заключающейся в измерении напряжения холостого хода, которое позволяет оценить выработку энергии ФЭП при освещении его источником излучения и отсутствии нагрузки, но и о выполнении дополнительных измерений:

- площади ФЭП;
- обратного рассеяния.

Измерение обратного рассеяния с вычислением коэффициента обратного рассеяния является разработанной в рамках выполнения настоящего



исследования методикой. Данная методика позволяет оценить качество (однородность) приёмной поверхности ФЭП, получить начальные значения, характеризующие способность приёмной поверхности ФЭП рассеивать обратно электромагнитное излучение, а также подтвердить/опровергнуть возможность возникновения поверхностного плазмонного резонанса при наличии на приёмной поверхности ФЭП нанокластерного покрытия.

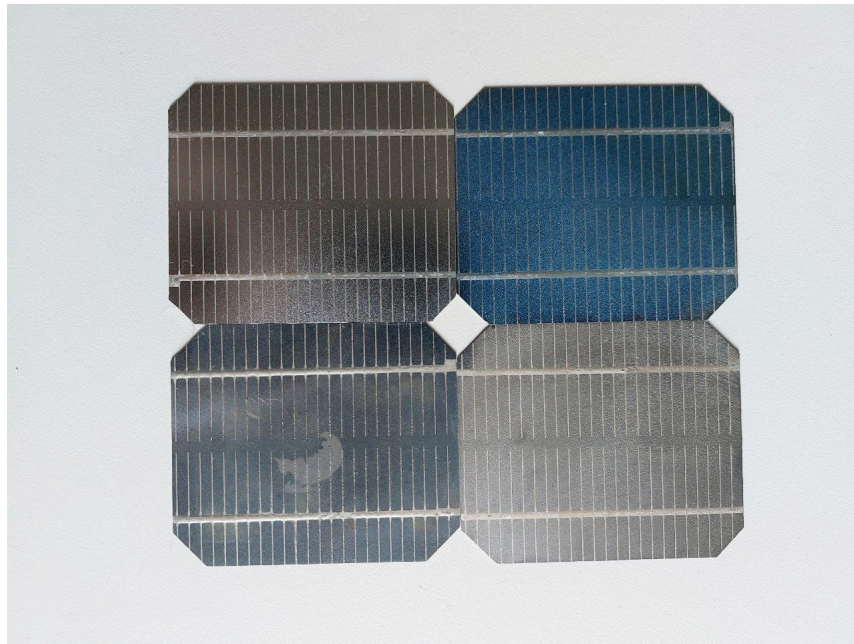


Рисунок 45 – Монокристаллические ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

Полученные в результате проведения измерений данные были проанализированы при помощи программы «Minitab» [144] на предмет их соответствия нормальному закону распределения. Для проверки гипотезы об отсутствии различий между наблюдаемым распределением данных и теоретически ожидаемым нормальным распределением Гаусса был использован критерий Шапиро-Уилка. Данный критерий наилучшим образом выявляет различия между распределениями в тех случаях, когда они действительно есть, в отличие от других распространённых критериев нормальности [145]. Также условием выбора данного критерия была ограниченность выборки (количество измерений менее 50).

Критериями, позволяющими определить нормальность, являются:

– вероятность ошибки P-Value – если значение более 0,05, то данная выборка соответствует нормальному закону распределения;

– критерий Шапиро-Уилка (в программе «Minitab» обозначается как RJ, так как расчёт производится на основании критерия Ryan-Joiner, аналогичного критерию Shapiro-Wilk) – если значение равно 1, то данная выборка соответствует нормальному закону распределения.

Для каждого из выявленных параметров, влияющих на служебные свойства, и каждого из видов фотоэлементов было построено два вида графиков:

– гистограмма данных, полученных в результате измерения определённого параметра фотоэлемента, и линия, являющаяся теоретической нормальной кривой Гаусса (ось x – значение площади приёмной поверхности, y – количество фотоэлементов);

– нормально-вероятностный график, где точки соответствуют измеренным значениям определённого параметра фотоэлемента, а прямая линия – нормальному распределению (ось x – значение площади приёмной поверхности, y – процентиль).

### **3.1.1 Измерение напряжения холостого хода**

Измерение напряжения холостого хода измерялось при помощи лабораторного стенда для фотоэлектрических испытаний. Результаты представлены на рисунках 46 - 55.

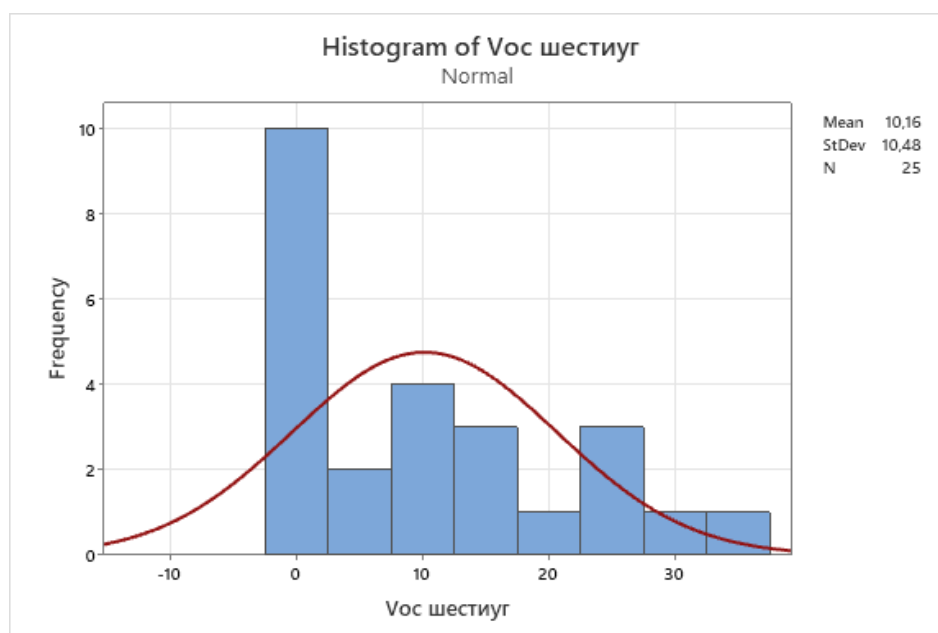


Рисунок 46 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 25 монокристаллических ФЭП шестиугольной формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

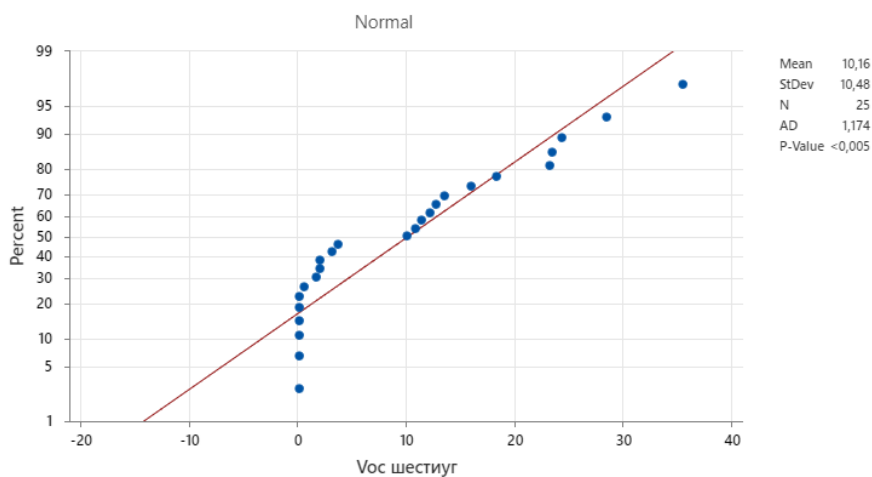


Рисунок 47 – Нормально-вероятностный график для 25 монокристаллических ФЭП шестиугольной формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

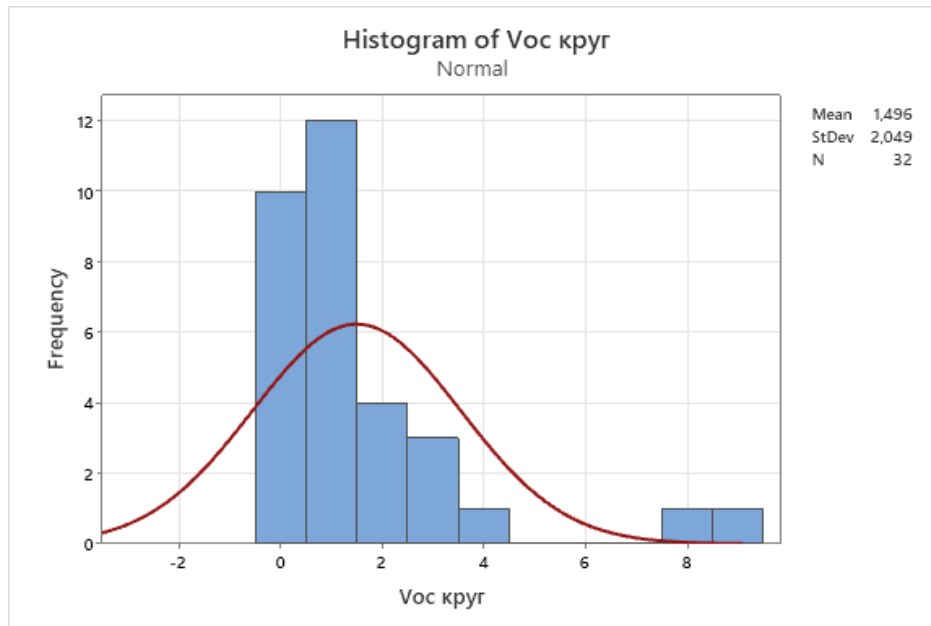


Рисунок 48 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 32 монокристаллических ФЭП круглой формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

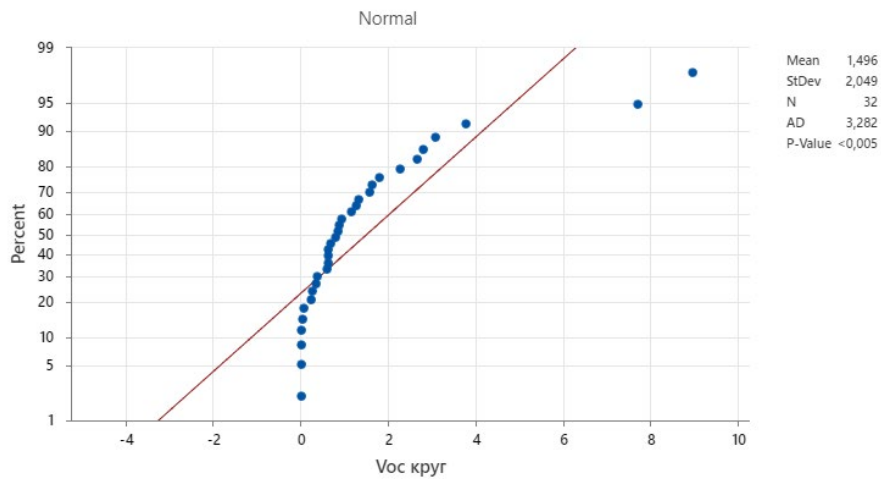


Рисунок 49 – Нормально-вероятностный график для 32 монокристаллических ФЭП круглой формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

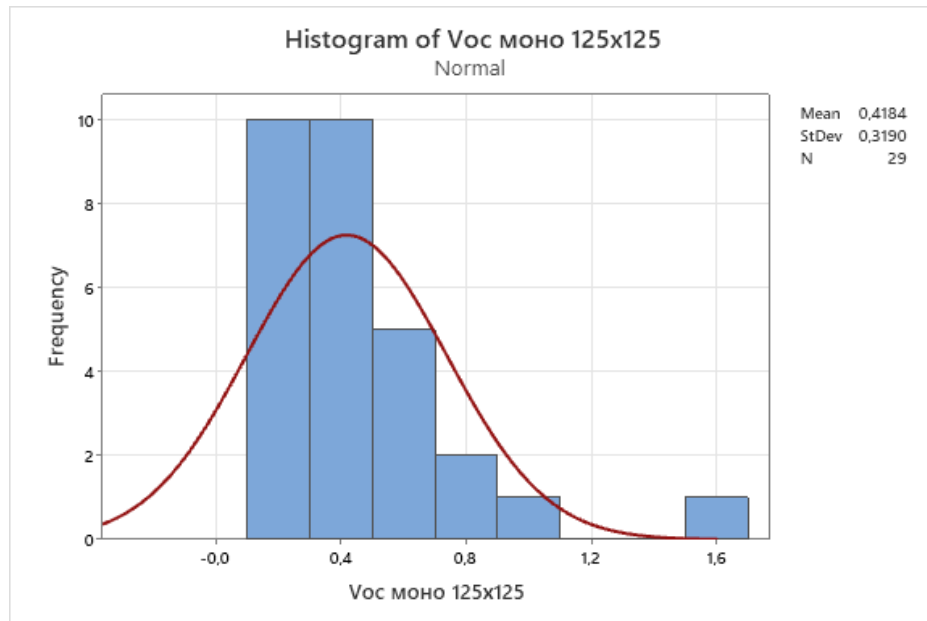


Рисунок 50 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 29 монокристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

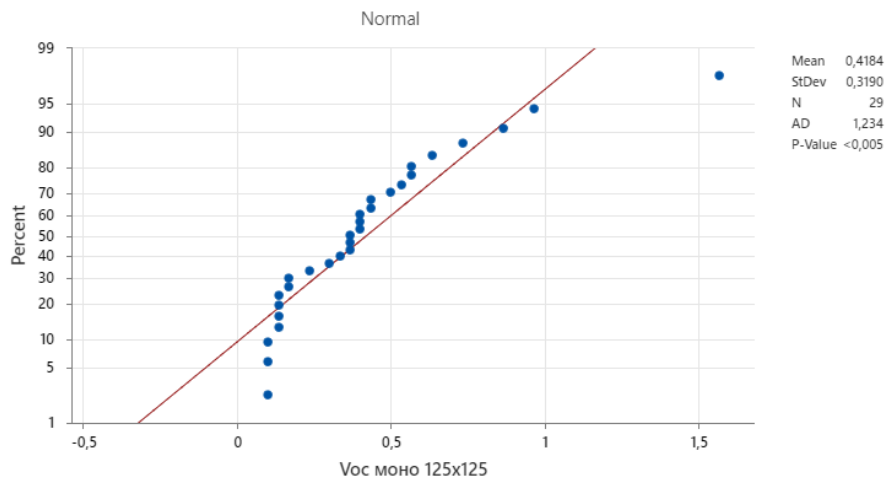


Рисунок 51 – Нормально-вероятностный график для 29 монокристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

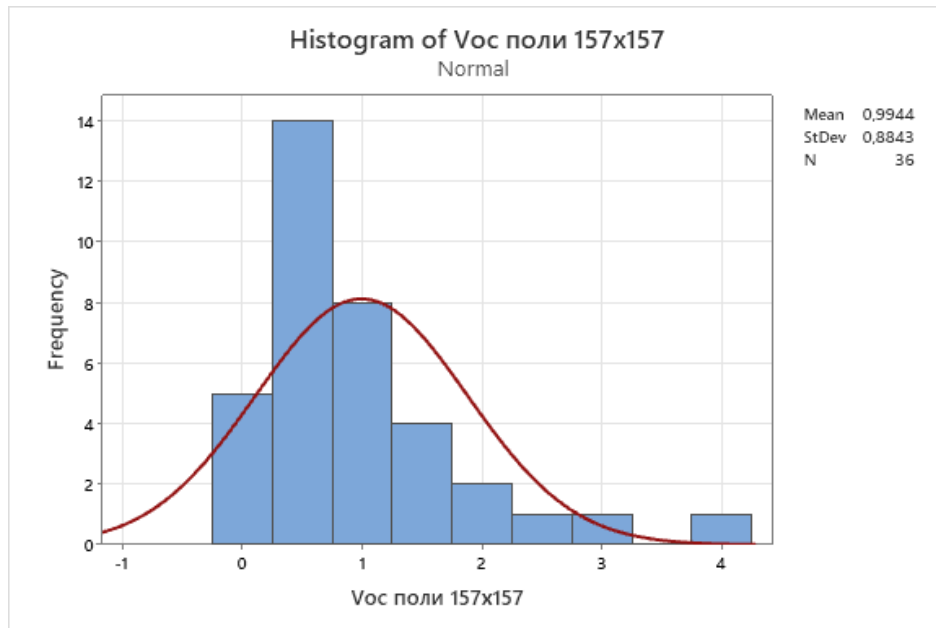


Рисунок 52 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 36 поликристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

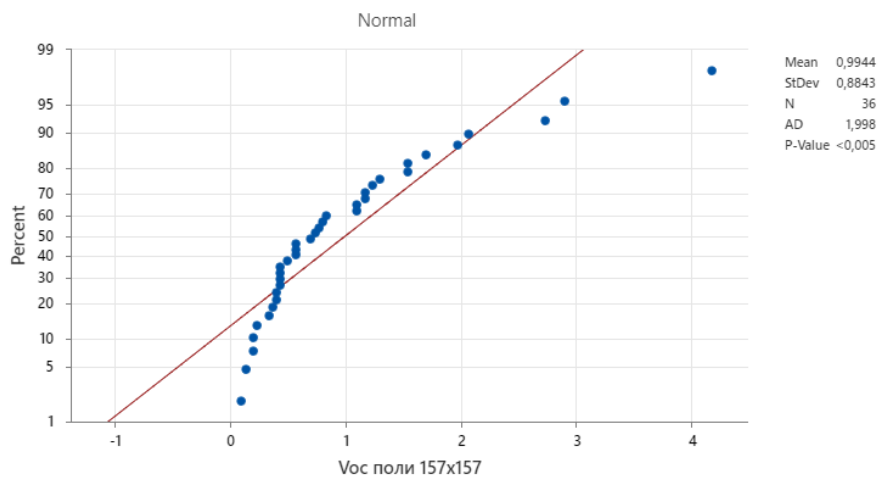


Рисунок 53 – Нормально-вероятностный график для 36 поликристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

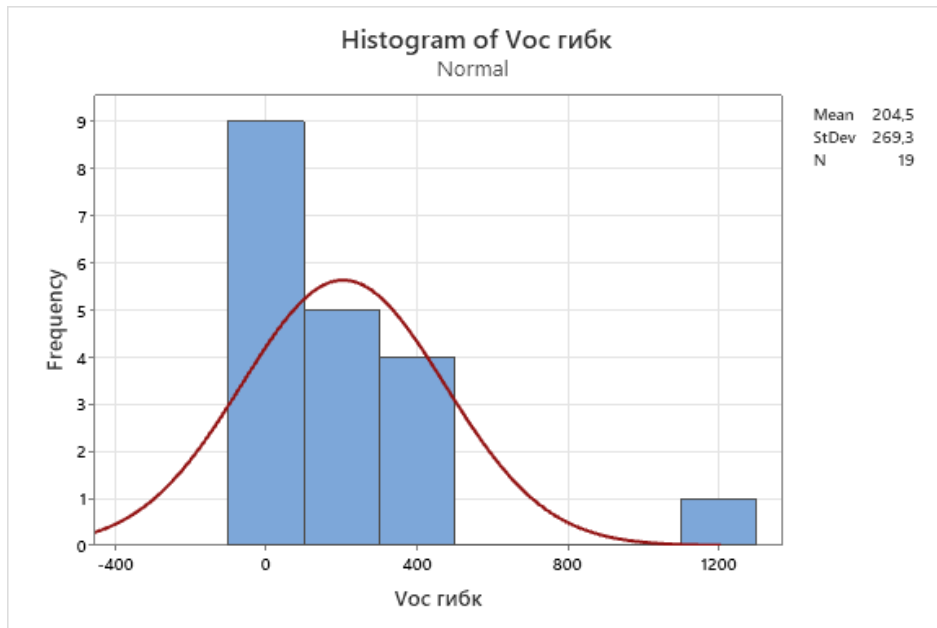


Рисунок 54 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 19 аморфных ФЭП производства фирмы Lich (Китай)

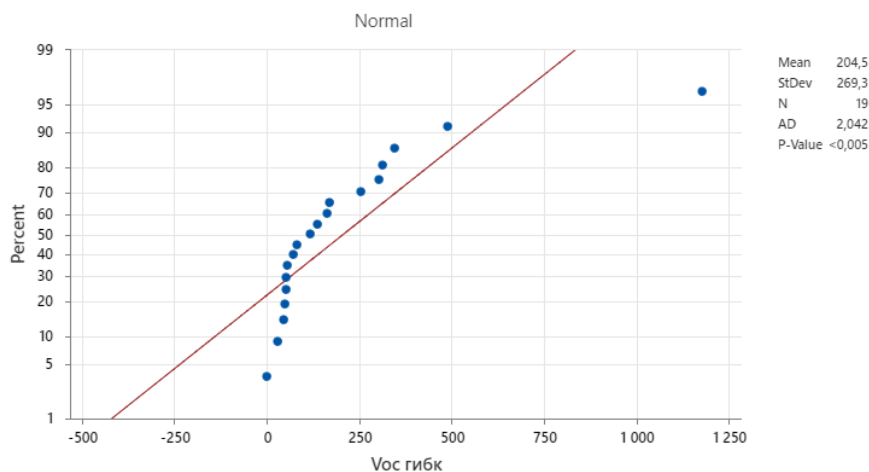


Рисунок 55 – Нормально-вероятностный график для 19 аморфных ФЭП производства фирмы Lich (Китай)

Как видно из представленных рисунков, измеренные значения холостого хода для всех ФЭП не могут подтвердить гипотезу о нормальности распределения. Следовательно, налицо дефицит информации для принятия решения относительно использования или выбраковки данных преобразователей. Также недостаточно оснований о необходимости корректировки технологического процесса их изготовления. Это свидетельствует о необходимости измерения дополнительных параметров, более полно характеризующих объект.

### 3.1.2 Измерение площади ФЭП

Для измерения площади были использованы штангенциркуль и линейка металлическая.

Результат приведён на рисунках 56 - 65.

