

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

#### Тема работы

**Получение тонкопленочных люминесцентных покрытий методом магнетронного распыления**

УДК 621.793.1:539.216.2:621.385.64

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ01	Рунц Артем Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор, НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	Д.Т.Н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. НОЦ Б.П. Вейнберга	Юрьев Ю.Н.	К.Т.Н.		

#### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Т.Б.	К.Э.Н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	Д.Т.Н.		

#### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент, НОЦ Б.П. Вейнберга	Сиделёв Д.В.	К.Т.Н		

Томск – 2022 г.

Компетенции выпускников ООП «Пучковые и плазменные технологии» по направлению 16.04.01  
Техническая физика (2020 года приёма)

Код компетенции	Наименование компетенции
УК(У)-1	Способность осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, выработать стратегию действий
УК(У)-2	Способность управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способность организовывать и руководить работой команды, выработать командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способность применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способность анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способность определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы её совершенствования на основе самооценки
ОПК(У)-1	Способность к профессиональной эксплуатации современного научного и технологического оборудования и приборов, предназначенных для использования в области технической физики
ОПК(У)-2	Способность демонстрировать и использовать углублённые теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, в том числе из области технической физики
ОПК(У)-3	Готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
ОПК(У)-4	Готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности в области технической физики
ОПК(У)-5	Способность осуществлять научный поиск и разработку новых перспективных подходов и методов к решению профессиональных задач, готовность к профессиональному росту, к активному участию в научной деятельности, конференциях, выставках и презентациях
ПК(У)-1	Способность критически анализировать современные проблемы технической физики, ставить задачи и разрабатывать программу исследования, выбирать адекватные способы и методы решения экспериментальных и теоретических задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
ПК(У)-2	Способность самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для оптимизации параметров объектов и процессов с использованием стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств
ПК(У)-3	Готовность осваивать и применять современные физико-математические методы для решения профессиональных задач в области технической физики, составлять практические рекомендации по использованию полученных результатов
ПК(У)-4	Способность представлять результаты исследования в формах отчётов, рефератов, публикаций и презентаций
ПК(У)-5	Готовность принимать непосредственное участие в учебной и учебно-методической работе по направлению «Техническая физика», участвовать в разработке программ учебных дисциплин и курсов
ПК(У)-6	Способность проводить учебные занятия, лабораторные работы, обеспечивать практическую и научно-исследовательскую работу обучающихся
ПК(У)-7	Способность применять и разрабатывать новые образовательные технологии
ПК(У)-8	Способность разрабатывать и оптимизировать современные наукоёмкие технологии в областях технической физики, связанных с применением пучковых и плазменных технологий, с учетом экономических и экологических требований
ПК(У)-9	Способность разрабатывать, проводить наладку и испытания, эксплуатировать наукоёмкое технологическое и аналитическое оборудование
ПК(У)-10	Готовность решать прикладные инженерно-технические и технико-экономические задачи с помощью пакетов прикладных программ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий  
Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика  
Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Сиделёв Д. В.  
 (Подпись)    (Дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ01	Рунц Артему Алексеевичу

Тема работы:

Получение тонкопленочных люминесцентных покрытий методом магнетронного распыления	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	Приказ №47-1/с от 16.02.2022

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.2022
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b> <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду)</i>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вакуумно-плазменная установка для осаждения тонкопленочного люминофорных покрытий состава иттрий-алюминиевый гранат легированный церием;</li> <li>2. Вакуумная электропечь СНВЭ-1,7.3.1,7/20;</li> <li>3. Быстродействующий спектральный эллипсометр «Эллипс-1891»;</li> <li>4. Рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-</li> </ol>
---	---