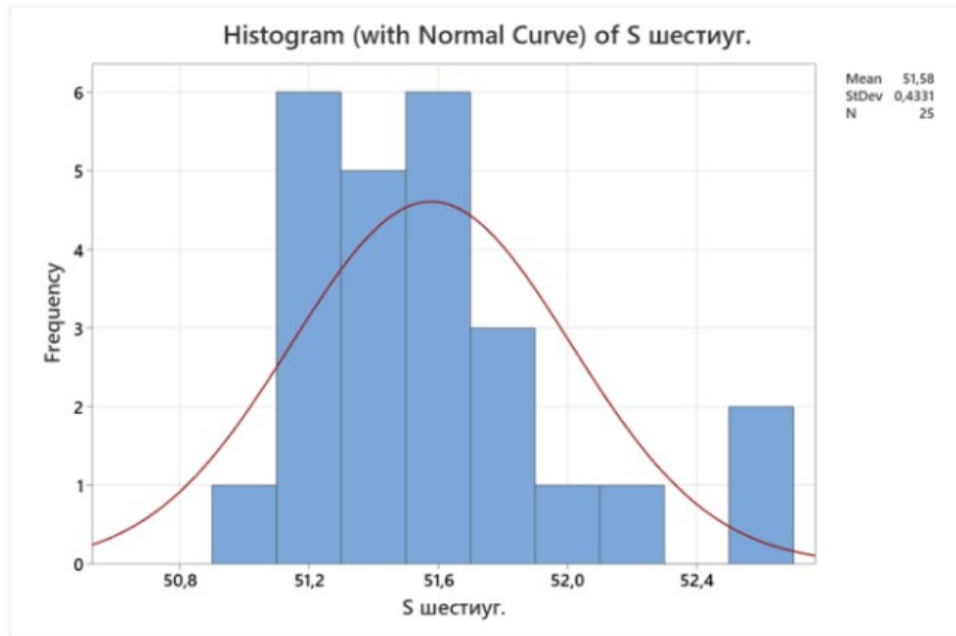


Рисунок 56 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 25 монокристаллических ФЭП шестиугольной формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

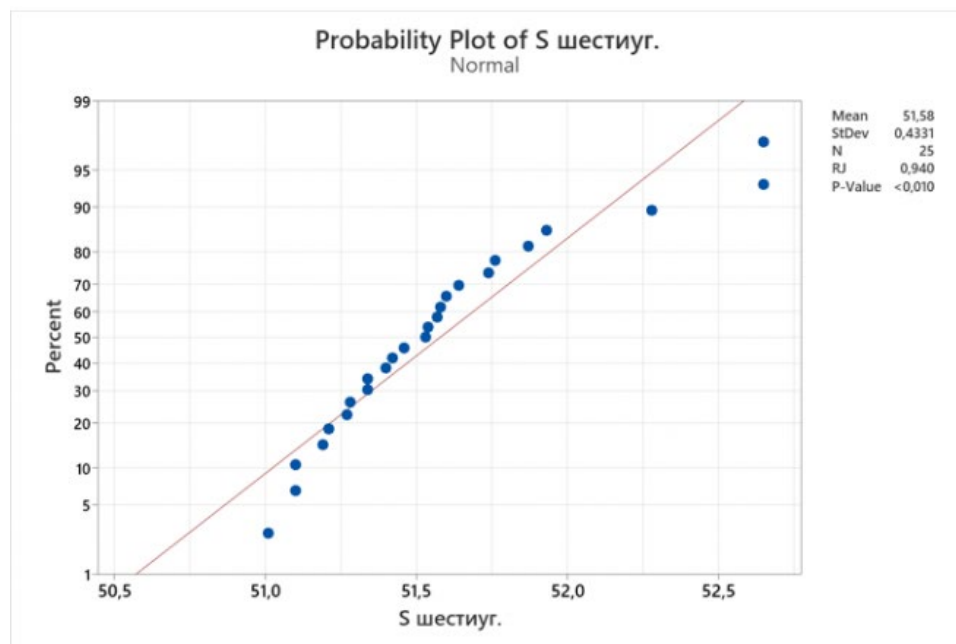


Рисунок 57 – Нормально-вероятностный график для 25 монокристаллических ФЭП шестиугольной формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»



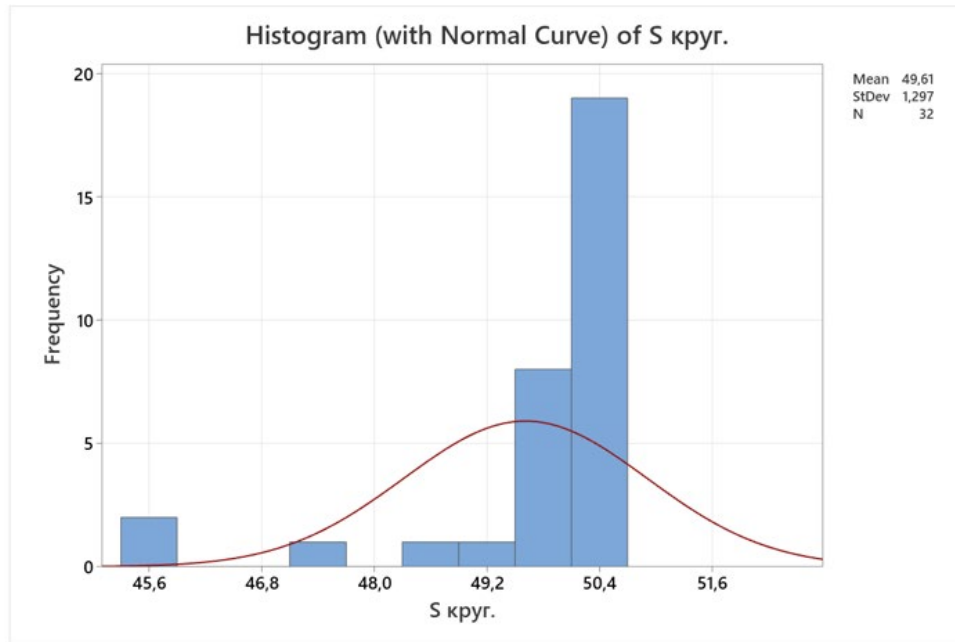


Рисунок 58 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 32 монокристаллических ФЭП круглой формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

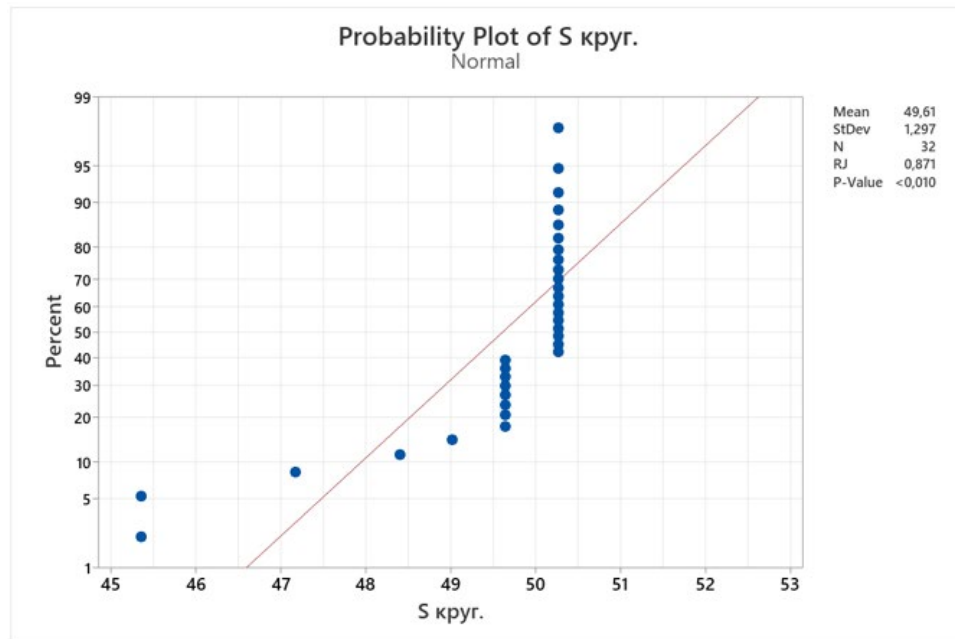


Рисунок 59 – Нормально-вероятностный график для 32 монокристаллических ФЭП круглой формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

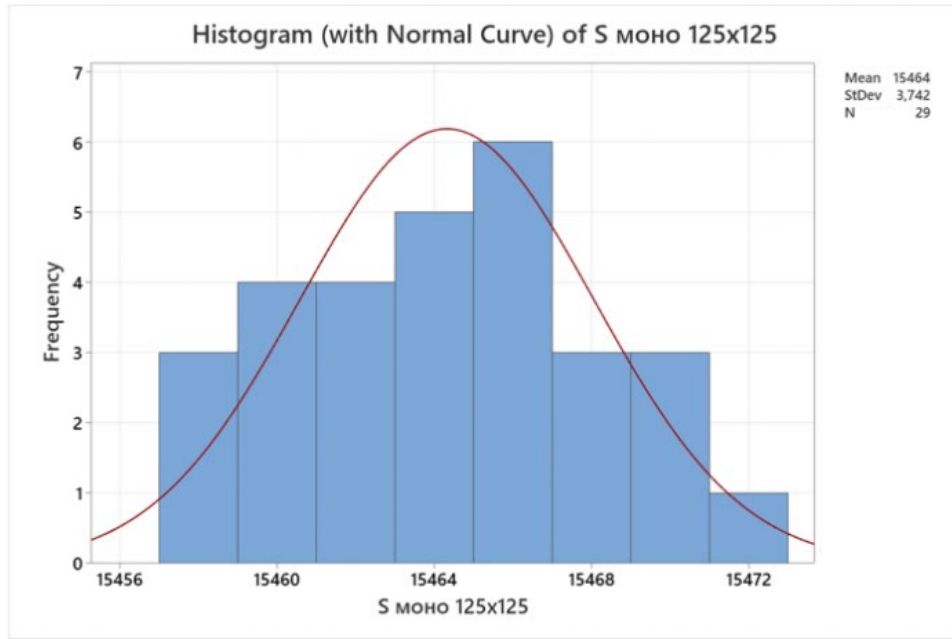


Рисунок 60 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 29 монокристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

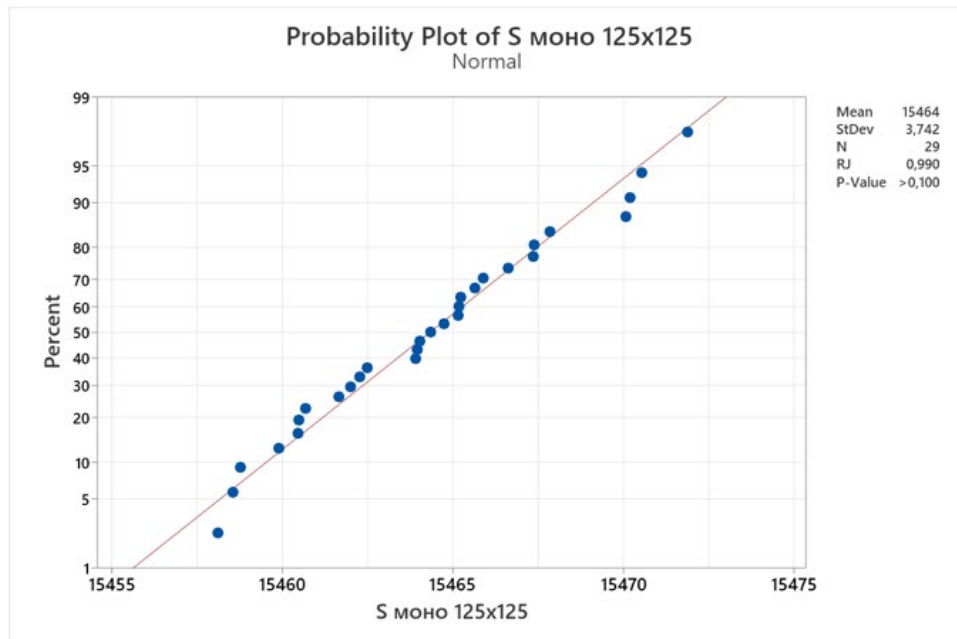


Рисунок 61 – Нормально-вероятностный график для 29 монокристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

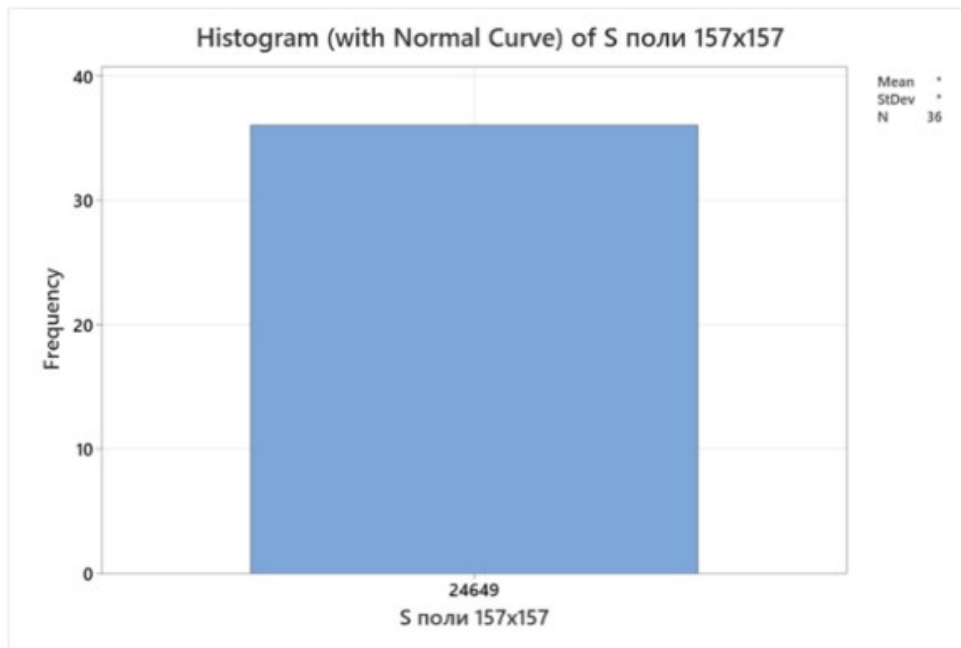


Рисунок 62 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 36 поликристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

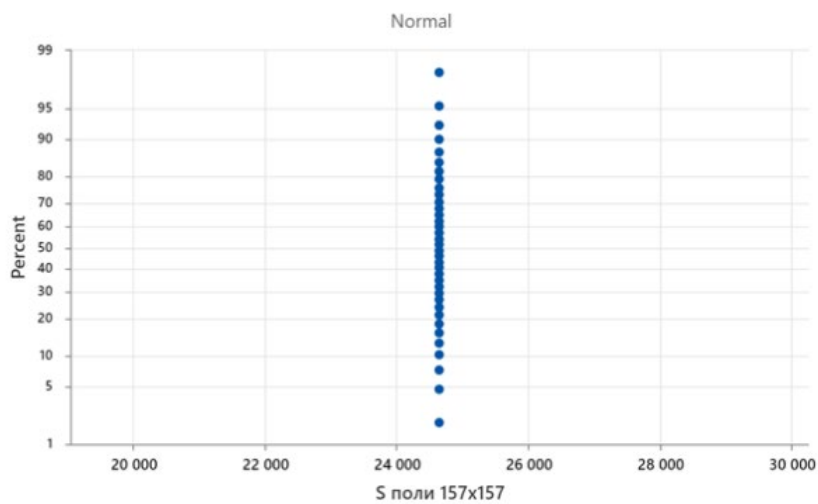


Рисунок 63 – Нормально-вероятностный график для 36 поликристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

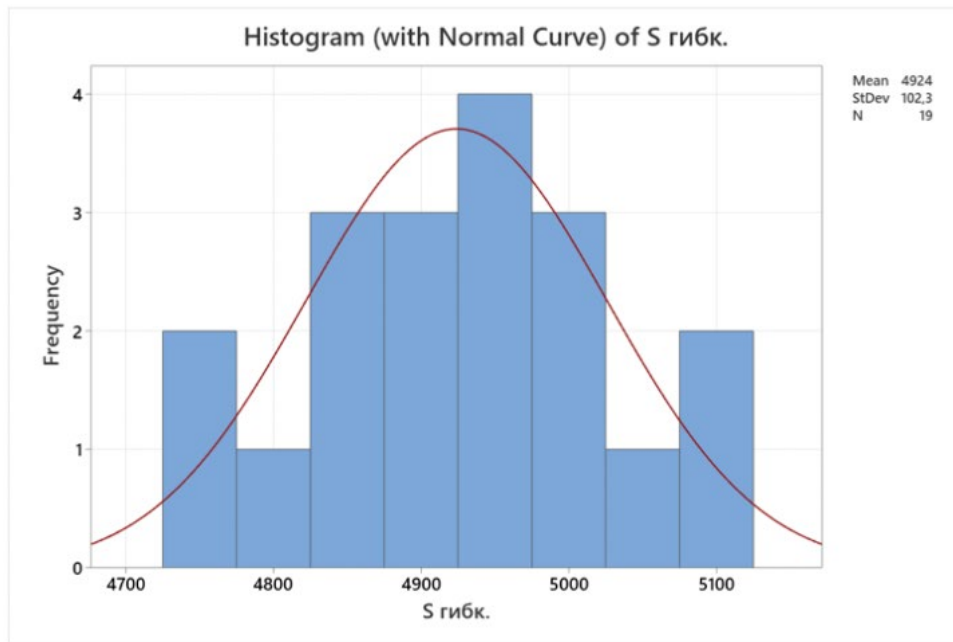


Рисунок 64 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 19 аморфных ФЭП производства фирмы Lich (Китай)

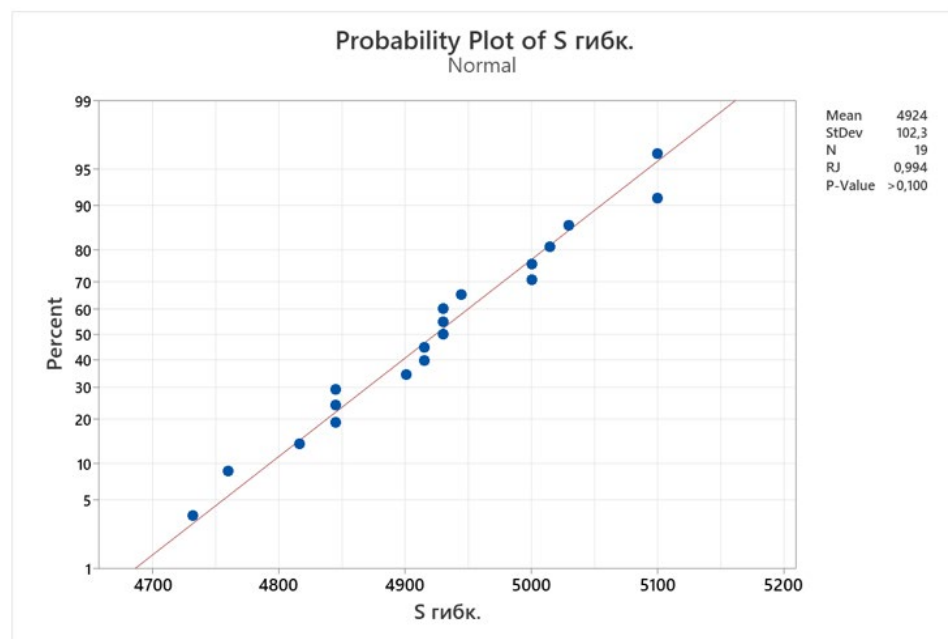


Рисунок 65 – Нормально-вероятностный график для 19 аморфных ФЭП производства фирмы Lich (Китай)

Как видно из представленных рисунков, измеренные значения площади ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ» не подтверждают гипотезу о нормальности, что говорит о необходимости корректировки процесса изготовления ФЭП.

Поликристаллические ФЭП производства фирмы Allmejores имеют одинаковый размер, в связи с чем гипотезу о нормальности применить

невозможно, однако это говорит об идеальном процессе изготовления ФЭП в части формирования пластин.

Значения площади монокристаллических ФЭП производства Allmejores Factory Store и аморфных ФЭП производства Lich Official Store подтверждают гипотезу о нормальности распределения, что говорит об отсутствии необходимости корректировки процесса изготовления ФЭП.

### 3.1.3 Измерение обратного рассеяния лазерного излучения

Измерение обратного рассеяния осуществлялось на установке ИОР, описанной в п. 2.5.2 настоящей работы по представленной в этом же пункте методике.

На рисунках 66 - 75 (где OS – сокращение от англ. backscattering – обратное рассеяние) представлены вычисленные средние значения коэффициентов обратного рассеяния, полученные при освещении полупроводниковым лазером с длиной волны  $\lambda = 0,688$  по трём точкам.

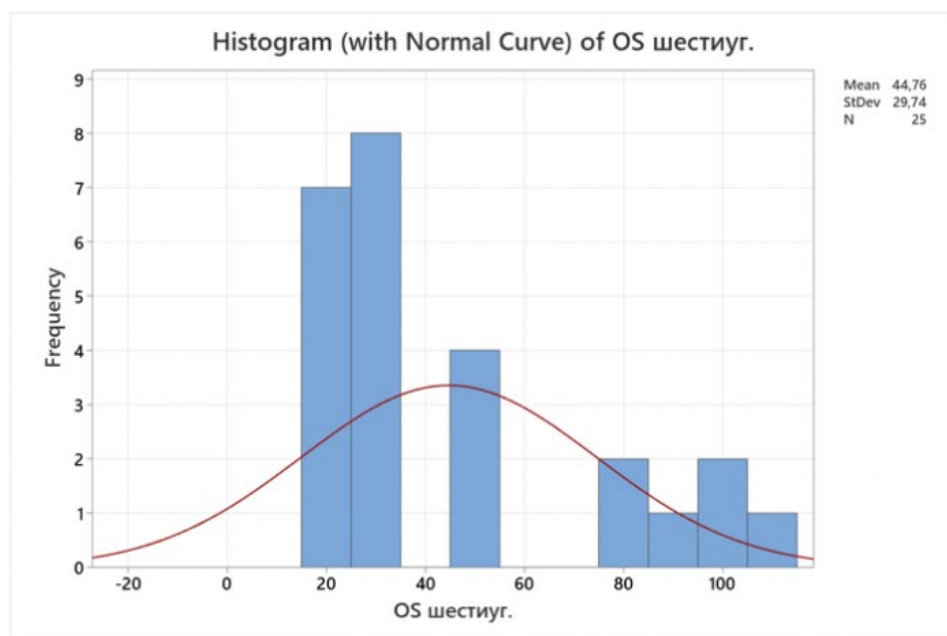


Рисунок 66 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 25 монокристаллических ФЭП шестиугольной формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

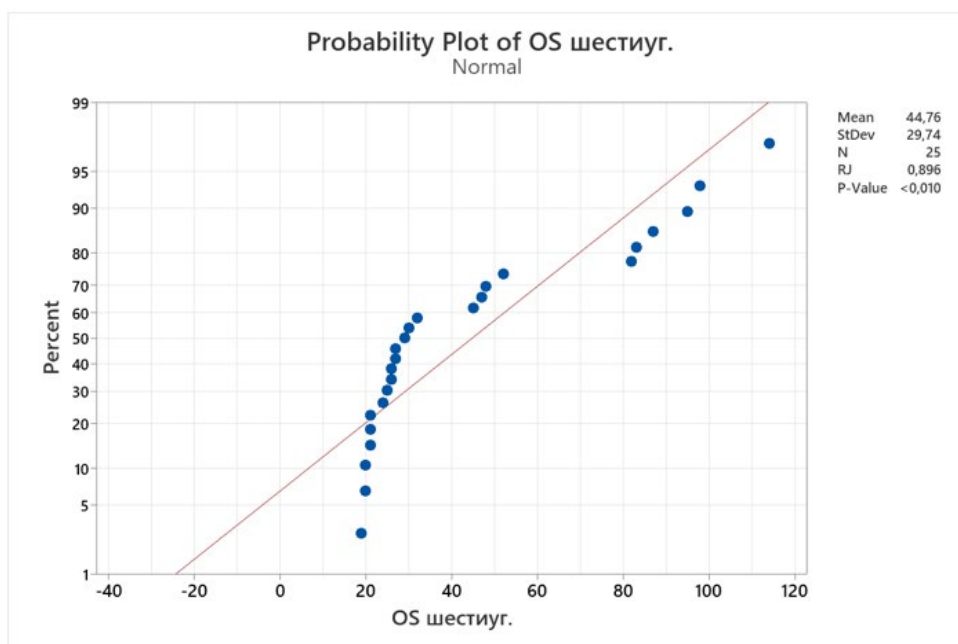


Рисунок 67 – Нормально-вероятностный график для 25 монокристаллических ФЭП шестиугольной формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

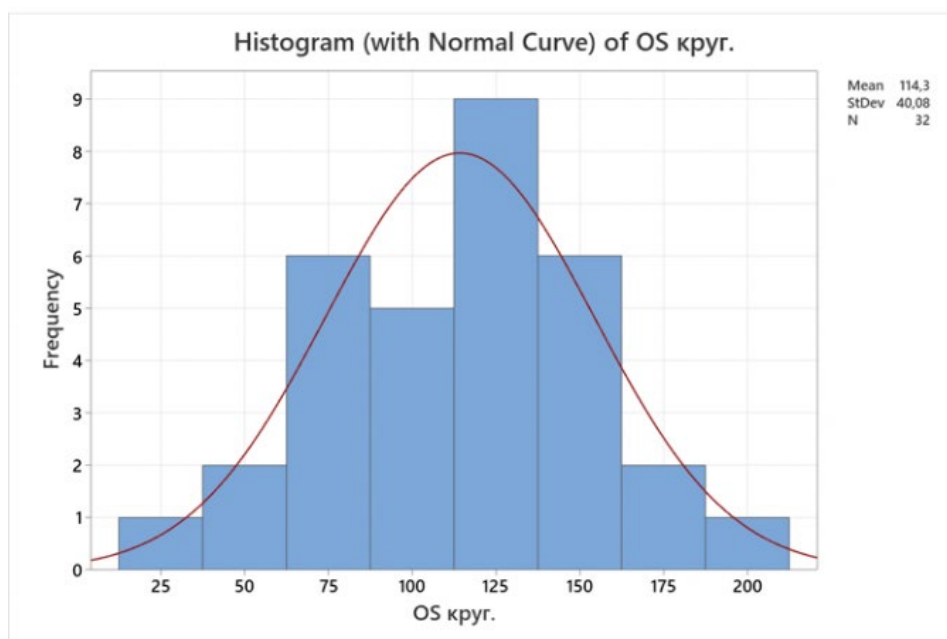


Рисунок 68 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 32 монокристаллических ФЭП круглой формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

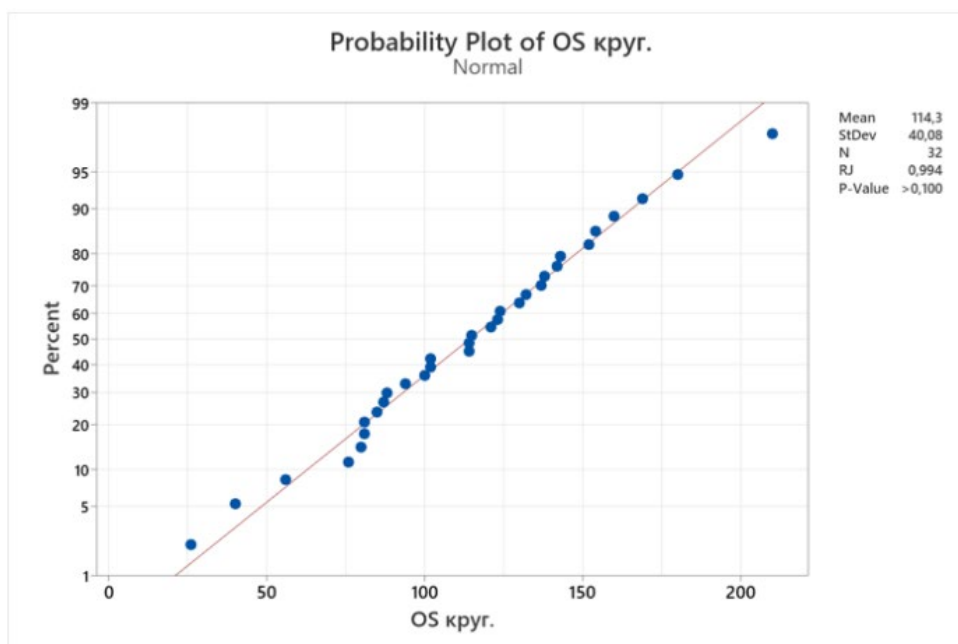


Рисунок 69 – Нормально-вероятностный график для 32 монокристаллических ФЭП круглой формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

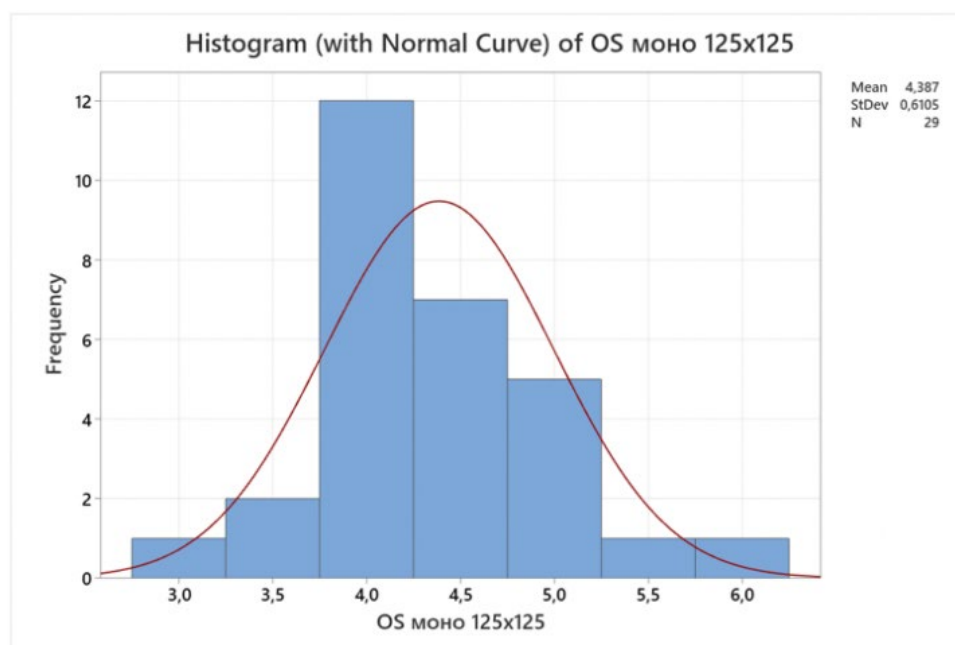


Рисунок 70 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 29 монокристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

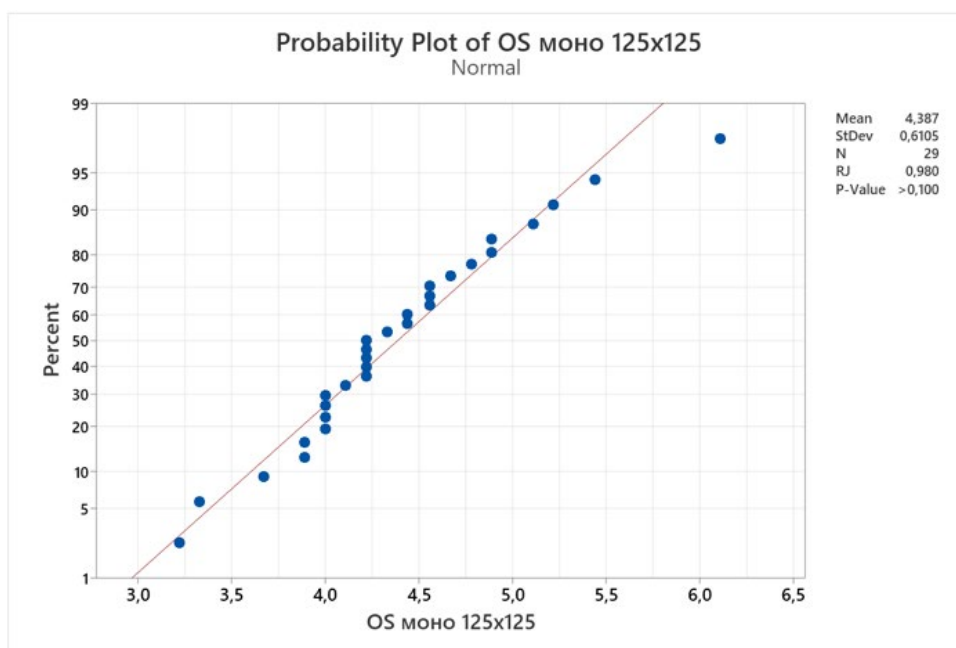


Рисунок 71 – Нормально-вероятностный график для 29 монокристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

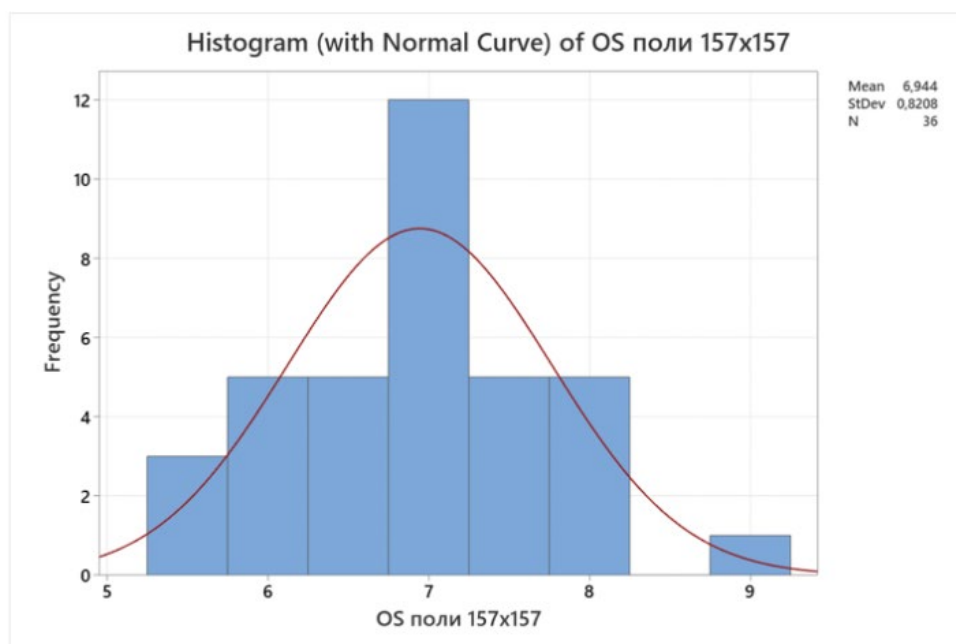


Рисунок 72 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 36 поликристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)



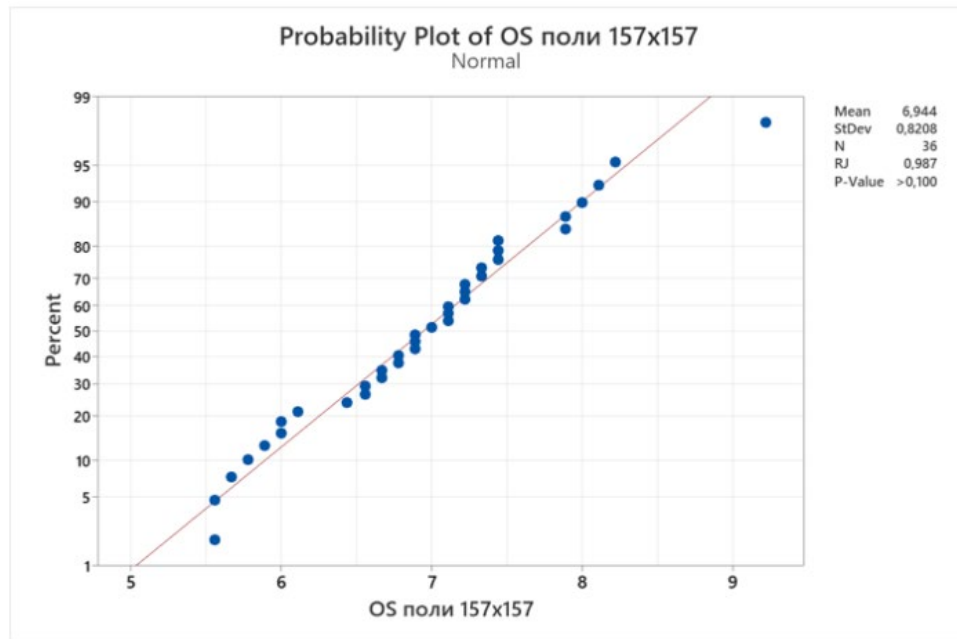


Рисунок 73 – Нормально-вероятностный график для 36 поликристаллических ФЭП производства фирмы Allmejores (Китай)

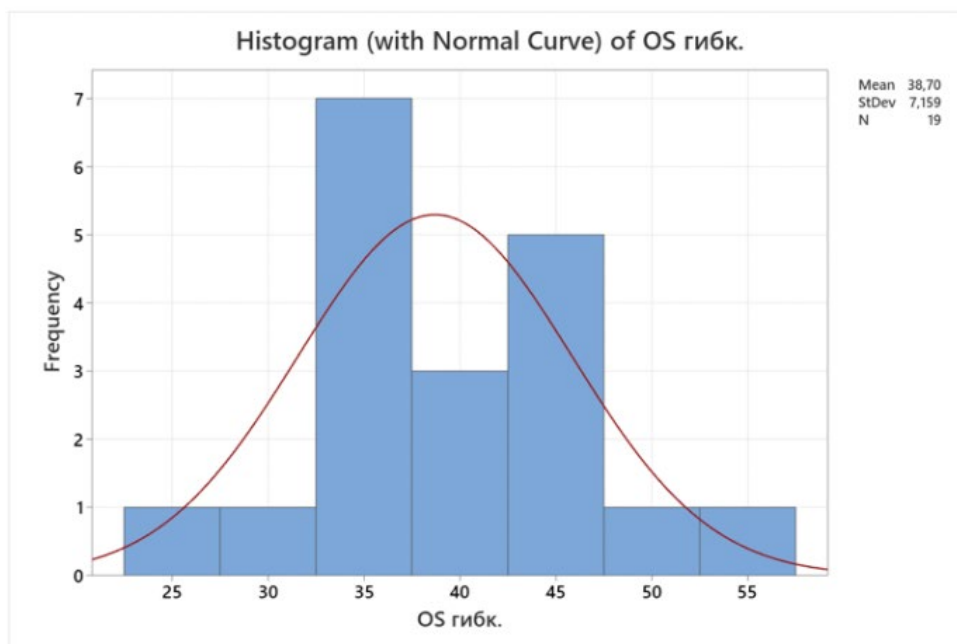


Рисунок 74 – График анализа нормальности распределения по Гауссу для 19 аморфных ФЭП производства фирмы Lich (Китай)

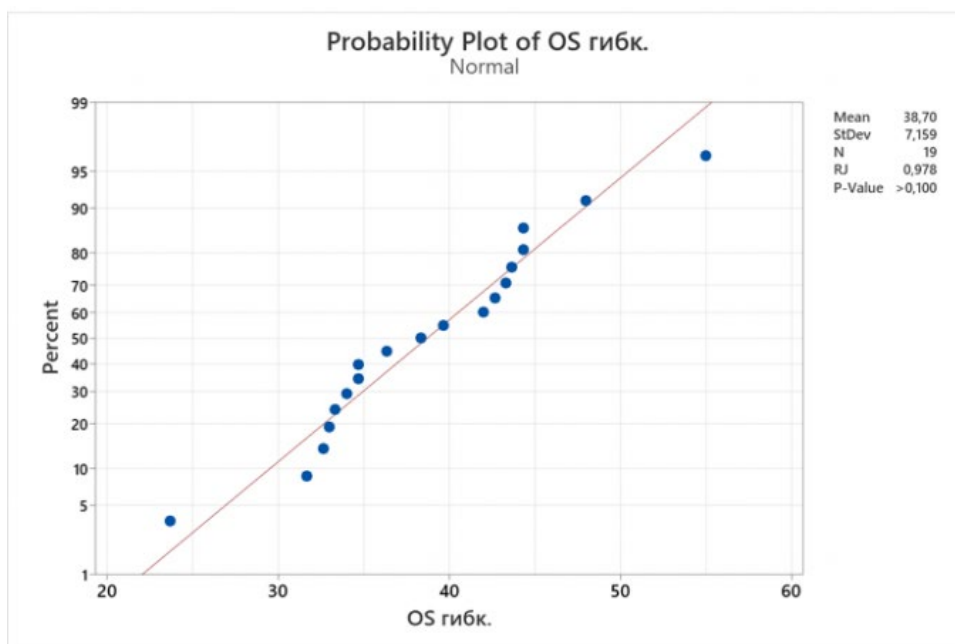


Рисунок 75 – Нормально-вероятностный график для 19 аморфных ФЭП производства фирмы Lich (Китай)

Как видно из представленных рисунков, значения коэффициентов обратного рассеяния ФЭП в большинстве случаев подтверждают гипотезу о нормальности.

Гипотеза о нормальности не подтверждается только для монокристаллических ФЭП шестиугольной формы производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ», что говорит о необходимости корректировки процесса изготовления ФЭП.

Таким образом, на основании выполненного тестирования можно принять аргументированное и достоверное решение как о качестве пластин, так и о процессе их производства (таблица 8).

Таблица 8 – Дефектная ведомость

Наименование ФЭП (производитель)	Характеризация ФЭП		
	Напряжение холостого хода	Площадь ФЭП	Обратное рассеяние
Монокристаллические ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ» шестиугольной формы	Не соответствует нормальному закону распределения	Не соответствует нормальному закону распределения	Не соответствует нормальному закону распределения
Монокристаллические ФЭП производства ОАО	Не соответствует нормальному	Не соответствует нормальному	Соответствует нормальному

Наименование ФЭП (производитель)	Характеризация ФЭП		
	Напряжение холостого хода	Площадь ФЭП	Обратное рассеяние
«ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ» круглой формы	закону распределения	закону распределения	закону распределения
Монокристаллические производства Allmejores Factory Store (Китай)	Не соответствует нормальному закону распределения	Соответствует нормальному закону распределения	Соответствует нормальному закону распределения
Поликристаллические производства Allmejores Factory Store (Китай)	Не соответствует нормальному закону распределения	Значения одинаковы, закон о нормальности не может быть проверен	Соответствует нормальному закону распределения
Аморфные (гибкие) производства Lich Official Store (Китай)	Не соответствует нормальному закону распределения	Соответствует нормальному закону распределения	Соответствует нормальному закону распределения

### 3.2 Исследование процесса нанесения наночастиц серебра на поверхность ФЭП

Для модификации приёмной поверхности ФЭП была использована установка для электрофоретического осаждения, описанная в п. 2.4.

С помощью заранее приготовленного коллоидного раствора серебра были произведены эксперименты с целью определения технологических режимов для дальнейшего применения в организации технологической производственной линии. Нанесение наночастиц металлов производилось в статическом режиме с применением экспериментальной электрофоретической установки (рисунок 39), в которую помещались образцы ФЭП так, чтобы нижний электрод из стали 5 соприкасался с подложкой образца ФЭП, образуя контакт и формируя катод. Анодом служит металлический электрод 2, зафиксированный в рамке из оргстекла, фиксируемый над образцом, создавая тем самым разность потенциалов в межэлектродном пространстве, являющимся рабочей зоной.

Ресивер с коллоидным раствором находится под экспериментальной установкой. Из него с помощью насоса в рабочее пространство подаётся раствор, который после этого снова стекает в ресивер по системе гибких трубок.

Наночастицы серебра, имея отрицательный заряд, осаждаются на поверхности образца.

Эксперименты проводились при напряжении от 10 до 52 В.

В процессе выполнения работы было обнаружено, что при нанесении наночастиц серебра на приёмную поверхность ФЭП производства Allmejores Factory Store происходит уменьшение значения выработки энергии. Было сделано предположение, что это связано с тем, что, в отличие от ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ», они имеют покрытие из нитрида кремния, а не из индия: под действием электрофореза происходило загрязнение приёмной поверхности ФЭП без проникновения наночастиц серебра на до кремния n-типа.

Также было обнаружено отсутствие изменений в выработке энергии ФЭП производства Lich Official Store. Было сделано предположение, что это связано с покрытием из этилен-тетрафторэтилен.

В связи с вышесказанным подбор рационального режима нанесения нанокластерного покрытия был выполнен на ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ», так как при проведении предварительных испытаний данные ФЭП показали увеличение выработки энергии.

При 10-минутном режиме было определено, что напряжение от 10 В до 25 В не позволяет получить такое нанесение, которое в определённой мере улучшило бы свойства ФЭП. Причиной этому служит то, что наночастицы, касаясь поверхности ФЭП, не могут проникнуть сквозь её защитный слой индия, тем самым оседая на поверхности ФЭП и образуя конгломераты и выступая лишь в роли препятствия для источника энергии, значительно ухудшая выходные характеристики.

В диапазоне от 26 В до 35 В часть наночастиц проникало сквозь защитный слой индия, тем самым оседая и, в некоторых случаях, незначительно улучшая характеристики ФЭП, что может говорить о возникновении резонансных явлений, но вместе с тем об образовании конгломератов, из-за чего значительная часть эффектов от наличия наночастиц была утрачена.

Наиболее оптимальным режимом является тот, при котором значения напряжения близки к значению 42 В и при времени нанесения 10 минут. При таком режиме наблюдается не только сохранение защитного слоя, но и значительное увеличение выходных характеристик ФЭП при сохранении прочностных и эксплуатационных характеристики.

При напряжениях свыше 48 В и времени нанесения 10 минут возникают дегенеративные процессы в виде испарения защитного слоя с поверхности ФЭП, а при напряжении от 52 В происходит уничтожение защитного слоя индия. При уменьшении времени нанесения до 5 минут покрытие сохраняется.

На рисунке 76 представлена фотография немодифицированной приёмной поверхности ФЭП, полученная при помощи микроскопа Levenhuk 400M. Рельеф поверхности состоит из кубических и сглаженных структур – In и Si n-типа, соответственно, что подтверждается научными исследованиями [146, 147].

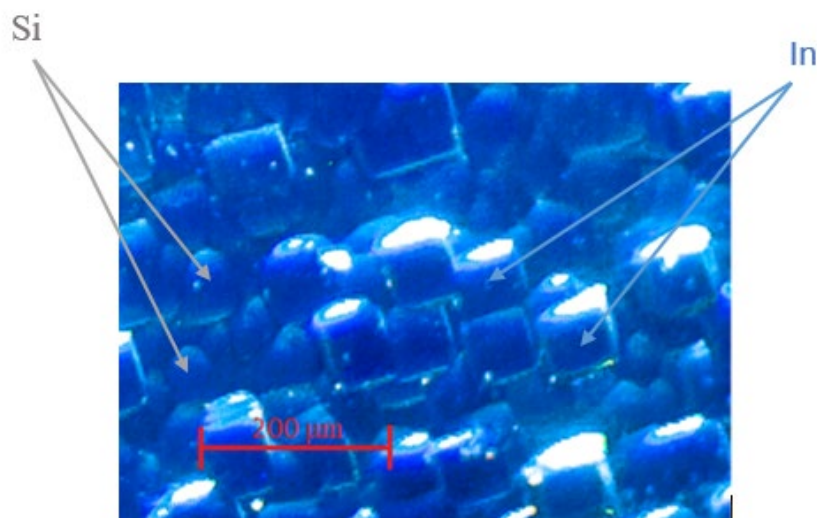


Рисунок 76 – Вид исходной поверхности ФЭП

После выполнения нанесения наночастиц серебра электрофоретическим методом при режиме нанесения 42 В в течение 10 мин было получено следующее изображение приёмной поверхности ФЭП (рисунок 77). Было сделано предположение, что из-за электрохимических реакций, происходящий при электрофорезе, происходит истончение покрытия из In и сглаживание их кубической структуры, а наночастицы серебра осаждаются в виде кластеров.