<i>среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	7000S; 5. Стенд измерения тока фотолюминесценции (сконструирован АО «Катод»).
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b> (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Методы формирования люминофорных покрытий;</li> <li>2. Осаждение тонкопленочного люминофорного покрытия методом магнетронного осаждения, при одновременном распылении <math>Y_3Al_5O_{12}</math> и Се мишеней;</li> <li>3. Проведение высокотемпературного отжига тонких пленок при разных температурах;</li> <li>4. Исследование зависимость разряда МРС при распылении мишени Се в зависимости от концентрации реактивного газа;</li> <li>5. Получить зависимости скорости роста люминофорных покрытий на основе <math>Y_3Al_5O_{12}</math>:Се от мощности цериевого магнетрона, а также количества реактивного газа в вакуумной камере;</li> <li>6. Исследовать структурные и физические свойства люминофорного покрытия в зависимости от технологических параметров получения.</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b> (с точным указанием обязательных чертежей)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Титульный лист;</li> <li>2. Введение;</li> <li>3. Принцип действия ЭОП;</li> <li>5. Цель и задачи;</li> <li>6. Подбор параметров режима осаждения;</li> <li>7. Методика проведения эксперимента;</li> <li>8. Технологические параметры формирования тонкопленочного люминофора;</li> <li>9. Приборы и методы исследования;</li> <li>10. Скорость осаждения тонкопленочного люминофора;</li> <li>11. Структура люминофора до отжига;</li> <li>12. Свойства люминофора в зависимости от количества церия структуре;</li> <li>13. Свойства люминофора в зависимости от парциального давления кислорода;</li> <li>14. Свойства люминофора в зависимости от температуры отжига;</li> <li>15. Научное положение, выносимое на защиту;</li> <li>16. Заключение;</li> <li>17. Список публикаций студента</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> (с указанием разделов)</p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p style="text-align: center;">«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»</p>	<p style="text-align: center;">Доцент ОСГН, Якимова Т. Б., к.э.н.</p>
<p style="text-align: center;">«Социальная ответственность»</p>	<p style="text-align: center;">Профессор ООД ШБИП ТПУ, Федорчук Ю.М., д.т.н.</p>
<p style="text-align: center;">«Раздел на английском языке»</p>	<p style="text-align: center;">Старший преподаватель ОИЯ, Кабрышева О.П.</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>1. Приборы ночного видения, структура люминесцентного экрана, способы нанесения люминесцентного покрытия;</p>	

2. Описание экспериментального оборудования; 3. Результаты исследований и их анализ; 4. Methods for applying luminescent coating.	
<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	07.02.2022

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г. А.	Доктор физико-математических наук		07.02.2022

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ91	Рунц А. А.		07.02.2022

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ01	Рунц Артему Алексеевичу

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Б.П. Вейнберга</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Техническая Физика

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость выполняемых работ, материальных ресурсов, согласно применяемой техники и технологии, в соответствии с рыночными ценами. Оклады в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	- районный коэффициент- 1,3; - накладные расходы – 16%
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	- страховые взносы во внебюджетные фонды 30 %.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	Анализ потенциальных потребителей результатов исследования, конкурентных технических решений, оценка готовности проекта к коммерциализации, проведение SWOT-анализа.
2. Разработка устава научно-технического проекта	Определение целей и результатов проекта, организационной структуры проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски	Формирование плана и графика проекта: - определение структуры работ; - определение трудоемкости работ. Формирование бюджета затрат проекта.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	Расчет показателей сравнительной эффективности проекта, интегрального показателя ресурсоэффективности

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений 2. Матрица SWOT 3. Календарный план 4. Бюджет НИ
---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Якимова Татьяна Борисовна	к.э.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
ОДМ01	Рунц Артем Алексеевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
ОДМ01	Рунц Артему Алексеевичу

<b>Школа</b>	<b>Инженерная школа ядерных технологий</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	Б.П. Вейнберга
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	16.04.01 Техническая физика

**Тема дипломной работы: Получение тонкопленочных люминесцентных покрытий для видимого диапазона спектра, методом магнетронного распыления**