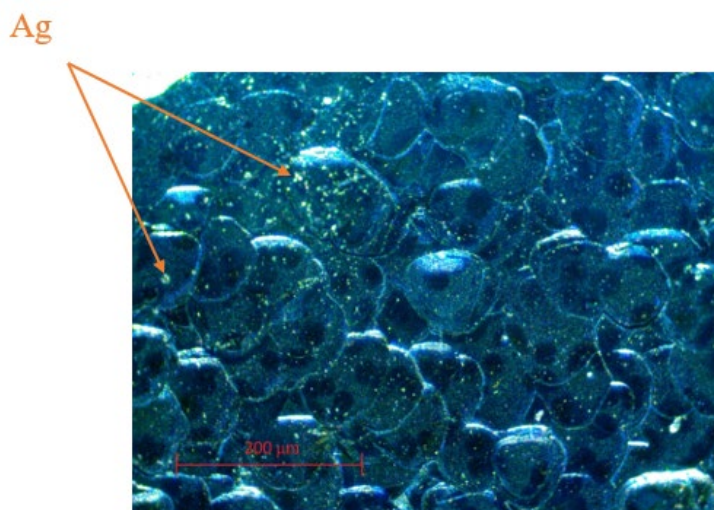


Рисунок 77 – Вид модифицированной поверхности ФЭП с осаждёнными методом электрофореза наночастицами серебра (точки)

Для определения размеров кластеров было получено изображение при помощи растрового электронного микроскопа FEI Quanta 600 FEG

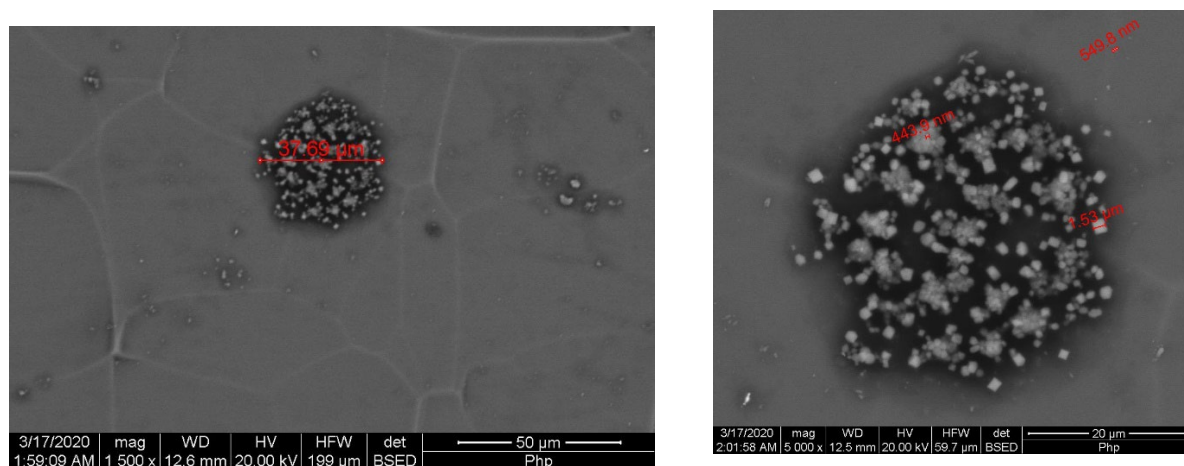


Рисунок 78 – РЭМ-изображения нанокластерного покрытия

Попытки описания механизма транспортировки наночастиц и формирования покрытия на основании сведений, почерпнутых из различных источников информации, составили весьма противоречивую картину. Поэтому,

для понимания и конкретизации сути процессов, происходящих при электрофоретическом осаждении наночастиц Ag из коллоидного раствора, нами была разработана концептуальная модель. Основные её положения заключаются в следующем.

При наложении внешнего электрического поля на дисперсную систему мицеллы начинают двигаться к электроду, знак заряда которого противоположен знаку дзета-потенциала мицелл, а противоионы в диффузном слое – в противоположную (рисунок 79). В связи с тем, что противоионы диффузного слоя, непрочно связанного с ядром мицеллы, смещаются в сторону электрода, знак которого противоположен их знаку – мигрируют в «хвостовую часть» и теряют связь с коллоидной частицей, после чего освобожденные ионы движутся к отрицательному электроду, а коллоидная частица, имеющая теперь неполностью скомпенсированный заряд потенциалобразующих ионов – к положительному. Движение свободных ионов происходит до тех пор, пока они не встретят на своём пути другую коллоидную частицу – они снова образуют на её поверхности диффузный слой противоионов, в результате чего произойдёт небольшое замедление движения этой мицеллы. Однако из-за того, что данный слой также не имеет крепкой связи с ядром мицеллы, они опять мигрируют в «хвостовую часть» и теряют связь с данной коллоидной частицей, при этом в данном случае миграция будет происходить немного медленнее, чем при отрыве противоионов диффузного слоя от «их мицеллы».

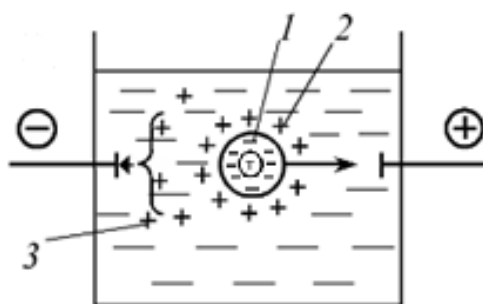


Рисунок 79 – Схема электрофореза: 1 – потенциалобразующий слой ионов; 2 – противоионы в адсорбционном слое; 3 – противоионы в диффузном слое; Т – твёрдое тело

Таким образом, при движении коллоидной частицы дисперсионная система остаётся электрически нейтральной, так как частица не утрачивает ДЭС, но при этом происходит «прокачивание» через неё противоионов диффузного слоя (свободных ионов дисперсионной среды).

Величину электрокинетического потенциала ( $\xi$ -потенциала) на поверхности скольжения можно вычислить при помощи объединённых формулы плоского конденсатора и формулы, описывающую равномерное движение коллоидной частицы в электрическом поле:

$$\xi = f \frac{\eta U_0 L}{E \varepsilon \varepsilon_0}, \quad (13)$$

где:  $L$  – расстояние между электродами;  $\eta$  – вязкость среды;  $U_0$  – линейная скорость движения частиц;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $E$  – напряжённость электрического поля;  $f$  – коэффициент, учитывающий форму частиц ( $f = 3/2$  для шарообразных,  $f = 1$  для цилиндрических).

В диффузном слое с измерением расстояния происходит также изменение  $\xi$ -потенциала:

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\chi x}, \quad (14)$$

где:  $\varphi_0$  – потенциал границы скольжения;  $\chi$  – характеристическая толщина ДЭС,  $x$  – расстояние от поверхности. При  $x=1/\chi$  потенциал  $\varphi$  в  $e$  раз меньше  $\varphi_0$ .

Толщина ДЭС и, соответственно величина  $\xi$ -потенциала, находятся в обратной зависимости от концентрации дисперсионной системы:

$$\chi = \left( \frac{8\pi n z^2 e^2}{\varepsilon k T} \right)^{1/2}, \quad (15)$$

где:  $n$  – концентрация коллоидного раствора;  $z$  – валентность,  $e$  – заряд электрона,  $k$  – константа Больцмана,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость.



Однако вес коллоидных частиц больше, чем свободных ионов, поэтому они достигают электрода и концентрируются в приэлектродном пространстве. Далее происходит стесненная коагуляция частиц и наночастицы осаждаются на подложке.

При этом при воздействии электрического поля на наночастицы происходит их нагрев, в результате чего они проплавляют защитный слой ФЭП, состоящий из индия, и благодаря межмолекулярным связям, «приклеиваются к нему».

В результате образуется визуально однородное, устойчивое к манипуляциям нанокластерное покрытие.

Пластины с покрытием были исследованы в БГУИР. Было подтверждено наличие плазмонных свойств нанокластерного покрытия путём регистрации спектров оптического поглощения в диапазоне 200-1100 нм и спектров поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния молекул органического красителя, адсорбированных на фотоэлементах с нанесённым покрытием (приложение А).

### **3.3 Определение параметров модифицированных ФЭП**

#### **3.3.1 Измерение напряжения холостого хода**

Полученные после нанесения нанокластерного покрытия на приёмную поверхность ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ» значения напряжения холостого хода сравнивались со значениями, полученными до нанесения. Результат представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Сравнение значений напряжения холостого хода до и после нанесения на приёмную поверхность ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ»

Номер пластины	V <sub>oc</sub> до	V <sub>oc</sub> до	%
№1	10,1	12,00	18,81
№2	24,3	31,50	29,63
№3	3,7	4,40	18,81
№4	23,4	30,10	28,63
№5	0,2	0,24	18,81
№6	0,6	0,71	18,81
№7	2,1	2,73	30,14
№8	18,3	21,40	16,94
№9	16	18,00	12,50
№10	28,5	35,20	23,51
№11	0,1	0,12	18,81
№12	35,5	46,20	30,14
№13	0,1	0,13	30,14
№14	0,1	0,11	9,05
№15	12,2	15,50	27,05
№16	0,1	0,12	16,94
№17	10,8	13,20	22,22
№18	0,1	0,12	23,51
№19	23,2	25,30	9,05
№20	11,4	14,84	30,14
№21	12,7	13,10	3,15
№22	1,7	1,85	9,05
№23	13,5	14,50	7,41
№24	3,2	3,74	16,94
№25	2	2,44	22,22

Как видно из таблицы 9, нанесение на приёмную поверхность ФЭП нанокластерного покрытия позволило увеличить выработку энергии в среднем на 20%. Однако, также видно, что если ФЭП до модификации имели плохие показатели – менее 2 мВ, то выполнение модификации не увеличит данный показатель в достаточной степени для применения данных ФЭП для выработки электроэнергии.

### 3.3.2 Измерение обратного рассеяния лазерного излучения

Полученные после нанесения нанокластерного покрытия на приёмную поверхность ФЭП значения коэффициентов обратного рассеяния сравнивались со значениями, полученными до нанесения. Результат представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Сравнение коэффициентов обратного рассеяния до и после нанесения на приёмную поверхность ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ» нанокластерного покрытия при освещении полупроводниковым лазером с длиной волны  $\lambda = 0,688$

Номер пластины	Измерения по левому краю	Измерения в центре	Измерения по правому краю	Измерения по левому краю	Измерения в центре	Измерения по правому краю
	До модификации			После модификации		
№1	86	105	94	273	333	298
№2	19	39	20	66	136	70
№3	29	29	20	115	115	79
№4	17	21	19	36	45	40
№5	27	29	37	87	94	120
№6	97	83	66	304	260	207
№7	43	54	59	167	210	229
№8	15	23	25	62	65	72
№9	17	10	33	75	57	102
№10	45	52	47	94	109	99
№11	28	30	32	58	63	67
№12	33	29	25	87	75	66
№13	12	27	21	41	92	72
№14	97	105	140	341	369	492
№15	30	23	28	104	80	97
№16	83	81	85	255	256	268
№17	94	85	82	343	310	300
№18	102	94	98	385	355	370
№19	30	22	23	57	42	44
№20	26	32	23	100	123	88
№21	39	46	50	120	141	154
№22	25	19	19	59	45	45
№23	31	30	17	71	69	39

Номер пластины	Измерения по левому краю	Измерения в центре	Измерения по правому краю	Измерения по левому краю	Измерения в центре	Измерения по правому краю
	До модификации			После модификации		
№24	21	61	59	52	151	146
№25	18	27	18	57	85	57

Как видно из таблицы 10, значения коэффициентов обратного рассеяния показали увеличение в среднем в 3 раза в сравнении с исходными немодифицированными пластинами. Это свидетельствует о большей интенсивности и статистическом выравнивании экспонирования приёмной поверхности ФЭП, что наряду с ППР способствует росту выработки электроэнергии.

### 3.3.3 Адгезия покрытия

В соответствии с ГОСТ Р 56127-2014 [150] было выполнено измерение адгезии металлического покрытия методом клеящей ленты. Данный метод позволяет оценить минимальную адгезию металлического покрытия к основанию и не предназначен для оценки толщины, твёрдости материала, паяемости, защитных свойств металлического покрытия или его электрических свойств (например, контактных свойств поверхности).

Алгоритм выполнения измерения адгезии: прозрачную липкую ленту прикладывают липкой стороной к испытываемому металлическому покрытию нажатием пальца таким образом, чтобы между ней и покрытием не образовывались воздушные пузырьки. Через 10 секунд ленту отделяли с приложением постоянного отрывного усилия перпендикулярно к поверхности испытываемого металлического покрытия. После отрыва ленты часть её, находящаяся в контакте с испытываемым металлическим покрытием, а также поверхность металлического покрытия подвергают визуальному контролю.

Выполненный в рамках исследования визуальный осмотр (ГОСТ 23752.1-92 [151]) засвидетельствовал удовлетворительную прочность сцепления покрытия и приёмной поверхности ФЭП: на рисунках 80 и 81 представлены фотографии приёмной поверхности ФЭП до и после применения клейкой ленты, где точки – наночастицы (фотографии сделаны при помощи микроскопа Levenhuk 400M).

Ag

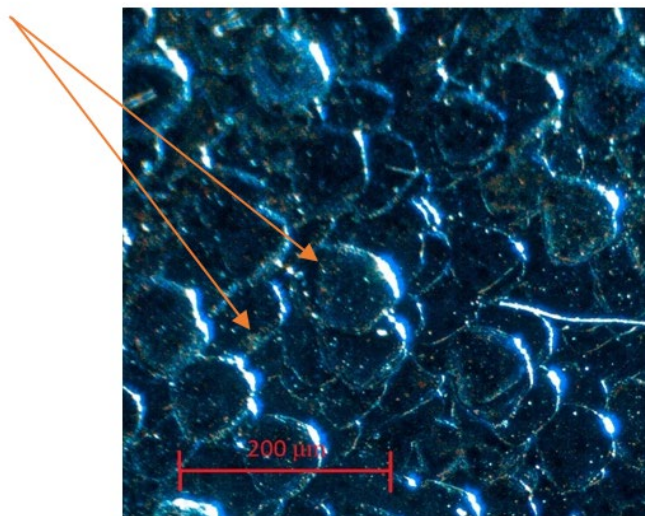


Рисунок 80 – ФЭП до использования клейкой ленты

Ag

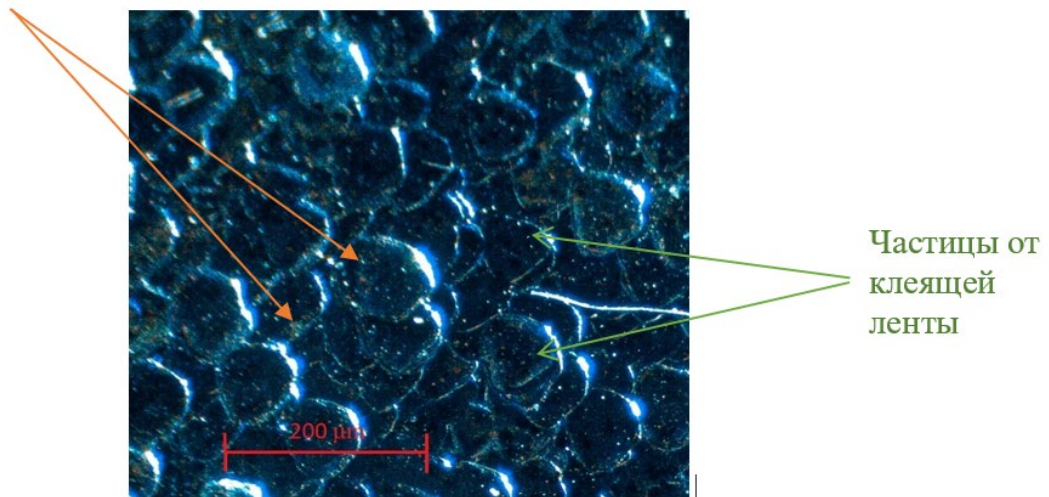


Рисунок 81 – ФЭП после использования клейкой ленты

### 3.3.4 Натурные испытания

На базе Севастопольского государственного университета были выполнены натурные испытания заводских ФЭП и ФЭП с модифицированной приёмной поверхностью.

Исследования характеристик проводились на широте  $45^\circ$  в апреле на открытой площадке при естественном постоянном солнечном освещении (около  $950 \text{ Вт/м}^2$ ). При проведении исследований использовался метод прямых измерений характеристик ФЭП по току и напряжению при переменном нагрузочном сопротивлении [149]. При этом учитывалось влияние изменения угла падения лучей на приёмную поверхность ФЭП, приводящее к изменению освещённости рабочей поверхности модуля [6, 152]. Максимальное значение мощности соответствовало углу наклона плоскости фотоэлемента  $50^\circ$  к горизонтальной площадке.

Для оценки эффективности применения покрытия из наночастиц серебра было использовано две характеристики:

- вольт-амперная – по ней можно судить о качестве работы ФЭП;
- мощностная – для оценки выработки электрической энергии в данное время года, суток и при данных климатических условиях.

Результаты измерения представлены на рисунке 82.

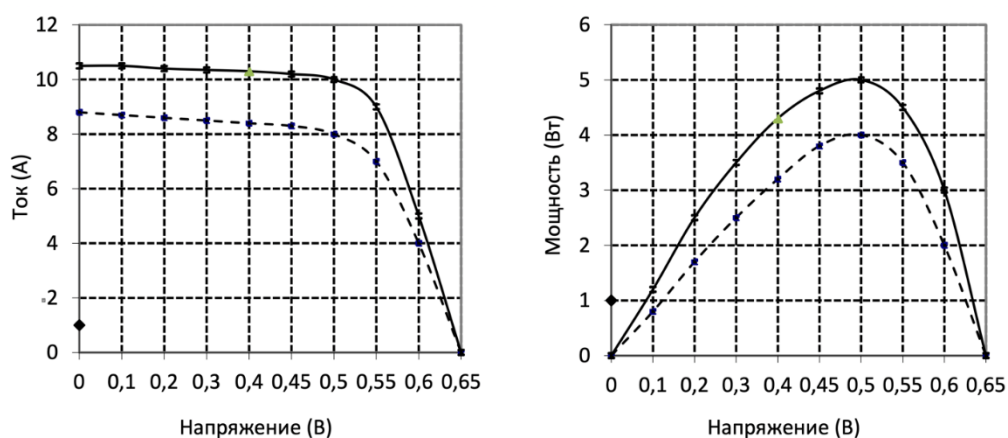


Рисунок 82 – Вольт-амперные и мощностные характеристики ФЭП: пунктирная линия – характеристики заводских ФЭП; сплошная линия – характеристики ФЭП с покрытием из наночастиц серебра (данные получены при освещённости около  $950 \text{ Вт/м}^2$ )

Как видно из графиков на рисунке 82, характеристики ФЭП с покрытием из наносеребра выше примерно на 20%.

Для определения зависимости мощностных характеристик ФЭП от угла падения солнечного излучения было выполнено моделирование указанных условий, для чего изменялось в течение короткого промежутка времени положение угла установки с установленными на ней ФЭП относительно горизонта. При этом проводились прямые измерения тока и напряжения.

Расчёт вырабатываемой мощности ФЭП ( $P_{\text{бат}}$ ) выполнялся по формуле [153]:

$$P_{\text{бат}} = E_0 \eta_{\text{эл}} S_{\text{эл}} \cos(K \cdot \alpha_0), \quad (16)$$

где  $\eta_{\text{эл}}$  – КПД элементов;  $E_0$  – солнечная освещённость приёмной поверхности ФЭП;  $S_{\text{эл}}$  – площадь ФЭП;  $K$  – суммарный коэффициент ослабления светового потока, зависящий от конкретной конструкции ФЭП;  $\alpha_0$  – угол между нормалью к плоскости ФЭП и солнечными лучами.

Значение коэффициента  $K$  при теоретических расчётах соответствует значению 1, при реальном – близко к 1 при перпендикулярном падении солнечных лучей на приёмную поверхность ФЭП. При изменении положения приёмной поверхности ФЭП относительно солнечного излучения изменяется и значение коэффициента  $K$ , которое также зависит от конструкции ФЭП – для обычных ФЭП  $K \approx 1,5$ .

На рисунке 96 представлены графики усреднённых значений зависимости выходной мощности ФЭП от угла наклона к горизонту, согласно которым:

- мощность ФЭП без покрытия сильно зависит от угла падения солнечных лучей;

- график ФЭП с покрытием близок по форме к графику, построенному исходя из теоретических значений;

– мощностные характеристики модифицированных ФЭП превышают характеристики заводских ФЭП примерно на 20%.

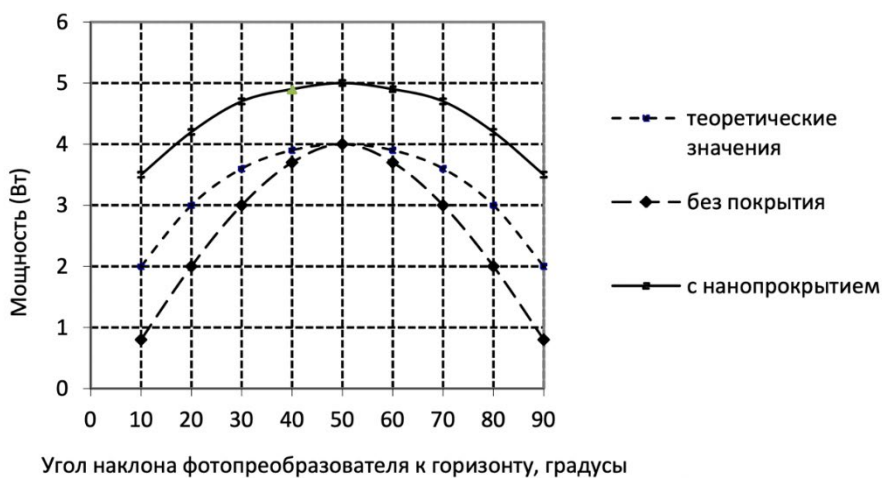


Рисунок 83 – Зависимость изменения выходной мощности ФЭП при изменении угла наклона к горизонту

### 3.4 Выводы по главе

1. Разработана установка и апробирована оригинальная методика тестирования ФЭП, основанная на измерении коэффициента обратного рассеяния лазерного излучения. Характеризация ФЭП в исходном состоянии показала необходимость доработки технологических процессов изготовления ФЭП.

2. Предложена концептуальная модель и определён рациональный режим нанесения наночастиц серебра на приёмную поверхность ФЭП электрофоретическим методом: 42 В и 10 минут.

3. Для ФЭП с покрытием было установлено наличие эффекта поверхностного плазмонного резонанса.

5. Испытания модифицированных ФЭП показали увеличение выработки ими электроэнергии в среднем на 20%.

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



6. Натурные испытания продемонстрировали эффективность применения покрытия из наночастиц серебра на приёмной поверхности ФЭП с точки зрения отсутствия зависимости выработки энергии от угла падения солнечного излучения.

## **4 Феноменологическая модель распределения рассеянной энергии вокруг наночастицы, осаждённой на поверхности ФЭП**

Проведённые в рамках настоящей работы 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 металлические наночастицы.

Однако, было обнаружено, что в процессе осаждения возможно диффундирование различных примесных элементов в зону контакта наночастиц серебра. В связи с этим нами предложена феноменологическая модель энергетического состояния и изучено влияние примесей на возникновение ППР (результаты исследования были опубликованы в [154-156]).

### **4.1 Условия для возникновения поверхностного плазмонного резонанса**

Металлические наночастицы и структуры на их основе при воздействии на них внешнего электромагнитного излучения определённых частот демонстрируют наличие резонансного поведения при соблюдении следующих условий [157]:

– длина волны электромагнитного излучения больше размера наночастицы – ППР является электростатическим по своей природе, из чего следует, что гармонические электромагнитные поля внутри определённой наночастицы и вблизи неё колеблются практически синфазно, что говорит о том, что в любой момент времени такие поля можно считать электростатическими;

– отрицательное значение диэлектрической проницаемости наночастицы (её вещественной части) по отношению к частотам электромагнитного излучения – поверхностный плазмон возникает на границе раздела сред с положительной вещественной частью диэлектрической проницаемости (воздух) и поверхностью металлической наночастицы, при этом плазмон представляет собой коллективные колебания электронов в пределах наночастицы.

Таким образом, электростатическая природа ППР в наночастицах и их отрицательные значения диэлектрической проницаемости приводят к усилению локальных электрических полей внутри и вокруг наночастиц. На рисунке 84 представлена модель сферической наночастицы, характеризующейся отрицательным значением диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , под воздействием однородного внешнего электромагнитного поля  $E_0$ . Поскольку значение  $\varepsilon < 0$ , вектор  $P$  поляризации направлен противоположно  $E_0$ , что приводит к формированию определенной конфигурации поверхностных электрических зарядов, создающих «деполяризующее» поле  $E'$ , сонаправленное с  $E_0$ . Следовательно, суммарное электрическое поле  $E = E_0 + E'$  внутри сферической наночастицы растёт. Необходимо также отметить, что, если размер частиц значительно меньше длины волны падающего излучения, частота плазмонного резонанса в металлических наночастицах не зависит напрямую от их размера. Для определения частоты плазмонного резонанса необходимо учитывать их геометрическую форму. Такая инвариантность относительно размеров указывает на то, что в случае массива схожих по форме наночастиц, резонансные свойства могут проявляться практически на одинаковых частотах. Следовательно, ППР будет одновременно возбуждаться на всех наночастицах одновременно, при этом как толщина, так и период массивов металлических наночастиц влияют на частоту ППР главным образом путём изменения эффективного потока фотонов. Для дальнейшего рассмотрения явления плазмонного резонанса приведены результаты упрощённого анализа

дисперсионного соотношения (зависимости диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  от частоты  $\omega$  падающего электромагнитного излучения) [157]. В этом случае мы имеем:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{e^2 N}{\varepsilon_0 m \omega^2} \right) = \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right), \quad (17)$$

где:  $e$  – элементарный заряд;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $m$  – масса электрона;  $N$  – общее количество электронов на единицу объёма;  $\omega_p$  – плазменная частота, определяемая по формуле:

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 N}{\varepsilon_0 m} \quad (18)$$

Из уравнения (17) следует, что:

$$\varepsilon(\omega) < 0 \text{ если } \omega < \omega_p \quad (19)$$

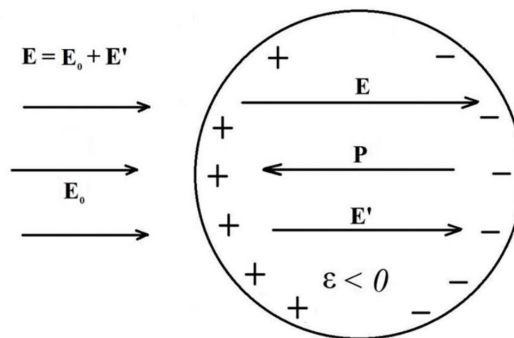


Рисунок 84 – Наночастица при воздействии на неё внешнего электрического поля

Принимая во внимание уравнение (17), можно сделать вывод, что на определённой частоте каждый металл проявляет резонансные свойства, хотя точные параметры поверхностного плазмонного резонанса обусловлены рядом факторов, в том числе концентрацией электронов и характеристиками конкретной матрицы наночастиц.

В связи с предположением, что все процессы происходят в слое, где коэффициенты взаимной диффузии зависят от степени ионизации атомов, для расчётов была выбрана модель электрического поля в приближении Друде-Лоренца для дисперсии поля [158]. Модель электрического поля является [159]:

$$\varepsilon_r = (n - ik)^2, \quad (20)$$

где  $n$  – фактический показатель преломления,  $k$  – мнимая часть показателя преломления,  $\varepsilon_r$  – комплекснозначный индекс относительной диэлектрической проницаемости.

В соответствии с этой моделью индекс  $\varepsilon_r$  может быть представлен в виде:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \sum_{j=1}^M \frac{f_j \omega_p^2}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\Gamma_j \omega}, \quad (21)$$

где  $\varepsilon_\infty$  – диэлектрическая проницаемость на бесконечности,  $f$  – функция распределения электронов по скоростям,  $\omega$  – частота электрического поля,  $\omega_0$  – плазменная частота. В этом примере используется хорошо известное параксиальное приближение – разложение по плоской волне для плотно сфокусированного Гауссова пучка. Подход разложения плоской волны используется, потому что можно найти истинное решение уравнения Гельмгольца.

Математически это можно показать, как выражение двумерного Гауссова пучка (параксиальное приближение). Гауссов двумерный пучок  $G$  в уравнении (21) является параксиальным приближением [160]:

$$E_G(x, y) = E_0 \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega(y)}} \cdot e^{-(x/\omega(y))^2} \cdot \exp\left(-i \left(ky - \eta(y) + \frac{kx^2}{2R(y)}\right)\right) e, \quad (22)$$

где  $E_G$  – зависимость распределения электрической силы от координат.

Аппроксимация для стандартного разложения плоской волновой функции равна [160]:

$$E_{pw} = \sum_{j=0}^M \sum_{k=0}^1 \alpha_{jk} \hat{u}_k(k_j) \cdot \exp(-i(k_j \cdot r)), \quad (23)$$

где каждый волновой вектор  $k_j$  указывает разное направление для каждого значения индекса  $j$ , а  $\alpha_{jk}$  – амплитуда, которая имеет различное значение для каждого волнового вектора, а также для каждого из двух возможных направлений поляризации для каждого волнового вектора  $\hat{u}_k(k_j)$ .

Дисперсия диэлектрической проницаемости для металлических частиц для относительной диэлектрической проницаемости может быть записана в виде:

$$E\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (24)$$

где угловая частота определяется  $\omega_p$  – плазменной частотой:

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}. \quad (25)$$

Данные для расчётов были взяты из [158, 160-164].

Глубина поверхностного слоя оценивается исходя из предположения, что плоская волна падает на плоскую поверхность, поэтому она не применима непосредственно к металлической сфере в модели. Из-за симметрии задачи моделируется только одна четверть сферы. Область воздуха вокруг сферы также моделируется как ширина, равная половине длины волны в свободном пространстве.

Таким образом, мы рассчитали основные параметры электрического поля в поверхностном слое, такие как показатель преломления, комплексная диэлектрическая проницаемость и т.д. в зависимости от длины волны падающего излучения. Эти параметры позволяют определить возможность возникновения ППР.

Плазмонный резонанс возбуждается при падении объёмной электромагнитной волны на границу сечения, если соблюдаются законы

сохранения энергии и проекция квазиимпульса объёмной и поверхностной плазмонных волн [165]:

$$k_{sp} = k_x \pm iG_x \pm jG_y, \quad (26)$$

где  $G_{x,y}$  – взаимные волновые векторы решётки поверхности структуры;  $i, j$  – целое число,  $k_{sp}$  – волновой вектор поверхностного плазмона;  $k_x$  – волновой вектор возбуждающего фотона.

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. Чем ближе частота оптического излучения к частоте плазмона, тем выше амплитуда колебаний и тем больше генерируется энергии.

Частота колебаний этого поверхностного плазмона определяется значениями диэлектрических постоянных частицы и матрицы. В случае металлических включений действительная часть диэлектрической проницаемости отрицательна, что может привести к резонансному поглощению [165]:

$$\alpha(\omega) = f \cdot \varepsilon_{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\omega}{c} \cdot 9 \cdot \left( -Im \left\{ \frac{1}{2\varepsilon_h + \varepsilon} \right\} \right), \quad (27)$$

$$Re \left( 2\varepsilon_h + \varepsilon_p(\omega) \right) = 0. \quad (28)$$

Расчёты для определения условий возникновения ППП были выполнены в программном пакете COMSOL 5.5. На рисунке 85 показана зависимость толщины поверхностного слоя от длины волны. Максимальная толщина поверхностного слоя 140 нм достигается в диапазоне длин волн от 270 до 370 нм. Именно в этой области происходит максимальное поглощение электромагнитной энергии. Зависимость потерь электромагнитной энергии от длины волны падающего света показана на рисунке 86.

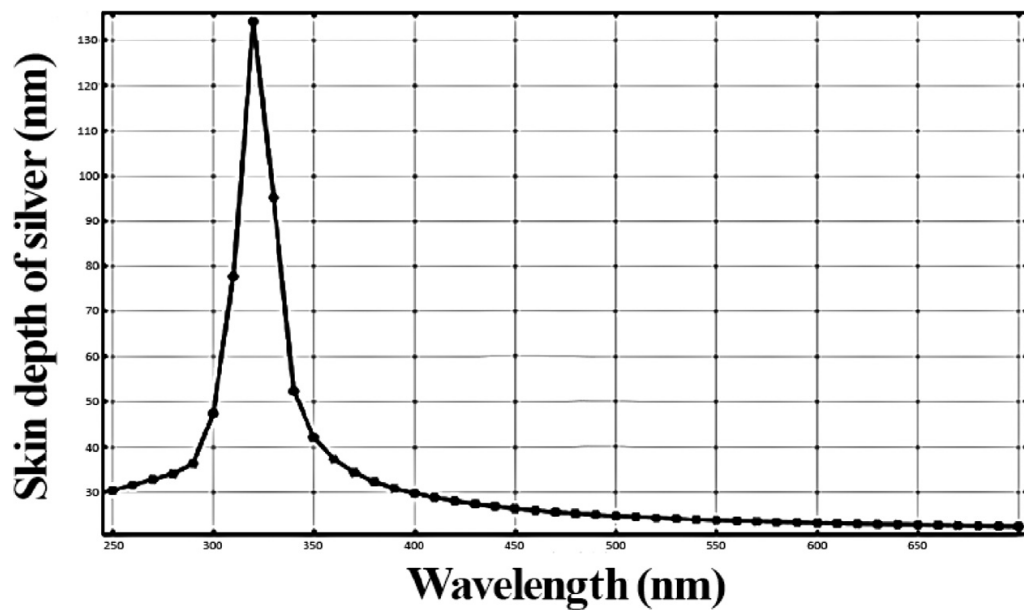


Рисунок 85 – Распределение толщины поверхностного слоя по длине волны



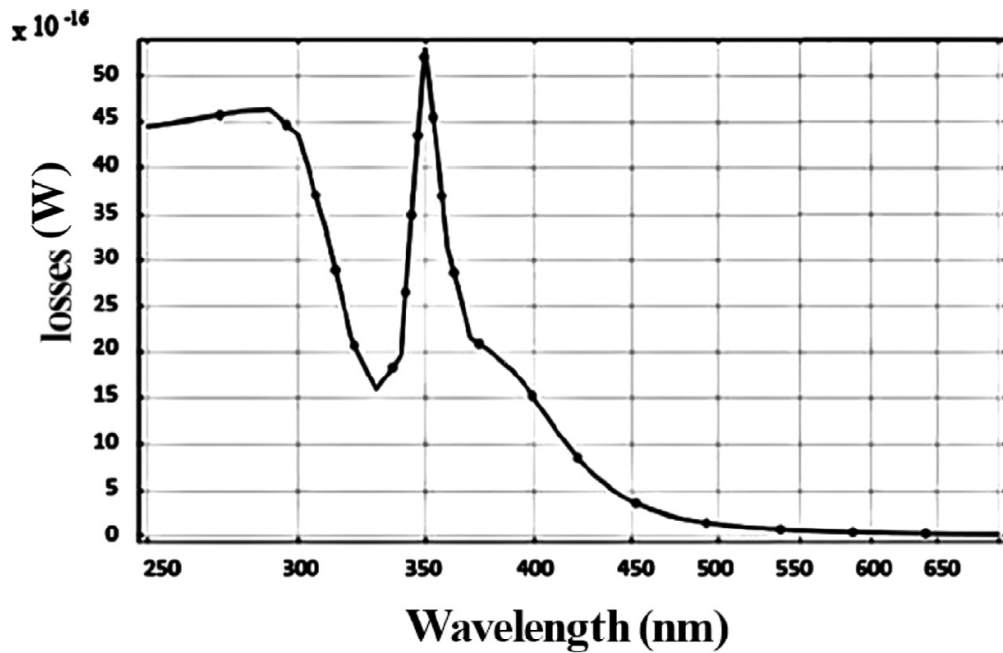


Рисунок 86 – Зависимость потерь энергии от длины волны падающего света (чистый Ag)

Совпадение диапазона длин волн максимальной глубины поверхностного слоя и экстремумов на кривой потерь показывает, что именно здесь реализуются условия для возникновения плазмонного резонанса. Экстремум на графике 86 обоснован формированием волноводного канала для поверхностного плазмон-поляритона на границе раздела металл-изолятор. Энергия объёмной электромагнитной волны концентрируется вблизи поверхности наночастицы (как видно из рисунка 87), что подтверждает возможность появления ППП [161]. В случае образования плазмонов колебания заряда, связанного с распадом поверхностного плазмона, происходит превращение энергии колебаний в тепло [160]. Именно этот диапазон частот падающего света от 200 до 370 нм даёт наибольшую вероятность плазмонных колебаний.

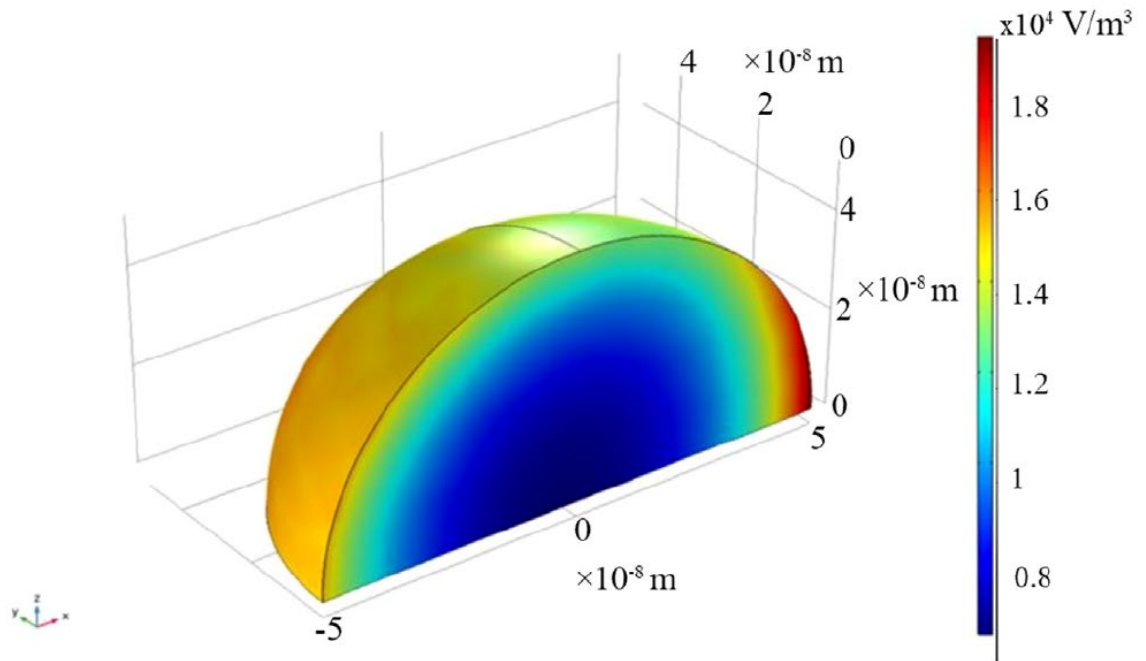


Рисунок 87 – Распределение рассеянной энергии вокруг наносферы чистого серебра размером 30 нм

Наблюдается резкое увеличение сечений поглощения и рассеяния металлических наночастиц при плазмонном резонансе. Плазмонные резонансы наночастиц металлов с высокой проводимостью (такие как Ag, Au, Cu) находятся в видимом диапазоне спектра [166]. Наночастица накапливает в себе энергию электромагнитной волны главным образом в поверхностном слое, и при плазмонном резонансе происходит локальное усиление излучения вблизи наночастицы и внутри неё. Усиление может достигать сотен раз в ансамбле взаимодействующих наночастиц в результате локального усиления амплитуды поля. Этот эффект имеет большое практическое значение.

На рисунке 88 показаны зависимости модулей действительной и мнимой частей показателя преломления от длины волны падающего света. На рисунке 89 показаны аналогичные зависимости, но для диэлектрической проницаемости. Представленные диаграммы демонстрируют, что вероятность образования поверхностных плазмонов наиболее высока в отмеченных диапазонах (линии 1 и 2 на рисунке 89). В диапазоне длин волн более 350 нм точка пересечения кривых соответствует длине волны, после которой, согласно условию (28), в воздушной среде происходит ППР. Но плазмонный резонанс может также возникать в кремниевой среде в более длинноволновом

диапазоне (линия 2 на рисунке 89). В то же время вероятность образования плазмонов в коротковолновом диапазоне спектра выше, чем в длинноволновой области.

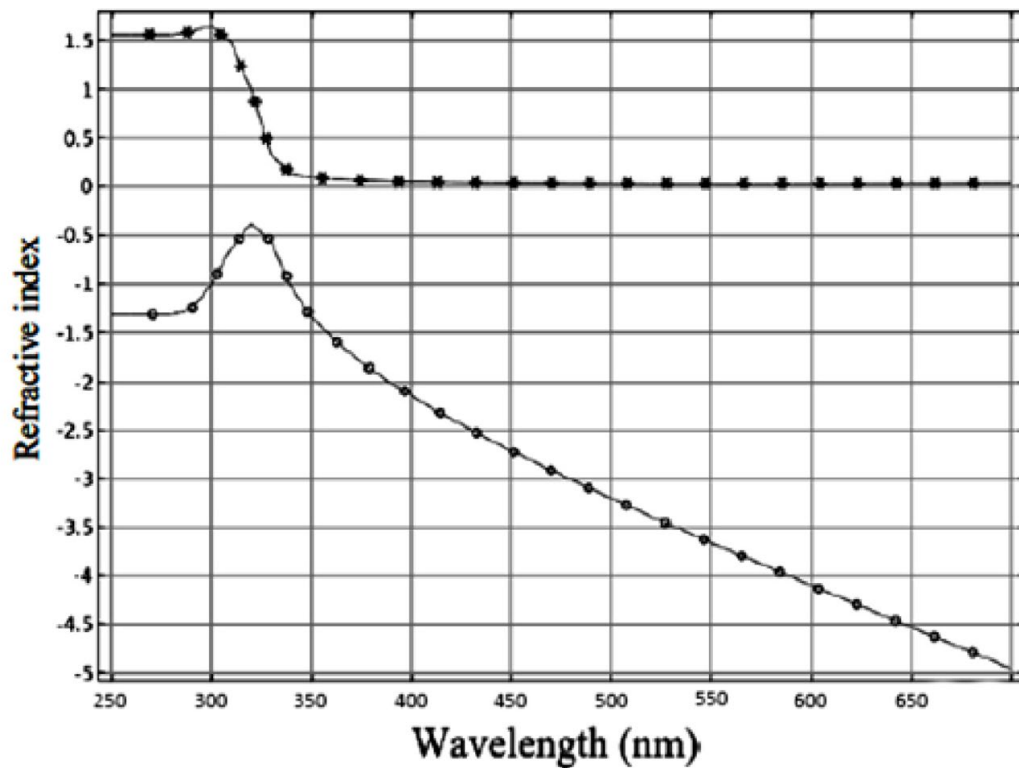


Рисунок 88 – Зависимости показателя преломления от длины волны падающего света (чистый Ag). \* –  $\lambda$  0-0,25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость серебра, действительная часть; ● –  $\lambda$  0-0,25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость серебра, мнимая часть

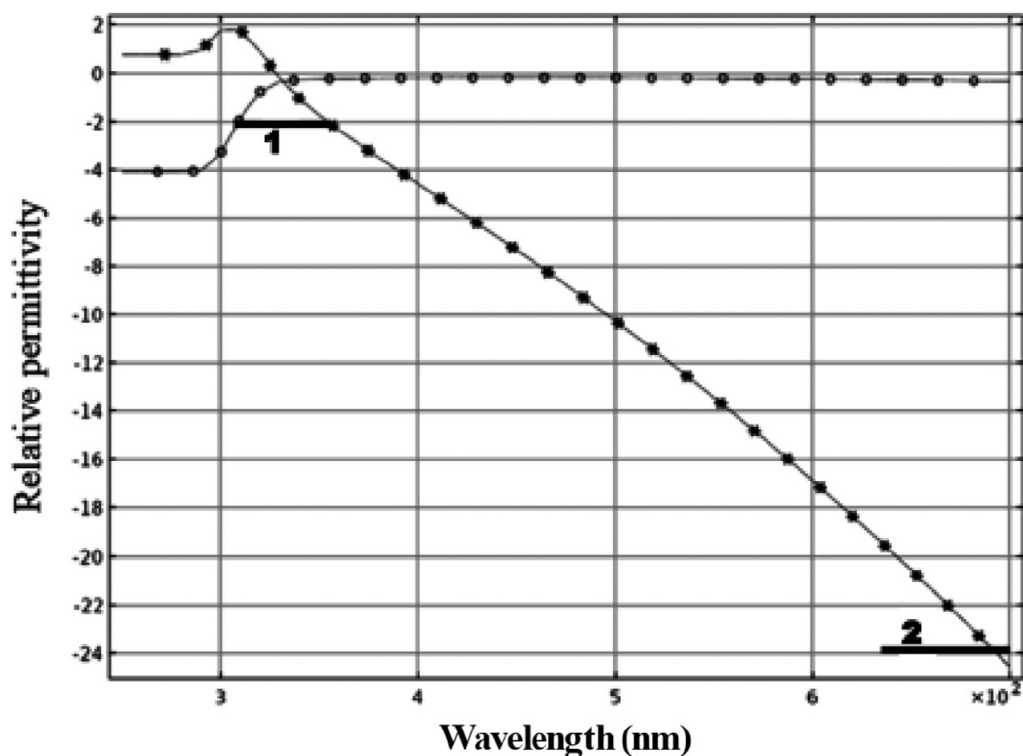


Рисунок 89 – Зависимости диэлектрической проницаемости от длины волны падающего света (чистый Ag): \* – лямбда 0-0,25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость серебра, действительная часть; ● – лямбда 0-0,25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость серебра, мнимая часть диапазона: линия 1 – для воздуха ( $\epsilon_h = 1$ ); линия 2 – для кремния ( $\epsilon_h = 12$ )

Известно, что поверхностные плазмоны стабильно существуют на частотах [167]:

$$\omega < \omega_{SP} = \frac{\omega_p}{\sqrt{1 + \epsilon_d}}, \quad (29)$$

Учитывая вышесказанное, из неравенства (29) следует, что ППР на кремниевой подложке после появления может постоянно существовать в широком диапазоне длин волн. Этот факт позволяет ожидать повышения эффективности ФЭП практически во всем видимом диапазоне света.