<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования являются тонкопленочные люминесцентные покрытия состава иттрий-алюминиевый гранат легированный церием при различных параметрах осаждения, и при различных параметрах отжига.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов <ul style="list-style-type: none"> <li>• Природа воздействия</li> <li>• Действие на организм человека</li> <li>• Нормы воздействия и нормативные документы (для вредных факторов)</li> <li>• СИЗ коллективные и индивидуальные</li> </ul> 1.2. Анализ выявленных опасных факторов : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Термические источники опасности</li> <li>• Электроопасность</li> <li>• Пожароопасности</li> </ul>	1. Вредные факторы: 1.1 Недостаточная освещенность; 1.2 Нарушения микроклимата, оптимальные и допустимые параметры; 1.3 Шум, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения, ПДУ, СКЗ, СИЗ; 1.5 УФИ, СКЗ, СИЗ; 1.6. ИК излучение, СКЗ, СИЗ; 2. Опасные факторы: 2.1 Электроопасность; класс электроопасности помещения, безопасные номиналы I, U, R <sub>заземления</sub> , СКЗ, СИЗ; Проведен расчет освещения рабочего места; представлен рисунок размещения светильников на потолке с размерами в системе СИ; 2.2 Пожароопасность, категория пожароопасности помещения, марки огнетушителей, их назначение и ограничение применения; Приведена схема эвакуации.
<b>2. Экологическая безопасность:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Выбросы в окружающую среду</li> <li>• Решения по обеспечению экологической безопасности</li> </ul>	Наличие промышленных отходов (бумага-черновики, вторцвет- и чермет, пластмасса, перегоревшие люминесцентные лампы, оргтехника) и способы их утилизации;
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>• разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>• разработка действий в результате возникшей ЧС</li> </ul>	Рассмотрены 2 ситуации ЧС: 1) природная – сильные морозы зимой, (аварии на электро-, тепло-коммуникациях, водоканале, транспорте); 2) техногенная – несанкционированное проникновение посторонних на рабочее место (возможны проявления вандализма, диверсии,



и мер по ликвидации её последствий.	промышленного шпионажа), представлены мероприятия по обеспечению устойчивой работы производства в том и другом случае.
<b>4. Перечень нормативно-технической документации.</b>	– ГОСТы, СанПиНы, СНиПы

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ТПУ	Федорчук Ю.М.	д.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ01	Рунц А.А.		

## РЕФЕРАТ

**Выпускная квалификационная работа** содержит 149 с., 32 рис., 21 табл., 68 источников, 1 приложение на английском языке.

**Ключевые слова:** электронно-оптический преобразователь, катодолюминесценция, люминофор, высокочастотное магнетронное распыления, среднечастотное магнетронное распыление, иттрий-алюминиевый гранат.

**Объектом исследования** являются формирование тонкопленочного люминофора состава иттрий-алюминиевый граната легированного церием методом магнетронного распыления с последующим высокотемпературным отжигом в вакуумной среде.

**Цель работы** – выявить зависимость физических свойств тонкопленочного люминофора на основе  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  полученных методом магнетронного распыления от технологических параметров осаждения.

В процессе исследования были изучены структурные, а также физические свойства тонкопленочного люминофора в зависимости от различных параметров осаждения. Был проведен анализ структурных и физических свойств полученных покрытий методом рентгеновской спектроскопии.

В результате проделанной работы показано, что скорость осаждение тонкопленочного люминофора увеличивается при повышении потока кислорода, при недостаточном количестве кислорода в адсорбируемом покрытии после отжига формируется нежелательная фаза  $Al_2Y_3$ , препятствующая эффекту люминесценции, процесс отжига приводит к перекристаллизации люминофора, что ведет к увеличению тока люминесценции.

**Область применения:** оптические покрытия для приборов ночного видения.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	14
Глава 1. Приборы ночного видения, структура люминесцентного экрана, способы нанесения люминофорного покрытия .....	17
1.1 Технологии ночного видения.....	17
1.2 Основные элементы приборов ночного видения .....	19
1.3 Люминофорные экраны.....	21
1.3 Параметры катодлюминесцентных экранов.....	28
1.4 Способы нанесения люминесцентного покрытия.....	30
1.4.1 Седиментационные методы нанесения люминофора.....	30
1.5.1.1 Нанесение люминофора методом осаждения .....	32
1.5.1.2 Метод пульверизации .....	33
1.5.1.3 Нанесение люминофора методом центрифугирования .....	35
1.5.2 Сублимационные методы нанесения люминофора.....	36
1.5.2.1 Метод электронно-лучевого испарения.....	37
1.5.2.2 Метод магнетронного распыления.....	38
1.6 Люминофорные покрытия на основе $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ полученного методом ВЧ магнетронного распыления.....	43
Глава 2. Описание экспериментального оборудования .....	46
2.1 Экспериментальная ионно-плазменная установка.....	46
2.2 Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов .....	48
2.3 Импульсная магнетронная распылительная система.....	49
2.4 Быстродействующий спектральный эллипсометр «Эллипс-1891» .....	53
2.5 Рентгеновский дифрактометр .....	54
2.5 Стенд измерения фотолюминесценции .....	56
Глава 3. Результаты исследований и их анализ .....	58
3.1 Влияние концентрации реактивного газа на электрические параметры разряда.....	58
3.2 Параметры осаждения тонкопленочного люминофора .....	60
3.3 Параметры высокотемпературного отжига.....	61