## 4.2 Влияние примесей на возникновение поверхностного плазмонного резонанса

Проведённые в рамках настоящей работы исследования показали, что способность наночастиц к созданию ППР зависит от многих факторов,

включая наличие даже небольшого количества примесных элементов. Различные осадки в процессе осаждения могут включаться и диффундировать в зону контакта наночастиц серебра как из раствора, так и из самой пластины. Это требует пристального внимания ко многим технологическим факторам, таким как качество воды, в которой образуется коллоидный раствор, химический состав кремниевых пластин и т.д.

Атомы примесей могут быть металлическими и неметаллическими по своей природе. Оптические свойства металлов определяются высокой концентрацией свободных электронов, образующих квантово-электронную газовую систему, в то время как в неметаллах свободных электронов практически нет. По этой причине примеси металлов могут изменять только основные резонансные частоты, в то время как наличие примесных атомов неметаллических элементов может снизить вероятность возникновения самого плазмонного резонанса [166, 169].

В связи с тем, что экспериментальные измерения и исследование влияния сверхмалых количеств примесных элементов по понятным причинам затруднены, была разработана математическая модель ППР и изучено её поведение в зависимости от наличия различных примесей.

Для построения модели были проанализированы размеры и форма наночастиц в свежеприготовленном коллоидном растворе серебра (п. 2.2 настоящей работы).

Было обнаружено, что покрытие образуется в результате двухэтапного процесса [170, 166]. Сначала коллоидные частицы Ag перемещаются в растворе под действием электростатического поля и первоначально адсорбируются на поверхности подложки, теряя заряд. При этом они некоторое время остаются подвижными и слипаются, что приводит к образованию нанокластерной структуры на втором этапе.

Параллельно в точках контакта с поверхностью ФЭП происходят пограничные диффузионные процессы, приводящие к проникновению примесей в наночастицы. При прочих равных условиях их концентрация

зависит от коэффициента диффузии и продолжительности контакта. Согласно технической документации на ФЭП производства ОАО «ММК имени Ильича» и ЗАО «Телеком-СТВ», основными потенциальными неметаллическими диффузорами являются бор и фосфор. Их параметры, влияющие на диффузию, а также вероятный источник происхождения, указаны в таблице 11. Для оценки коэффициентов диффузии были использованы данные, приведённые в [165-167, 171-172], но следует учитывать, что, как показано в [171], коэффициенты зернограничной диффузии в наноструктурах могут быть несколько выше, чем в обычных материалах.

Таблица 11 – 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

На основании вышеизложенных фактов можно сделать вывод, что бор (В) является основным и наиболее вероятным примесным элементом. Его концентрация в виде диффузной примеси в наночастицах Ag будет минимальной сразу после осаждения и будет пропорционально увеличиваться при старении коллоидного раствора. Существующие экспериментальные данные подтверждают это предположение: метод электронной микроскопии показал, что добавление бора даже менее 10 ppm в сплав серебра увеличивает его коэффициент диффузии, особенно в присутствии меди, и уменьшает размер нанозёрен [172].

Кремний практически не диффундирует в серебро, поскольку разница в параметрах решётки (параметр решётки серебра – 0,40779 нм, кремния – 0,54307 нм) не позволяет ему встраиваться в поверхностный слой по модели многогранных зёрен.

Характер распределения параметров, представленных на рисунках 86 - 89, в случае диффузии бора изменяется. На рисунке 90 показана зависимость потерь электромагнитной энергии от частоты падающего света для наносферы серебра размером 30 нм с примесью бора порядка 0,1 ат.%. Отсутствует характерный максимум, условие существования которого необходимо для возникновения плазмонных колебаний. На рисунке 91 показано распределение интенсивности рассеянной энергии вокруг наносферы серебра размером 30 нм с примесью бора порядка 0,1 ат.%

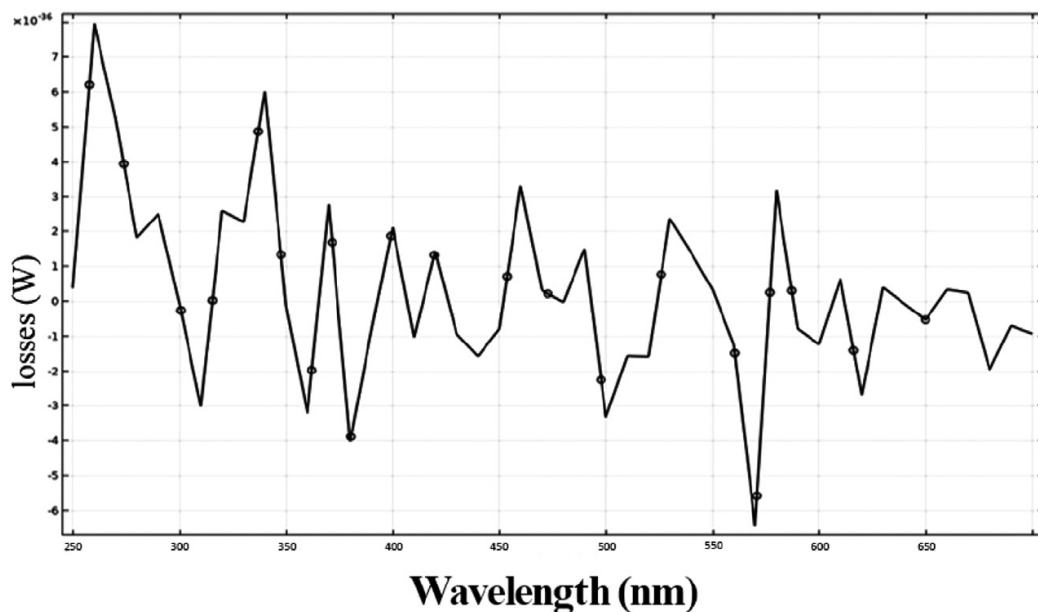


Рисунок 90 – Зависимость потерь энергии от длины волны падающего света (Ag с примесью B)

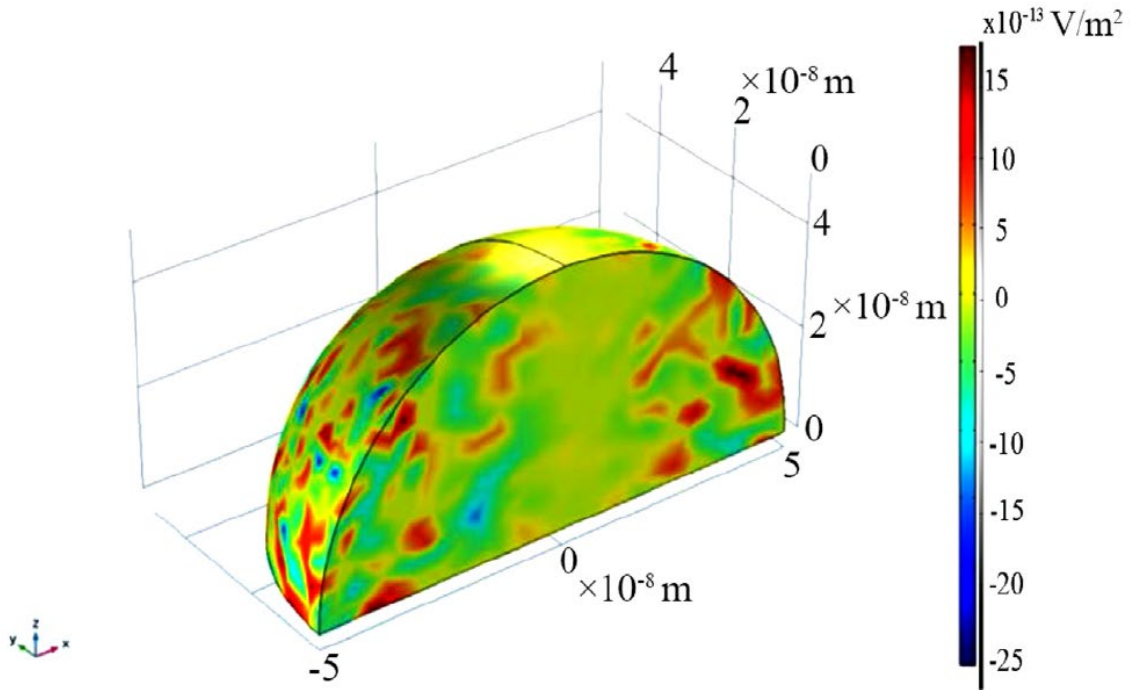


Рисунок 91 – Распределение рассеянной энергии вокруг наносферы серебра размером 30 нм с примесью бора

Потери представляют собой случайное распределение, и характерный всплеск, необходимый для формирования плазмонного резонанса, не наблюдается. Распределение диэлектрической проницаемости для наночастиц с примесью бора (рисунки 92 и 93) показывает, что условие (28) не выполняется и ППР не может возникнуть.



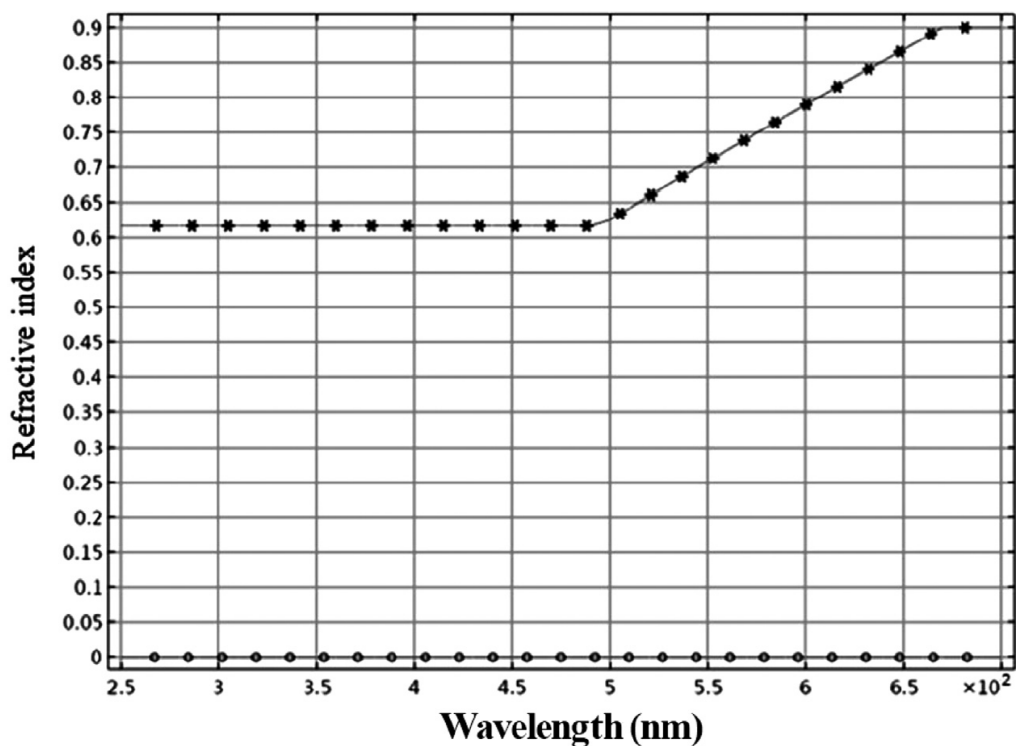


Рисунок 92 – Зависимости модуля действительной и мнимой частей показателя преломления (Ag с примесью В): \* – лямбда 0-0,25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость Ag-В, действительная часть; ● – лямбда 0-0, 25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость Ag-В, мнимая часть

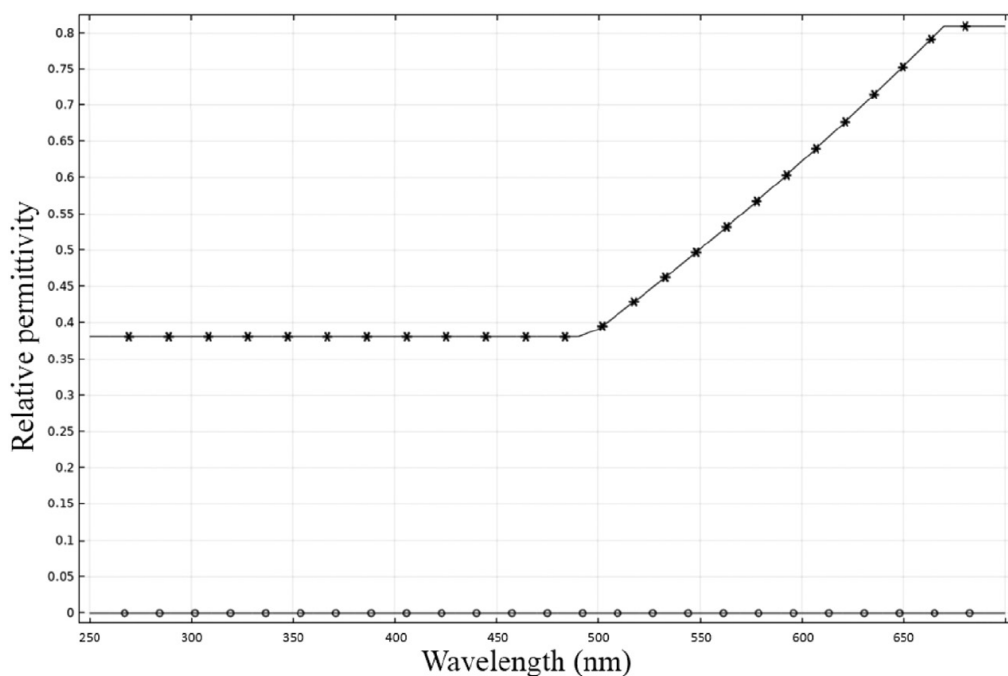


Рисунок 93 – Зависимости диэлектрической проницаемости от длины волны падающего света (Ag с примесью В): \* – лямбда 0-0,25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость Ag-В, действительная часть; ● – лямбда 0-0, 25 мкм, относительная диэлектрическая проницаемость Ag-В, мнимая часть

Для того, чтобы экспериментально выявить влияние примесей на возможность возникновения ППР, было выполнено нанесение наночастиц из коллоидного раствора серебра на приёмную поверхность ФЭП двумя способами:

– посредством электрофоретического осаждения при комнатной температуре со скоростью откачки коллоидного раствора 2,7 л/мин и напряжением 42 В (рисунок 94);

– посредством выдерживания ФЭП в коллоидном растворе при температуре 90°C в течение двух суток для реализации возможности диффузионных процессов (рисунок 95).

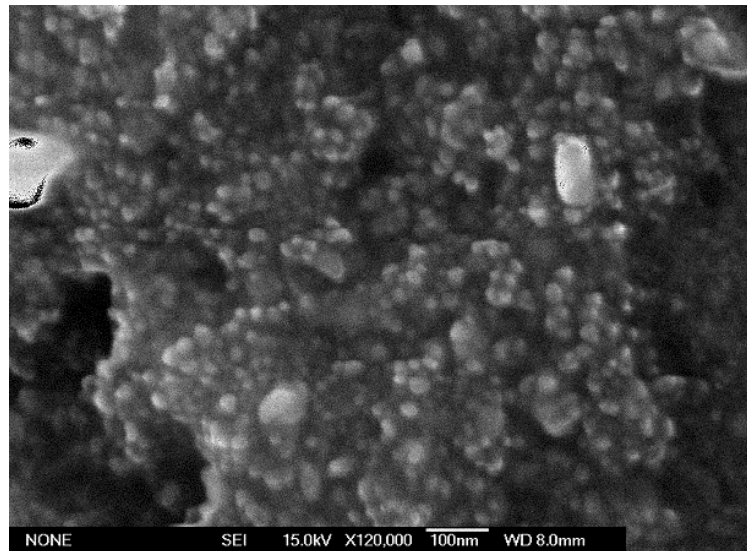


Рисунок 94 – Покрытие из наночастиц Ag на поверхности ФЭП непосредственно после электрофоретического осаждения

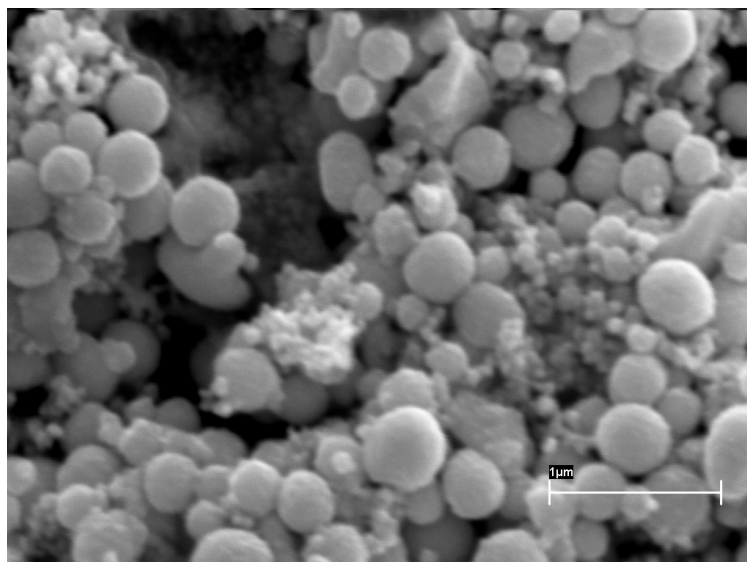


Рисунок 95 – Кластеризованное покрытие после длительной (48 часов) выдержки в коллоидном растворе

После того, как было получено покрытие на приёмной поверхности ФЭП из наночастиц серебра были измерены вольт-амперные характеристики этих пластин. Полученные значения сравнивались с характеристиками пластин без покрытия (рисунок 96).

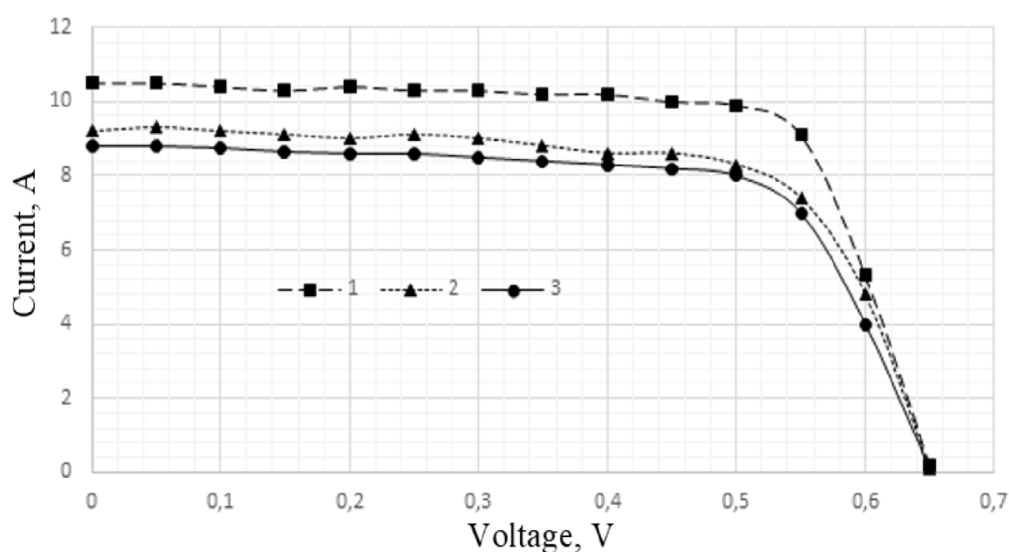


Рисунок 96 – Вольт-амперные характеристики фотоэлементов:  
 1 – с нанокластерным покрытием (электрофоретическое осаждение),  
 2 – с нанокластерным покрытием (выдержка в коллоидном растворе в течение 48 ч), 3 – без нанопокрyтия

Проведённая экспериментальная проверка показала полное соответствие расчётам по модели. 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 практически исключает эффективность нанесённого покрытия и характеристики 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, агрегация наночастиц в более крупные кластеры со сложной конфигурацией возможна благодаря свойствам наночастиц «слипаться» на примесях, что также препятствует возникновению ППР.

### **4.3 Выводы по главе**

1. Сформулированы условия и предложена феноменологическая модель возникновения явления поверхностного плазмонного резонанса, в соответствии с которой возможно описание распределения интенсивности рассеянной энергии в окрестностях поверхностной наночастицы.

2. Предложена феноменологическая модель и проведены расчёты в мультифизической среде COMSOL 5.5 для определения вероятности возникновения поверхностного плазмонного резонанса при наличии на приёмной поверхности фотоэлектрических преобразователей нанокластерных покрытий.

3. 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. %.

4. Выполнена экспериментальная верификация проведённых модельных расчётов.

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

### **5.1 Общие технологические рекомендации**

1. Наиболее рациональным режимом является тот, при котором значения напряжения близки к значению 42 В и при времени нанесения 10 минут.

2. Нанесение защитного слоя поверх наночастиц уменьшит вероятность возникновения поверхностного плазмонного резонанса.

Результаты исследования могут быть применены:

– для дальнейших теоретических и прикладных аспектов повышения выработки энергии ФЭП;

– при производстве ФЭП.

Для создания основ базового технологического процесса модифицирования серийно выпускаемых ФЭП для целей повышения выработки ими энергии за счёт формирования на их приёмной поверхности нанокластерного покрытия, электрофоретически осаждённого из полученного плазменно-искровым диспергированием коллоидного раствора серебра, были разработаны типовые регламенты проведения отдельных основных операций. Регламенты представлены в алгоритмической форме.

### **5.2 Алгоритмы последовательности действий**

#### **5.2.1 Алгоритм приготовления коллоидного раствора серебра**

Создание коллоидного раствора серебра осуществляется на установке УСНМ, описанной в п. 2.2.1 диссертации.

1. Включить с помощью тумблера «Сеть» блок управления, после чего загорится индикатор, сообщающий о разведённом состоянии электродов.

2. В жидкую среду помещаются электроды, выполненные из требуемых материалов.
3. При помощи блока управления УСНМ электроды сводятся, индикатор отключается.
4. Оператор выставляет требуемый зазор между электродами, после чего загорается индикатор.
5. Установка переходит в режим готовности, после чего в ванну УСНМ происходит закачка дистиллированной воды из накопителя.
6. С помощью высоковольтного блока на электроды подаётся высокое импульсное напряжение, а также, с помощью блока управления запускается вращение электрода, начинается производство коллоидного раствора.
7. По окончании процесса раствор попадает в реактор коллоидного раствора.

### **5.2.2 Алгоритм измерения обратного рассеяния**

Измерение обратного рассеяния осуществляется на установке ИОР, описанной в п. 2.5.2 диссертации.

Алгоритм № 1 – для ФЭП без покрытия.

1. Взять изначальный, немодифицированный образец.
2. Подготовить образец для измерения коэффициента обратного рассеяния, выполнив его предварительную очистку – протереть приёмную поверхность ФЭП нетканым полотенцем, предварительно смочив его спиртом.
3. Включить установку ИОР.
4. Нажать на клавишу «Т» для выбора режима работы «Test».
5. Дождаться установки нуля.
6. Поместить подготовленный образец на предметный столик таким образом, чтобы сторона, для которой будет измеряться коэффициент обратного рассеяния, была обращена к источникам излучения.
7. Указать номер канала 1 для использования лазера с длиной волны 0,688 мкм.

8. Нажать на клавишу «Е».

9. Измерить значения коэффициента обратного рассеяния для трёх зон образца и заполнить соответствующие поля в форме, представленной на рисунке 44, в столбцах «До».

10. Вычислить среднее значение полученных коэффициентов.

Длина волны	Измерения по левому краю	Измерения в середине	Измерения по правому краю	Среднее значение
	Образец №			
	До			
0.68 нм				
0.83 нм				
1.32 нм				
После				
0.68 нм				
0.83 нм				
1.32 нм				

Рисунок 97 – Деление образца на зоны

11. Нажать на клавишу «Е».

12. Повторить этапы 7-11 для каналов 2 и 3 (для лазеров с длиной волны 0,83 мкм и 1,32 мкм, соответственно).

13. Убрать измеряемый образец.

14. Выключить установку ИОР.

Алгоритм № 2 – для модифицированных ФЭП.

1. Повторить действия 1-14 из Алгоритма № 1. Заполнить на шаге 9 поля в столбцах «После».

2. Сравнить полученные значения коэффициентов обратного рассеяния до и после нанесения нанокластерного покрытия (в зависимости от необходимой детализации сравниваются либо все значения, либо только средние).

### 5.2.3 Алгоритм измерения напряжения холостого хода

Измерение напряжения холостого хода осуществляется на лабораторном стенде для фотоэлектрических испытаний, описанном в п. 2.3 диссертации.

Алгоритм № 1 – для ФЭП без покрытия.

1. Включить освещение.
2. Производится измерение освещённости при помощи люксметра.
3. Поместить ФЭП внутрь корпуса стенда и центрировать его по специализированной разметке.
4. Измерить значение напряжения холостого ФЭП при помощи мультиметра.
5. Зафиксировать полученное значение.
6. Повторить последовательность действий 3-5 для всех ФЭП.

Алгоритм № 2 – для модифицированных ФЭП.

1. Повторить действия 1-6 из Алгоритма № 1.
2. Сравнить полученные значения.

#### **5.2.4 Алгоритм модификации поверхности ФЭП**

Модификация приёмной поверхности ФЭП осуществляется на установке ЭО, описанной в п. 2.4 диссертации.

1. Выполнить предварительную очистку ФЭП – протереть приёмную поверхность ФЭП нетканым полотенцем, предварительно смочив его спиртом.
2. Поместить фотоэлемент на нижний электрод из нержавеющей стали разработанной электрофоретической установки.
3. Накрыть конструкцию крышкой.
4. Включить насос и дождаться заполнения пространства между крышкой и основанием установки.
5. Подключить напряжение определённого значения. Зафиксировать время.
6. По прошествии заданного временного значения отключить напряжение и прекратить подачу раствора.
7. Дождаться, когда раствор стечёт из конструкции с специальную тару.
8. Поднять крышку.
9. Извлечь ФЭП.



10. Выполнить сушку фотоэлемента.

### **5.3 Использование результатов диссертационной работы**

Результаты внедрены для энергообеспечения медицинского оборудования в санаторно-курортном комплексе Крыма (Приложение Б).

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.

### **5.4 Выводы по главе**

1. Сформулированы общие технологические рекомендации, предоставлена информация о возможностях применения результатов исследования. Разработаны регламенты в алгоритмической форме проведения основных операций.

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

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам выполнения диссертационной работы можно сделать 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.

## ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| агрегативная<br>устойчивость          | – способность противостоять слипанию частиц, т. е. способность системы сохранять степень дисперсности   |
| барьер Шоттки                         | – потенциальный барьер, появляющийся в приконтактном слое полупроводника, граничащего с металлом, равный разности работ выхода (энергий, затрачиваемых на удаление электрона из твёрдого тела или жидкости в вакуум) металла и полупроводника |
| безызлучательный<br>переход           | – переход с одного энергетического уровня на другой, при котором квант энергии выделяется в виде тепла в среде  |
| выработка энергии                     | – количество электрической энергии, вырабатываемой ФЭП за нормативный промежуток времени при максимальной мощности фотоэлектрического солнечного элемента   |
| гелиотехника                          | – отрасль техники, занимающаяся проблемами практического использования энергии солнечной радиации   |
| горячий электрон                      | – энергетические носители заряда, которые могут, сталкиваясь с валентными электронами атомов в кристаллической решетке, выбивать эти электроны из валентной зоны с последующим их переходом в зону проводимости                               |
| двойной<br>электрический слой;<br>ДЭС | – тонкий поверхностный слой из пространственно разделённых электрических зарядов противоположного знака, на границе раздела твёрдой и жидкой фаз (входит в строение мицеллы)  |
| изоморфизм                            | – способность атомов, ионов или молекул замещать друг друга в кристаллических структурах  |

излучательный переход	– переход с одного энергетического уровня на другой, при поглощении квантов электромагнитной энергии (фотонов)
коллоидный раствор	– дисперсионная система, в которой частицы дисперсной фазы (наночастицы) распределены в дисперсионной среде (жидкости)
концептуальная модель	– абстрактная модель, определяющая структуру исследуемого объекта (составные части и связи), свойства составных частей, причинно-следственные связи
лиофобность	– частицы дисперсной фазы не взаимодействуют с дисперсионной средой, не сольватируются и не растворяются в ней, однако при этом для частиц характерна потеря агрегативной устойчивости
люминесценция	– нетепловое свечение вещества, происходящее после поглощения им энергии возбуждения
мицелла	– частица дисперсной фазы, окружённая слоем молекул или ионов дисперсионной среды
плазмон	– квазичастица, представляющая собой сочетание колеблющихся электронов и связанного с ним электромагнитного пол
плазмонный резонанс	– резонансные колебания электронов при возбуждении поверхностного плазмона на его резонансной частоте внешней электромагнитной волной. В случае наноразмерных металлических структур, о которых речь идёт в данной работе, подразумевается локализованный поверхностный плазмонный резонанс
процентиль	– которое заданная случайная величина не превышает с фиксированной вероятностью (вероятность задана в процентах)

- технологии энергоперехода – семь технологических направлений, которые составляют основу энергоперехода, способствуя увеличению доли ВИЭ и вытеснению ископаемых видов топлива: электрификация, повышение эффективности, развитие цифровых технологий, удешевление хранения энергии, удешевление водородных технологий, удешевление ВИЭ, распределённая энергетика
- феноменологическая модель – формулировка закономерностей, определяющих взаимосвязь между различными наблюдениями явлений (феноменов) в соответствии с фундаментальной теорией, но непосредственно из этой теории не следующих
- фотовольтаика – раздел науки на стыке физики, фотохимии и электрохимии, изучающий процесс возникновения электрического тока в различных материалах под действием падающего на них света
- электрический диполь – совокупность двух равных по величине разноимённых точечных зарядов расположенных на некотором расстоянии друг от друга
- электрофорез – явление перемещения дисперсной фазы относительно жидкой дисперсионной среды под действием электрического поля
- энергетический переход; энергопереход – изменения структуры первичного энергопотребления и постепенный переход от существующей схемы энергообеспечения к новому состоянию энергетической системы

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящей диссертации применяют следующие сокращения с соответствующими обозначениями:

БГУИР	–	Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ВАХ	–	вольт-амперная характеристика
ВИЭ	–	возобновляемые источниками энергии
ДЭС	–	двойной электрический слой
КПД	–	коэффициент полезного действия; отношение выработанной электрической энергии к поступившей за тот же интервал времени энергии солнечного излучения на ФЭП
ИОР	–	установка измерения обратного рассеяния лазерного излучения в режиме реального времени
ЛАТР	–	лабораторный регулируемый автотрансформатор
ППР	–	поверхностный плазмонный резонанс
ПЭВМ	–	персональная электронная вычислительная машина
ТММ	–	точка максимальной мощности
УСНМ	–	установка синтеза наночастиц металлов, в основе которой лежит метод электроимпульсного диспергирования металлов
УХЛ	–	эксплуатация в районах с умеренным и холодным климатом, температура от $-60\text{ C}^{\circ}$ до $+40\text{ C}^{\circ}$
ФЭП	–	фотоэлектрический преобразователь (фотоэлектрический элемент)
ЭО	–	установка электрофоретического осаждения
CVD	–	англ. Chemical Vapour Deposition; химическое осаждение из газовой фазы
FF	–	англ. fill factor; коэффициент заполнения ВАХ
PVD	–	англ. Physical Vapour Deposition; вакуумное напыление

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Ульянин Ю.А., Харитонов В.В., Юршина Д.Ю. Прогнозирование динамики истощения традиционных энергетических ресурсов // Проблемы прогнозирования. – 2018. – №2 (167). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-dinamiki-ischerpaniya-traditsionnyh-energeticheskikh-resursov>.

2 Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ (ред. от 04.09.2023 г. «Об электроэнергетике». Принят Государственной Думой 21.02.2003 г. Одобрен Советом Федерации 21.02.2003 г.

3 Ibragimova N.I., Halikova A. Problems of energy resources // Molodoy ucheniy. – 2017. – №3. – P. 96-98. URL: <https://moluch.ru/archive/137/35642/>.

4 Инвестиции в чистую энергию впервые сравнялись с вложениями в ископаемое топливо - более \$1 трлн [Электронный ресурс]. – URL: [https://finance.rambler.ru/business/50100477/?utm\\_content=finance\\_media&utm\\_medium=read\\_more&utm\\_source=copylink](https://finance.rambler.ru/business/50100477/?utm_content=finance_media&utm_medium=read_more&utm_source=copylink).

5 Low-carbon technology investment surges past US\$1 trillion for first time [Электронный ресурс]. – URL: <https://corporateawards.theasset.com/article-esg/48518/low-carbon-technology-investment-surges-past-us-1-trillion-for-first-time>.

6 Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества (монография). – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. - 292 с.

7. Ханаев, В.В. Вопросы эффективности применения гелиосистем малой мощности // Научный вестник НГТУ. – 2015. – Т.59. – №. 5. – С. 98–107.

8 Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. – 2003. – Wiley, New York. 10.1002/0470014008.

9 Photovoltaic Power Generation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cs.kumamoto-u.ac.jp/epsfab/APSF/Lecture%20Notes/lecture-6.pdf>.

10 Что такое p-n переход [Электронный ресурс]. – URL: <https://tyt-sxemi.ru/p-n-perekhod/>.

11 Солнечные элементы. Виды и работа. Применение и особенности [Электронный ресурс]. – URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/jelektropitanie/solnechnye-elementy/>.



12 Как работают солнечные батареи: принцип, устройство, материалы [Электронный ресурс]. – URL: <https://solar-energ.ru/kak-rabotayut-solnechnye-batarei-printsip-ustrojstvo-materialy.html>.

13 Technical Application Papers No.10. Photovoltaic plants [Электронный ресурс]. – URL: <http://arianbc.net/Uploads/catalogs/ABBLV/No.10-Photovoltaic%20Plants.pdf>.

14 Solar cells [Электронный ресурс]. – URL: [https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpagswarwick/ex5/devices/s\\_cells/](https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/current/postgraduate/regs/mpagswarwick/ex5/devices/s_cells/).

15 How do Solar Cells work? [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lesics.com/how-do-solar-cells-work.html>.

16 Солнечная энергетика [Электронный ресурс]. – URL: [https://mipt.ru/upload/medialibrary/c74/font-fivt-7\\_8.pdf?ysclid=19kvhrbmx4968112125](https://mipt.ru/upload/medialibrary/c74/font-fivt-7_8.pdf?ysclid=19kvhrbmx4968112125).

17 Бессель В. В., Кучеров В. Г., Мингалеева Р. Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: Учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2016. – 90 с.

18 Suyanto, M. Development of a Household Solar Power Plant: System Using Solar Panels / M. Suyanto, T. Rusianto, Subandi // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V.807 (1). – P. 012007 – 012016.

19 КПД солнечных батарей — обзор самых эффективных модулей [Электронный ресурс]. – URL: <https://energo.house/sol/kpd-solnechnyh-batarej.html>.

20 Отто А.И. Автономные энергетические установки с экстремальным регулированием мощности фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. - Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 2018 - 129 с.

21 Гульков, В.Н. Исследование влияния нагрева солнечных модулей на эффективность преобразования излучения / В. Н. Гульков, И. Д. Колесниченко, К. Е. Коротков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2019. – №. 1. – С. 10–16.

22 Батищев, В.В. Основные потери энергии и КПД в фотоэлектрических преобразователях / В. В. Батищев // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – №. 23. – С. 127–132.

23 Альтернативная энергетика. Коэффициенты фотоэлектрического преобразования для различных типов фотоэлементов [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.alterenergy.info/interesting-facts/110-the-solar-energy/426-coefficient-of-photoelectric-conversion-for-different-types-of-solar-cells>.

24 Мирющенко Н.И., Проскуряков А.В., Харенков Н.А. Фотоэлектрические преобразователи на основе арсенида галлия // Проблемы и перспективы развития науки в России и мире. Сборник статей: сборник статей Международной научно - практической конференции (1 декабря 2016 г., г. Уфа). В 7 ч. Ч.5/ - Уфа: АЭТЕРНА, 2016. – 213 с. – С. 16–18.

25 Выбор солнечных панелей: Моно или поли? [Электронный ресурс]. – URL: <https://sovet-ingenera.com/eco-energy/sun/vidy-solnechnyx-batarej.html>.

26 Сравнение моно, поли и аморфных солнечных батарей [Электронный ресурс]. – URL: [http://b-eco.ru/articles/mono\\_poly\\_amorphous/](http://b-eco.ru/articles/mono_poly_amorphous/).

27 Виды солнечных батарей: сравнительный обзор конструкций и советы по выбору панелей [Электронный ресурс]. – URL: <https://sovet-ingenera.com/eco-energy/sun/vidy-solnechnyx-batarej.html>.

28 Shanmugam, N. Anti-Reflective Coating Materials: A Holistic Review from PV Perspective / Natarajan Shanmugam, Rishi Pugazhendhi, Rajvikram Madurai Elavarasan and etc. // *Energies*. – 2020. – V. 13. – P. 2631–2724.

29 Савелли М. Проблемы создания фотоэлементов на основе-Cu<sub>2</sub>S/CdS / М Савелли., Дж. Бугнот // - В кн.: Преобразование солнечной энергии: Пер. с англ./ Под ред. М. М. Колтуна, В. М. Евдокимова. М.: Энергоиздат, 1982, с. 189-226.

30 Burton L. S. New type Cu<sub>2</sub>S/CdS backwall solar cell / L. S. Burton, G. Haake. // - In: Rec. 10th IEEE Intersoc. Energy Conversion Conf., Newark (Del.), - 1975. - N. Y.: IEEE, - 1975, - p. 396-399.

31 Агнихотри О. П. Селективные поверхности солнечных установок./ О. П. Агнихотри, Б. К. Гупта. // Пер. с англ. / Под ред. М. М. Колтуна. - М.: Мир, - 1984. - 312 с.

32 Semenova O., Yuzova V., Patrusheva T., Merkushev F., Railko M., Podorozhnyak S. Antireflection and protective films for silicon solar cells. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014 – 66. 012049. 10.1088/1757-899X/66/1/012049.

33 Акишин А.И., Байкальцев В.Б., Тютрин Ю.И. Воздействие электронных потоков на защитные покрытия солнечных батарей // ФХОМ. 1991. № 4. С. 68-71.

34 O'Neil M.J. 1,000 w/kg Solar Concentrator Arrays for Far-Term Space Missions. Space Technology Applications International Forum (STAIF) – Albuquerque-Febr. 2004. P. 1-8.

35 Немкова А.А. Просветляющие покрытия для защитных стекол солнечных элементов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2009.

36 Prasad B., Bhattacharya S., Saxena A.K., Reddy S.R., Bhogra R.K. Performance enhancement of mc-Si solar cells due to synergetic effect of plasma texturization and SiNx:H AR coating // Solar Energy Materials & Solar Cells. 94. 2010. P. 1329–1332.

37 Alemu A., Freundlich A., Badi N., Boney C., Bensaoula A. Low temperature deposited boronnitride thin films for a robust anti-reflection coating of solar cells // Solar Energy Materials & Solar Cells. 94. 2010. P. 921–923.

38 Natsuharaa H., Matsumotoa K., Yoshidaa N., Itohb T., Nonomuraa S., Fukawac M., Satoc K. TiO<sub>2</sub> thin films as protective material for transparent-conducting oxides used in Si thin film solar cells // Solar Energy.

39 Батищев, В.В. Основные потери энергии и КПД в фотоэлектрических преобразователях / В. В. Батищев // Приоритетные научные направления: от теории к практике. – 2016. – №. 23. – С. 127–132.

40 Бойко А. А., Зализный Д. И., Марван Ф. С. Х. Аль-Камали, Подденежный Е. Н., Алексеенко Ю. А., Дробышевская Н. Е., Нивази А. С. Аль-Арики, Голосов Д. А., Доан Х. Т. ВЛИЯНИЕ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ SiO<sub>2</sub> : ME НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОГЕНЕРИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2022. №3 (90) [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-tonkoplenochnyh-pokrytiy-sio2-me-na-effektivnost-fotogeneriruyuschih-elementov>.

41 Баранов Д.Г. Поглощение и генерация света в плазмонных композитах: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.13. – Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, 2016 - 124 с.

42 H.R. Stuart and D. G. Hall / Island size effects in nanoparticle-enhanced photodetectors // Appl. Phys. Lett., 1998, 73, 3815.

43 D. Derkacs, S.H. Lim, P. Matheu, W. Mar, and E.T. Yu / Improved performance of amorphous silicon solar cells via scattering from surface plasmon polaritons in nearby metallic nanoparticles // Appl. Phys. Lett., 2006, 89, 093103.

44 S. Pillai, K.R. Catchpole, T. Trupke, and M. A. Green / Surface plasmon enhanced silicon solar cells // J. Appl. Phys., 2007, 101, 093105.

45 K.R. Catchpole and A. Polman / Design principles for particle plasmon enhanced solar cells // *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 93, 191113.

46 Matheu P, et al. Metal and dielectric nanoparticle scattering for improved optical absorption in photovoltaic devices. *Appl Phys Lett* 2008;93. 113108.

47 Lim SH, et al. Photocurrent spectroscopy of optical absorption enhancement in silicon photodiodes via scattering from surface plasmon polaritons in gold nanoparticles. *J Appl Phys* 2007;101. 104309.

48 Ye F. et al. Embedded metallic nanopatterns for enhanced optical absorption. In: *Proceedings of SPIE, next generation (nano) photonic and cell technologies for solar energy conversion II*, vol. 8111; 1-7, Sept 2011. p. 811103.

49 Lee JY, Peumans P. The origin of enhanced optical absorption in solar cells with metal nanoparticles embedded in the active layer. *Opt Express* 2010;18:10078–87.

50 Spinelli P, Polman A. Prospects of near-field plasmonic absorption enhancement in semiconductor materials using embedded Ag nanoparticles. *Opt Express* 2012;20:A641–54.

51 Pfeiffer TV, et al. Plasmonic nanoparticle films for solar cell applications fabricated by size-selective aerosol. *Energy Procedia* 2014;60:3–12.

52 Wang E, et al. Resonant enhancement of dielectric and metal nanoparticle arrays for light trapping in solar cells. *Opt Express* 2012;20:13226–37.

53 Beck FJ, et al. Tunable light trapping for solar cells using localized surface plasmons. *J Appl Phys* 2009;105. 114310.

54 Mendes MJ, et al. Broadband light trapping in thin film solar cells with self-organized plasmonic nanocolloids. *Nanotechnology* 2015;26. 135202.

55 Beck FJ, et al. Asymmetry in photocurrent enhancement by plasmonic nanoparticle arrays located on the front or on the rear of solar cells. *Appl Phys Lett* 2010;96. 033113.

56 Zhang D, et al. Aluminum nanoparticles enhanced light absorption in silicon solar cell by surface plasmon resonance. *Opt Quant Electron* 2015;47:1421–7.

57 Pillai S, et al. Surface plasmon enhanced silicon solar cells. *J Appl Phys* 2007;101. 093105.

58 Ono A, et al. Broadband absorption enhancement of thin SOI photodiode with highdensity gold nanoparticles. *Opt Mater Expr* 2014;4:725–32.

59 Fosli CH, et al. Plasmonics for light trapping in silicon solar cells. *Energy Procedia* 2011;10:287–91.

60 Catchpole KR, Polman A. Plasmonic solar cells. *Opt Express* 2008;16:21793–800.

61 Temple TL, et al. Influence of localized surface plasmon excitation in silver nanoparticles on the performance of silicon solar cells. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2009;93:1978–85.

62 Atalla MRM. Multiple excitations of surface-plasmon-polariton waves in an amorphous silicon p-i-n solar cell using Fourier harmonics and compound gratings. *J Opt Soc Am B* 2014;31:1906–14.

63 Prabhathan P, Murukeshan VM. Surface plasmon polariton-coupled waveguide back reflector in thin-film silicon solar cell. *Plasmonics* 2016;11:253–60.

64 Ferry VE, et al. Plasmonic nanostructure design for efficient light coupling into solar cells. *Nano Lett* 2008;8:4391–7.

65 Mercaldo LV, et al. Optical performance of Ag-based back reflectors with different spacers in thin film Si solar cells. *Energy Procedia* 2015;84:221–7.

66 Chantana J, et al. Localized surface plasmon enhanced microcrystalline silicon solar cells. *J Non-Cryst Solids* 2012;358:2319–23.

67 This is Science: плазмонный камуфляж — уже реальность [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/post/391033/?mobile=no>.

68 Наноплазмоника. Кванты плазмы твердых тел [Электронный ресурс]. – URL: <https://studme.org/224417/tehnika/nanoplazmonika>.

69 Xiangchao Ma, Ying Dai, Lin Yu, Bai-Biao Huang. (2016). Energy Transfer in Plasmonic Photocatalytic Composites. *Light: Science & Applications*. 5. e16017. 10.1038/lsa.2016.17.

70 Zhang XM, Chen YL, Liu RS, Tsai DP . Plasmonic photocatalysis. *Rep Prog Phys* 2013; 76: 046401.

71 Linic S, Christopher P, Ingram DB . Plasmonic-metal nanostructures for efficient conversion of solar to chemical energy. *Nat Mater* 2011; 10: 911–921.

72 Kelly KL, Coronado E, Zhao LL, Schatz GC . The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment. *J Phys Chem B* 2002; 107: 668–677.

73 Ma XC, Dai Y, Yu L, Lou ZZ, Huang BB et al. Electron-hole pair generation of the visible-light plasmonic photocatalyst Ag@AgCl: enhanced optical transitions involving midgap defect states of AgCl. *J Phys Chem C* 2014; 118: 12133–12140.

74 Физические основы квантовых приборов [Электронный ресурс]. – URL: <https://siblec.ru/radiotekhnika-i-elektronika/pribory-svch-i-opticheskogo-diapazona/8-fizicheskie-osnovy-kvantovykh-priborov#:~:text=Переходы%20с%20излучением%20или%20поглощением,низкие%20энергитические%20состояния%20с%20называется%20метастабильными.>

75 Burda C, Chen XB, Narayanan R, El-Sayed MA . Chemistry and properties of nanocrystals of different shapes. *Chem Rev* 2005; 105: 1025–1102.

76 Mahmoud MA, Chamanzar M, Adibi A, El-Sayed MA . Effect of the dielectric constant of the surrounding medium and the substrate on the surface plasmon resonance spectrum and sensitivity factors of highly symmetric systems: silver nanocubes. *J Am Chem Soc* 2012; 134: 6434–6442.

77 Hövel H, Fritz S, Hilger A, Kreibig U, Vollmer M . Width of cluster plasmon resonances: bulk dielectric functions and chemical interface damping. *Phys Rev B* 1993; 48: 18178–18188.

78 Endriz JG, Spicer WE . Surface-plasmon-one-electron decay and its observation in photoemission. *Phys Rev Lett* 1970; 24: 64–68.