3.4	Скорость осаждения тонкопленочного люминофора .....	62
3.5	Структурные характеристики YAlO:Ce пленки .....	64
3.6	Ток фотолюминесценции .....	69
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	72
4.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	72
4.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования .....	73
4.1.2	Анализ конкурентных технических решений .....	74
4.2	SWOT-анализ.....	76
4.3	Планирование научно-исследовательских работ .....	78
4.3.1	Структура работ в рамках научного исследования .....	78
4.3.2	Определение трудоемкости выполнения работ .....	79
4.3.3	Разработка графика проведения научного исследования .....	80
4.4	Бюджет научно-технического исследования (НТИ) .....	85
4.4.1	Расчет материальных затрат НТИ .....	85
4.4.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ .....	86
4.5	Основная заработная плата исполнителей темы .....	88
4.6	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	90
4.7	Накладные расходы .....	91
4.8	Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	91
4.9	Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	92
4.10	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность» .....	96
5.	Социальная ответственность .....	98
5.1	Введение.....	98
5.2	Анализ имеющихся вредных и опасных факторов .....	99
5.3	Категории тяжести труда .....	101
5.4	Вредные факторы .....	102

5.4.1 Отклонение показателей микроклимата.....	102
5.4.3 Превышение уровня производственного шума на рабочем месте .	104
5.4.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны.....	105
5.4.5 Расчет искусственного освещения .....	106
5.4.4 Электромагнитные поля в производственных помещениях .....	110
5.4.5. Повышенное инфракрасное, ультрафиолетовое излучение .....	113
5.5 Опасные факторы.....	114
5.5.1 Электрический ток.....	114
5.5.2 Пожарная безопасность.....	119
5.6 Экологичность разрабатываемого проекта .....	122
5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ЧС).....	124
5.8 Выводы по разделу «Социальная ответственность».....	125
Заключение .....	126
Список публикаций студента.....	128
Список используемой литературы .....	129
Приложение А .....	135

## Введение

В настоящее время крайне актуальным является обеспечение наблюдения в сложных условиях: ночью, при пониженной прозрачности атмосферы (мгла, туман, дождь, снегопад, пыль, задымленность и др.), при воздействии интенсивных световых помех (излучение фар, прожекторов, сигнальных огней и др.). Решение данной задачи необходимо как в военной отрасли (разведка, прицеливание, наведение средств поражения, вождение военного транспорта), так и в гражданской (разведка полезных ископаемых, их добыча и транспортировка, строительно-монтажные и ремонтно-восстановительные работы, вождение транспорта, поисково-спасательные работы, обеспечение охраны объектов и пр.) [1]. Данная проблема может быть решена с помощью приборов ночного видения (ПНВ).

Оптико-электронные приборы ночного видения (ОЭП НВ) устройства созданные для наблюдения за различными объектами в условиях ограниченной визуальной видимости при недостаточной естественной ночной освещенности (ЕНО). Работа подобных приборов построена на различии отражательной способности элементов объектов наблюдения и окружающего их фона, а также за счет теневых эффектов. В ОЭП НВ невидимое для человеческого глаза изображение на входе прибора многократно усиливается и преобразуется в видимое изображение на выходе [2]. Одним из ключевых элементов ОЭП НВ является катодолюминесцентный экран.

Под катодолюминесцентным экраном подразумевают экран электронно-лучевого прибора с люминофорным покрытием на внутренней стороне фронтального стекла, светящимся при электронной бомбардировке. Люминофором является вещество, излучающее излучение в видимом спектре при воздействии некоторым видом лучистой энергии, данное явление названо люминесценцией.

Процесс нанесения люминофора на поверхность экрана весьма трудоемкий, требующий строгого соблюдения вакуумной гигиены. Из

многочисленных способов нанесения люминофора в настоящее время в основном используются – метод осаждения, метод пульверизации и метод центрифугирования. Люминофоры, нанесенные данными методами, обладают большой толщиной, порядка десятых долей миллиметра. При такой толщине в слое люминофора происходит процесс рассеяния генерируемого излучения, что приводит к ухудшению частотно-контрастной характеристики. Также стоит отметить сложность формирования люминофорной пленки по ранее перечисленным методикам.

В связи с вышеперечисленным, актуальность данной работы заключается в улучшении параметров люминесцентного узла, а именно, четкости и частотно-контрастной характеристики, а также повышение технологичности производства люминофорных экранов, в отличии от текущих средств формирования.

**Целью настоящего исследования** является получение данных о влиянии технологических параметров магнетронного осаждения и отжига на свойства тонкопленочного люминофора.

Основными **задачами** представляемой работы состояли в том, чтобы:

- 1) Поиск информации по теме нанесения тонкопленочного люминофора методом магнетронного осаждения, выбор исследуемого состава покрытия;
- 2) Подбор технологических параметров осаждения;
- 3) Определения скорости осаждения тонкопленочного люминофора;
- 4) Исследование свойств полученных пленок.

**Объектом исследования** являются тонкопленочные люминофоры состава  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ , сформированные методом магнетронного осаждения.

**Предмет исследования** – структурные свойства тонкопленочного люминофора в зависимости от параметров осаждения.

**Научная новизна работы** заключается в использовании метода магнетронного осаждения для нанесения тонкопленочного люминофора состава  $YAG:Ce$ .

### **Практическая значимость работы:**

1. Выявлено, что при осаждении тонкопленочного люминофора методом магнетронного распыления, скорость осаждения тонкой пленки значительно зависит от количества реактивного газа в вакуумной камере в ходе процесса осаждения.

2. Продемонстрирована возможность изменения структуры люминофора при проведении высокотемпературного отжига после процесса осаждения.

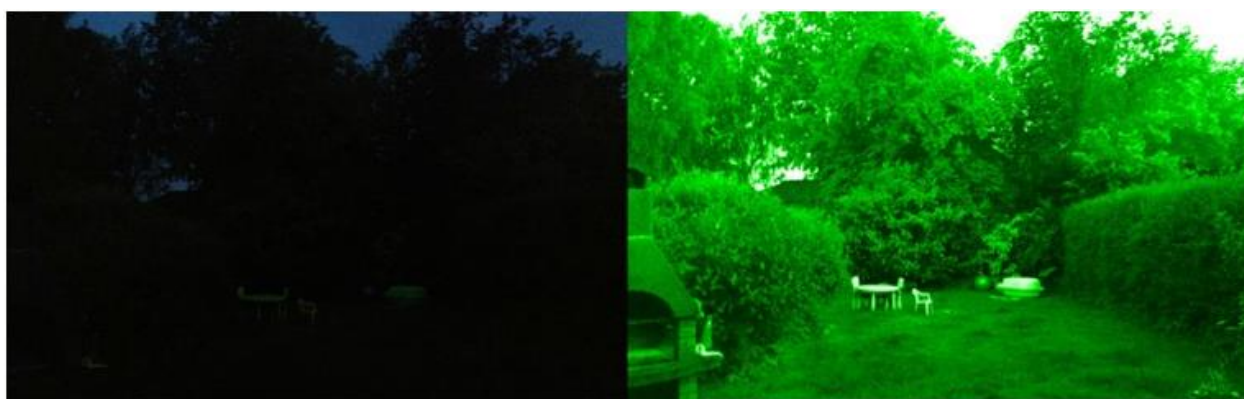


# Глава 1. Приборы ночного видения, структура люминесцентного экрана, способы нанесения люминофорного покрытия

## 1.1 Технологии ночного видения

В настоящее время все приборы ночного видения условно можно разделить на два основных класса в зависимости от технологии, на которой они основаны:

1) **Приборы ночного видения на основе усиления света.** Данные приборы работают в видимом ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне света, для нормальной работы устройству необходимо незначительное внешнее освещение. Ключевым элементом такого прибора является электронно-оптический преобразователь (ЭОП). В результате преобразования и усиление исходного излучения, человек видит изображение, окрашенное в оттенки зеленого цвета, как это показано на рисунке 1.1 (б).