79 Lehmann J, Merschdorf M, Pfeiffer W, Thon A, Voll S et al. Surface plasmon dynamics in silver nanoparticles studied by femtosecond time-resolved photoemission. *Phys Rev Lett* 2000; 85: 2921–2924.

80 Hodak JH, Martini I, Hartland GV. Spectroscopy and dynamics of nanometer-sized noble metal particles. *J Phys Chem B* 1998; 102: 6958–6967.

81 Liu ZW, Hou WB, Pavaskar P, Aykol M, Cronin SB . Plasmon resonant enhancement of photocatalytic water splitting under visible illumination. *Nano Lett* 2011; 11: 1111–1116.

82 Manjavacas A, Liu JG, Kulkarni V, Nordlander P . Plasmon-induced hot carriers in metallic nanoparticles. *ACS Nano* 2014; 8: 7630–7638.

83 Mubeen S, Hernandez-Sosa G, Moses D, Lee J, Moskovits M . Plasmonic photosensitization of a wide band gap semiconductor: converting plasmons to charge carriers. *Nano Lett* 2011; 11: 5548–5552.

84 Grätzel M. Photoelectrochemical cells. *Nature* 2001; 414: 338–344.

85 Hashimoto K, Irie H, Fujishima A . TiO<sub>2</sub> photocatalysis: a historical overview and future prospects. *Jpn J Appl Phys* 2005; 44: 8269.

86 Cushing SK, Li JT, Meng FK, Senty TR, Suri S et al. Photocatalytic activity enhanced by plasmonic resonant energy transfer from metal to semiconductor. *J Am Chem Soc* 2012; 134: 15033–15041.

87 Sahoo H. Förster resonance energy transfer – a spectroscopic nanoruler: principle and applications. *J Photochem Photobiol C* 2011; 12: 20–30.

88 Dressel M, Grüner G . Electrodynamics of solids: optical properties of electrons in matter. Cambridge: Cambridge University Press; 2002.

89 Naik G.V., Shalaev V.M., Boltasseva A. (2013). Alternative Plasmonic Materials: Beyond Gold and Silver. *Advanced Materials*, - 2013 – 25(24), 3264–3294. doi:10.1002/adma.201205076.

90 Смирнова Т.Д., Желобицкая Е.А., Данилина Т.Г. Влияние поверхностного плазмонного резонанса на флуориметрические свойства молекул и комплексов // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-poverhnostnogo-plazmonnogo-rezonansa-na-fluorimetricheskie-svoystva-molekul-i-kompleksov> (дата обращения: 22.09.2023).

91 Ma, XC., Dai, Y., Yu, L. et al. Energy transfer in plasmonic photocatalytic composites. *Light Sci Appl* 5, e16017 (2016). URL: <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.17>.

92 Румянцева М.Н. Химические и электрохимические методы формирования наночастиц [Электронный ресурс]. – URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/chemical-and-electrochemical-methods-for-the-formation-of-nanoparticles-M.pdf>.

93 Процесс нанесения покрытия методом погружения (окунания) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.czl.ru/applications/dip-coating-technology/>.

94 Технология нанесения покрытия методом центрифугирования [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.czl.ru/applications/spin-coating-technology/>.

95 Краткий обзор CVD процессов, CVD-систем и их компонентов [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.cryosystems-mve.ru/dl/CVD\\_processes\\_and\\_equipment.pdf](http://www.cryosystems-mve.ru/dl/CVD_processes_and_equipment.pdf).

96 CVD или PVD [Электронный ресурс]. – URL: [https://enex.market/library/recommendations/cvd\\_ili\\_pvd/](https://enex.market/library/recommendations/cvd_ili_pvd/).

97 Износостойкое покрытие инструмента PVD и CVD [Электронный ресурс]. – URL: <https://pitools.ru/articles/pvd-coating.html>.

98 В.Н. Игумнов Основы высокотемпературной криоэлектроники // Учебное пособие./ Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006.- 186 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://studfile.net/preview/3497342/>.

99 Кондрашин В.И. Прозрачные проводящие покрытия на основе оксидов металлов. Технологии получения, свойства и области применения / Кондрашин В.И., Рыбакова Н.О., Ракша С.В. [и др.]. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – № 13 (93). – С. 128-132. – [Электронный ресурс]. – URL.: <https://moluch.ru/archive/93/20562/>.

100 P.M. Voroshilov, C.R. Simovski, P.A. Belov and A.S. Shalin / Light-trapping and antireflective coatings for amorphous Si-based thin film solar cells // J. Appl. Phys., 2015, V.117, pp. 203101.

101 Патент РФ 2331140. Гетероэлектрический фотоэлемент / Самойлов В.Н. Заявл. 09.01.2007. Опубл. 10.08.2008.

102 Plasmonic light trapping in thin-film Si solar cells / P. A. Spinelli, V. E. Ferry, J. van de Groep et al. // J. Optics. 2012.- V.14. –P. 024002.

103 V.E. Bochenkov, D.S. Sutherland / From Rings to Crescents: A Novel Fabrication Technique Uncovers the Transition Details // Nano Lett. 2013, 13, 1216-1220.

104 S. Chervinskii, V. Sevriuk, I. Reduto, A. Lipovskii / Formation and 2D-patterning of silver nanoisland film using thermal poling and out-diffusion from glass // Journal of Applied Physics – 2013. – V.114. – №. 22. – P. 224301;

105 S. Chervinskii, I. Reduto, A. Kamenskii, I. S. Mukhin, A. A. Lipovskii /2D-patterning of self-assembled silver nanoisland films // Faraday discussions. – 2016. – V.186 – P.107-121.

106 R.W. Johnson, A. Hultqvist, S.F. Bent / A brief review of atomic layer deposition: from fundamentals to applications // Materials Today. – 2014. – V.17. – N.5. – P.236-246.

107 Tyrk M.A., Gillespie W.A., Seifert G., Abdolvand A. / Picosecond pulsed laser induced optical dichroism in glass with embedded metallic nanoparticles // Optics Express. – 2013. – V.21. – N.19. – P.21823–8.



108 Электрофорез [Электронный ресурс]. – URL: <http://prkom.ru/linii-okraski/yelektroforez/?ysclid=lmbg4p2da1404680781>.

109 Кукушкин Д. Ю. Разработка физико-технических основ электроимпульсного метода синтеза наночастиц металлов и сплавов в жидкой диэлектрической среде : Дис. ... канд. техн. таук: 05.27.06 / Д.Ю. Кукушкин. – Москва, 2019.

110 Запрет Евросоюза на поставку кремния в РФ ударит по производству гражданской продукции, но не военной [Электронный ресурс]. – URL: <https://3dnews.ru/1063801/zapret-es-na-postavku-kremniya-udarit-po-proizvodstvu-gragdanskoj-produktsii-no-ne-voennoy>.

111 Российский кремний для солнечной энергетики ждет инвестиций [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ras.ru/news/shownews.aspx?id=da763122-111a-4daf-b7bf-00c3ac122ba5>.

112 Броня кремний, и микросхемы быстры [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5304944>.

113 В России впервые создали кремний из отечественных материалов [Электронный ресурс]. – URL: <https://dtf.ru/hard/1257735-v-rossii-vpervye-sozdali-kremniy-iz-otechestvennyh-materialov>.

114 Патент РФ №2381829. Способ приготовления гидрозоля / Голубев В.Н., Слепцов В.В. Тянгинский А.Ю. Заявл. 23.06.2008. Опубл. 20.02.2010.

115 Патент РФ №94492. Устройство для получения наночастиц токопроводящих материалов / Бабкин Е.А., Голубев В.Н., Коленков И.А., Слепцов В.В. Тянгинский А.Ю., Церулев М.В., Шмидт В.И. Заявл. 26.02.2010. Опубл. : 27.05.2010.

116 Н.С. Кудряшева, Л.Г. Бондарева. Физическая и коллоидная химия. – М.: Юрайт, 2023. — 379 с.

117 Г.В. Лямина, Е.А. Вайтулевич. Химия. Коллоидные системы. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2009. – 22 с.

118 Строение мицеллы. Двойной электрический слой (ДЭС), современные представления о строении ДЭС. Факторы, определяющие величину дзета-потенциала [Электронный ресурс]. – URL: [https://studopedia.ru/19\\_272286\\_stroenie-mitselli-dvoynoy-elektricheskiy-sloy-des-sovremennie-predstavleniya-o-stroenii-des-faktori-opredelyayushchie-velichinu-dzeta-potentsiala.html](https://studopedia.ru/19_272286_stroenie-mitselli-dvoynoy-elektricheskiy-sloy-des-sovremennie-predstavleniya-o-stroenii-des-faktori-opredelyayushchie-velichinu-dzeta-potentsiala.html).

119 T.Yu. Moguilnaia, A. Botikov. Research of the mechanism of excitation of parasitic modes in the laser module "the source - fibre ". 16th International Laser Physics Workshop.

120 Backscattering coefficient [Электронный ресурс]. – URL: <https://edutinker.com/glossary/backscattering-coefficient/>.

121 Хлебцов Б.Н., Ханадеев В.А., Пылаев Т.Е., Хлебцов Н.Г. Метод динамического рассеяния света в исследованиях силикатных и золотых наночастиц // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Физика. 2017. №2.

122 Дёмичев, И.А., Сидоров, А.И. / Учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторного практикума. – СПб: Университет ИТМО, (2016). – 52 с.

123 Plasmonic Wire Grating [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.comsol.ru/model/plasmonic-wire-grating-wave-optics-14705>.

124 Петелин Н. А. Исследование процесса нанесения наночастиц металлов методом электрофореза для модификации свойств элементов приборов : ВКРМ: 12.04.01 / Н.А. Петелин. – Москва, 2022.

125 Крит Б.Л., Федотикова М.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Исследование возможности повышения мощности фотоэлектрических преобразователей модификацией их поверхностей нанокластерами серебра // Сборник тезисов докладов Научно-практической конференции учёных России и Хорватии. – М.: НИТУ «МИСиС», 2019. – С. 164-165.

126 Крит Б.Л., Федотикова М.В. Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Горожеев М.Ю., Кувшинов В.В., Морозова Н.В. Изменение мощностных характеристик фотоэлектрических элементов путем модификации принимающей поверхности нанокластерами серебра // Материалы XVI-й Международной научно-технической конференции «Быстрозакалённые материалы и покрытия»: Матер. конф. – Москва : Пробел-2000, 2019. – С. 290-293.

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

128 Федотикова М.В., Петелин Н.А. Изменение мощностных характеристик фотоэлектрических преобразователей путем модификации

принимающей поверхности фотоэлементов // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2020. – С. 689-690.

129 Васильев А.М., Крит Б.Л., Могильная Т.Ю., Морозова Н.В., Кукушкин Д.Ю, Федотикова М.В., Пагава Л.Л., Горожеев М.Ю. Технология осаждения нанокластерных покрытий на поверхность пластин фотоэлектрических преобразователей // XV международная научная школа-семинар «Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия»: Сборник тезисов. / под ред. д.ф.-м.н., проф. В.В. Самарцева. – Москва: Тровант, 2020. – С. 66-67.

130 Могильная Т.Ю., Васильев А.М., Ботиков А.Г., Крит Б.Л., Пагава Л.Л., Федотикова М.В. Применение явления плазмонного резонанса в практических приложениях // XV международная научная школа-семинар «Фундаментальные исследования и инновации: нанооптика, фотоника и когерентная спектроскопия»: Сборник тезисов. / под ред. д.ф.-м.н., проф. В.В. Самарцева. – Москва: Тровант, 2020. – С. 68-70.

131 Крит Б.Л., Федотикова М.В., Петелин Н.А. Повышение характеристик фотоэлектрических преобразователей, применяемых в аэрокосмическом приборостроении // Материалы VII научно-практической конференции памяти О. В. Успенского : сборник докладов / под ред. В.А. Сорокина – М. : Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2021. – С. 97-102.

132 Петелин Н.А., Федотикова М.В., Могильная Т.Ю., Васильев А.М., Крит Б.Л. Изучение взаимодействия наночастиц серебра с материалом подложки фотоэлектрического преобразователя // Материалы VII научно-практической конференции памяти О. В. Успенского : сборник докладов / под ред. В.А. Сорокина – М. : Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2021. – С. 140-147.

133 Петелин Н.А., Федотикова М.В., Васильев А.М. Разработка оборудования и технологий для модификации перспективных материалов для изготовления элементов приборов // «Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. – С. 323-324.

134 Федотикова М.В., Крит Б.Л., Петелин Н.А., Морозова Н.В., R. Wu. Электрофоретический метод нанесения покрытий на фотоэлектрические преобразователи // XIII Плесская международная научная конференция. Тезисы докладов. – Иваново: Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, 2022. – С. 49.

135 Пагава Л.Л., Могильная Т.Ю., Петелин Н.А., Васильев А.М., Федотикова М.В., Крит Б.Л., Разработка методики исследования явления плазмонного резонанса на поверхности фотоэлектрических преобразователей с покрытием из наносеребра // Материалы VIII научно-практической конференции памяти О. В. Успенского : сборник докладов / под ред. В.А. Сорокина – М. : Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2022. – С. 79-83.

136 Федотикова М.В., Крит Б.Л., Могильная Т.Ю., Горожеев М.Ю., Петелин Н.А., Пагава Л.Л., Бабенков И.А., Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Ремизовская Н.А. Статистическая методика оценки параметров фотоэлектрических преобразователей // Материалы III Международной научно-практической конференции «Перспективные технологии и материалы». – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2022. – С. 221-225.

137 Крит Б.Л., Федотикова М.В., Могильная Т.Ю., Горожеев М.Ю., Петелин Н.А., Бабенков И.А., Пагава Л.Л. Развитие электрофоретического метода нанесения покрытий // Материалы XIX-й Международной научно-технической конференции «Быстрозакалённые материалы и покрытия». – Москва : Пробел-2000, 2022. – С. 83-88.

138 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.

139 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 № 128 (17), 2023 [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-17>, свободный (дата обращения 24.04.2023).

140 Крит Б.Л., Федотикова М.В., Медвецкова М.М. Концептуальная модель электрокинетических процессов при ПЭО // Мат-лы Всероссийской научно-методической конференции «Белкинские чтения». – Кострома, 2023. – С. 140-145.

141 Березняк В.А., Якимович Б.А., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Федотикова М.В. Использование солнечных элементов для медицинского электрооборудования // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. – Севастополь: СевГУ, 2023. С.431-434.

142 Кувшинов В.В., Крит Б.Л., Морозова Н.В., В.А. Березняк В.А., Федотикова М.В. Технологии повышения мощностных характеристик фотоэлектрических преобразователей // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. – Севастополь: СевГУ, 2023. С.502-507.

143 Березняк В.А., Касницкий А.Д., Власов Н.А., Пагава Л.Л., Федотикова М.В. Использование солнечных батарей для питания различного оборудования // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность. – Севастополь: СевГУ, 2023. С.434-438.

144 Знакомство с Minitab 16 [Электронный ресурс]. – URL: [https://sixsigma.ru/wp-content/uploads/2014/05/RU16\\_MeetMinitab.pdf](https://sixsigma.ru/wp-content/uploads/2014/05/RU16_MeetMinitab.pdf)

145 Лемешко Б.Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона [Электронный ресурс]. – URL: [https://ami.nstu.ru/~headrd/seminar/publik\\_html/guid\\_normal\\_tets.pdf](https://ami.nstu.ru/~headrd/seminar/publik_html/guid_normal_tets.pdf).

146 Shinde Dipak, Ahn Do-Young, Lee Deok, Shrestha Nabeen K., Lee Joong, Lee Hwa, Mane R., Han Sung-Hwan. (2014). A coordination chemistry approach for shape controlled synthesis of indium oxide nanostructures and its photoelectrochemical properties. Journal of Materials Chemistry. 2. 2, 5490–5498. 10.1039/c3ta15407f.

147 Shinde Dipak, Ahn Do-Young, Lee Deok, Shrestha Nabeen K., Lee Joong, Lee Hwa, Mane R., Han Sung-Hwan. (2014). A coordination chemistry approach for shape controlled synthesis of indium oxide nanostructures and its photoelectrochemical properties. Journal of Materials Chemistry. 2. 2, 5490–5498. 10.1039/c3ta15407f.

148 Mateja Krzysztof, Skarka Wojciech, Drygała, Aleksandra. (2022). Efficiency Decreases in a Laminated Solar Cell Developed for a UAV. Materials. 15. 8774. 10.3390/ma15248774.

149 ГОСТ 28976-91. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции по температуре и облученности результатов измерения вольт-амперной характеристики. Дата введения 01.01.1992. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 5 с.

150 ГОСТ Р 56127-2014. Возобновляемая энергетика. Солнечная энергетика. Элементы солнечные. Техническое описание и технологические данные солнечных элементов на основе кристаллического кремния. Дата введения 01.07.2016. – Москва: Стандартформ, 2015. – 8 с.

151 ГОСТ 23752.1-92. Платы печатные. Методы испытаний. Дата введения 01.01.1993. – Москва: Издательство старндартов, 1992. – 56 с.

152 Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М. : Наука, 1985. 300 с.

153 В.В. Кувшинов, Б.Л. Крит, Н.В. Морозова, Д.Ю. Кукушкин, А.В. Савкин // Возможности повышения мощности фотоэлектрических преобразователей модификацией их поверхностей нанокластерами серебра // Вектор науки ТГУ. № 1 (43). 2018. С. 36-42.

154 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

155 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

156 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

157 Смердов Р.С. // Нанослои на основе функционализированного пористого кремния для новых систем солнечных элементов // Труды конференции–конкурса молодых физиков. № 52. Т 25. 2019. С. 276-285

158 N. Ashcroft, N. Mermin, Solid State Physics: In Two Volumes, Mir, Moscow, 1979, p. 821

159 A. Tsibulnikova, V. Bruchanov, V. Slezhkin, 2015 features of the functions of the dielectric constant of silver and gold in various media, Eurasian Union Sci. (ESU) 23 (11) (2015) 146–149

160 V.A. Tarlykov, Coherent Optics Study Guide, St. Petersburg, 2011, pp. 117

161 Demichev, A. Sidorov, Numerical simulation of the optical properties of metallic nanoparticles, in: Textbook. Manual for the Implementation of a Laboratory Workshop, ITMO University, St. Petersburg, 2016, p. 52.

162 Photovoltaic devices made of crystalline silicon, in: Methods of Correction of the Measurement Results of the Current–Voltage Characteristics (IEC

891-87): GOST 28976-91, IPK Standards Publishing House, 2004, p. 42, (National Standard of Russia).

163 E.V. Abkhalimov, B.G. Ershov, The size effect in the catalytic activity of AgcorePtshell nanoparticles, *Colloid J+* 76 (4) (2014) 381–386.

164 L. Grigoryeva, G. Knyazev, A. Tolstik, Propagation of surface plasmon polaritons at the metal – insulator interface with thermal optical, *Proc. Russ. Acad. Sci. Phys. Ser.* 79 (12) (2015) 1622–1626.

165 I.L. Knunyants (Ed.), *Chemical Encyclopedia: In 5t*, in: *Soviet encyclopedia*, vol. 2, 1990, 508–671.

166 D. Sotnikov, A. Zherdev, B. Dzantiev, Detection of intermolecular interactions based on registration of surface plasmon resonance, in: *Advances in Biological Chemistry*, Vol. 55, Institute of Biochemistry named after A.N. Bach, Federal Research Center «Fundamentals of Biotechnology» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2015, pp. 391–420

167 B.G. Ershov, Metal nanoparticles in aqueous solutions: electronic, optical and catalytic properties, *Russ. Chem. J.* XLV (3) (2001) 20–30

168 Federal Research Center «Fundamentals of Biotechnology» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 2015, pp. 391–420.

169 V.A. Liopo, E.V. Ovchinnikov, The effect of nanoscale particles on their electronic properties, *Progress. Technol. Eng. Syst.* 55 (1) (2016) 3–9

170 B.L. Krit, V.V. Kuvshinov, D.Yu. Kukushkin, N.V. Morozova, Yu.A. Omelchuk, T.V. Revenok, V.V. Sleptsov, The application of nanocluster coatings for modification of receiving surface of thermal-photoelectric energy converters, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* 56 (1) (2020) 100–104, <http://dx.doi.org/10.3103/S106837552001010X>.

171 S. Divinsky, S. Zakharov, O. Shmatko, Grain-boundary diffusion and segregation in baked nanocrystalline materials with a hierarchical structure, *Success. Phys. Met./Usp. Fiz. Met.* 7 (2006) 1–39.

172 Siriwan Sakultanchareonchai, Natthaphol Chomsaeng, Meechai Thepnarat, et al., The role of boron on grain refinement in sterling silver alloy, *Chiang Mai J. Sci.* 39 (2) (2012) 264–275.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт о результатах тестирования фотоэлектрических поликремниевых элементов с нанокластерным покрытием



#### АКТ

#### о результатах тестирования фотоэлектрических монокремниевых элементов с нанокластерным покрытием

Мы, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Нанотехнологии» Горох Г.Г. и заведующая научно-исследовательской лабораторией «Прикладная плазмоника» Бондаренко А.В. настоящим подтверждаем, что в период с 22 мая по 25 мая 2021 в НИЛ 4.10 и НИЛ 4.8 НИЧ БГУИР были проведены исследования функциональных характеристик серийно выпускаемых фотоэлектрических монокремневых фотоэлементов модулей российского производства PS-250 и опытных образцов, представляющих собой фотоэлектрические элементы с нано-кластерным покрытием из частиц серебра.

Результаты тестирования показали, что фотоэлектрические элементы без покрытия обеспечивали электрическую мощность  $130 \pm 10$  Вт (ток 4,0 А, напряжение 32,5 В). Тестирование фотоэлектрического элемента с нанокластерным покрытием показало достижение средней мощности  $150 \pm 10$  Вт (ток 4,3 А, напряжение 35 В).

Наличие плазмонных свойств нанокластерного покрытия подтверждено путем регистрации спектров оптического поглощения в диапазоне 200-1100 нм и спектров поверхностно-усиленного комбинационного рассеяния молекул органического красителя, адсорбированных на фотоэлементах с нанесенным покрытием.

Оперативные ведомости измеренных параметров, тестируемых образцов, находятся в НИЛ 4.10, НИЛ 4.8 НИЧ БГУИР.

Зав. НИЛ 4.10 «Нанотехнологии»

Г.Г. Горох

Зав. НИЛ 4.8 «Прикладная плазмоника»

А.В. Бондаренко



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт о применении результатов НИР



#### АКТ

#### о применении результатов НИР

Результаты исследований учёных Московского авиационного института (национального исследовательского университета) были применены нашим предприятием при оснащении системами солнечного электроснабжения ряда учреждений санаторно-курортного комплекса Республики Крым.

В качестве объектов были использованы два фотоэлектрических модуля PSM 4 мощностью 135 Вт. Конструктивно стандартный (контрольный) модуль представляет собой панель из последовательно соединённых 72 фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) из монокристаллического кремния, покрытых защитным закалённым стеклом марки M1.

На поверхность ФЭП экспериментального модуля было нанесено покрытие из наночастиц серебра по технологии, разработанной в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете).

Проведённые замеры в стандартных условиях тестирования (температура 25<sup>0</sup>С, интенсивность освещения 1 000 Вт\*м<sup>2</sup>) показали величину тока 4,6 А и напряжение 34 В при максимальной мощности. Таким образом, отмечено увеличение энергетической эффективности экспериментального модуля по сравнению с контрольным на 15,8%, предположительно – за счёт повышения КПД ФЭП.

Ген.директор ООО «ЭНЕРГОСПЕЦСТРОЙ»