а)

б)

Рисунок 1.1 – Преобразование изображения через ПНВ: (а) натурное изображение; (б) преобразованная картина через ПНВ [1]

2) Второй же технологией ночного видения, не требующей окружающего освещения, – является технологией тепловидения. Приборы на основе данной технологии работают на регистрации инфракрасного излучения и дальнейшем определении разницы температур между фоном и объектами на

переднем плане. Известно, что все объекты излучают энергию в инфракрасном диапазоне (ИК) в зависимости от их температуры, чем выше температура тела, тем более интенсивно он испускает ИК излучение. Вследствие того, что тела нагреты неравномерно, следовательно, излучение неравномерное, складывается некая картина распределения ИК-излучения. Приборы работающие на данном принципе регистрируют инфракрасное излучение (3-30 мкм) от окружающих объектов и создают электронное изображение (рисунок 1.2).

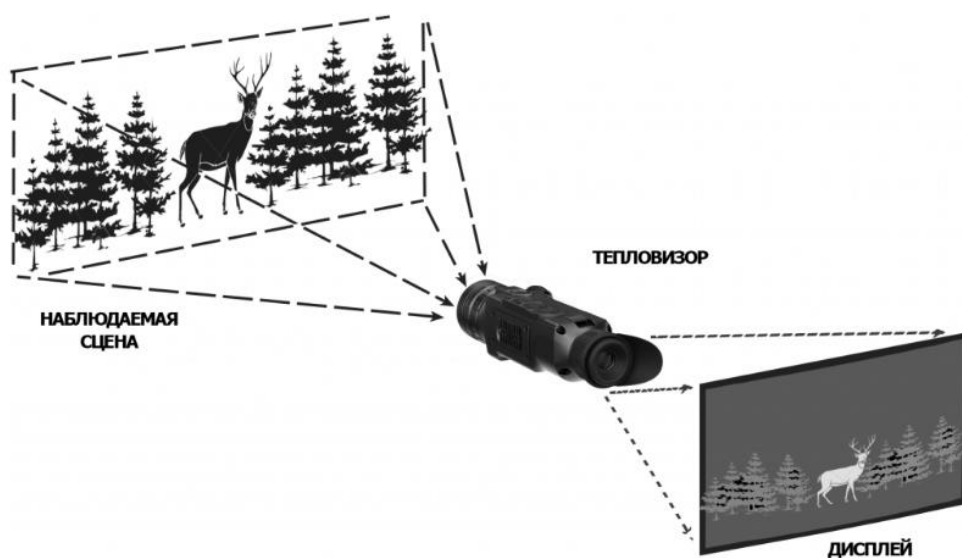


Рисунок 1.2 – Преобразование ИК-излучения в видимое изображение

Преимуществами приборов ночного видения работающих на принципе усиления света: улучшенная чувствительность при слабом освещении; улучшенное видимое изображение, что обеспечивает наилучшее распознавание и идентификацию; высокое разрешение, малая мощность и стоимость. Одним из ключевых преимуществ данной технологии является возможность выполнения распознавания целей, а не просто обнаружение, как это обычно бывает в случае тепловидения. К недостаткам данной технологии можно отнести то, что для использования методов усиления света, требуется некоторое количество окружающего света [2].

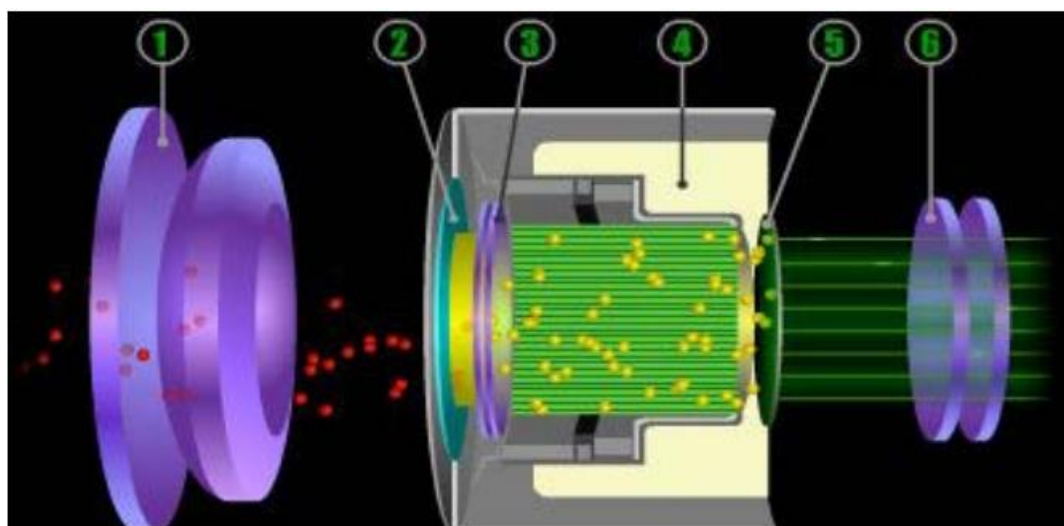
В настоящее время наиболее популярным и широко используемым методом, лежащим в основе ПНВ, является метод повышения качества

изображения. Этот класс приборов ночного видения является предметом многочисленных исследований.

## 1.2 Основные элементы приборов ночного видения

Приборы ночного видения (ПНВ) – это электрооптические устройства, которые преобразуют и интенсифицируют (усиливают) улавливаемое излучение до уровня, видимого человеческим глазом [3]. ПНВ усиливает отраженное слабое излучение, которое может исходить от естественных источников, таких как звезды или лунный свет, или же от искусственных источников, таких как уличные фонари или инфракрасные осветители.

Основным компонентом такого устройства является электронно-оптический преобразователь (ЭОП), основными элементами которого являются: фотокатод (работающий по принципу внешнего фотоэффекта), электронно-оптическая система фокусировки (ускоряющая, а также фокусирующая пучок электронов), и катодолуминесцентный экран. Помимо этого в состав ПНВ также входит: объектив, окуляр, блок питания и механическая конструкция [3.3].



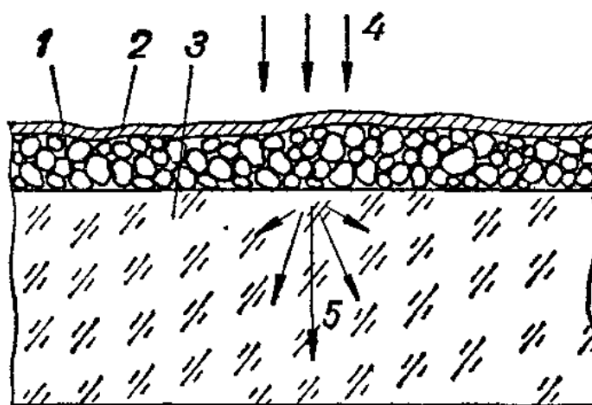
1 – объектив; 2 – фотокатод; 3 – микроканальная платина; 4 – источник питания высокого напряжения; 5 – люминофорный экран (2-5 – ЭОП); 6 – окуляр.

Рисунок 1.3 – Принцип работы электронно-оптического преобразователя [3]

Линза объектива собирает частицы света (фотоны), поступающие от наблюдаемого объекта, и фокусирует их на экране ЭОП. Внутри ЭОП фотокатод поглощает эти фотоны, преобразуя их в электроны, после чего электроны многократно энергетически усиливаются, фокусируются и попадают люминесцентный экран. При попадании ускоренного электрона на люминофор нанесенный на поверхность экрана, под действием катодолюминесценции экран начинает испускать фотоны в видимой части спектра (рисунок 1.3) [4].

Так как люминофорный экран излучает свет такой формы и степени интенсивности, как и свет, собираемый объективом, яркое ночное изображение, наблюдаемое в окуляр, точно соответствует картине внешнего наблюдения [5].

Структуру катодолюминесцентного экрана можно представить в разрезе, как показано на рисунке 1.4.



1 – кристаллы люминофора; 2 – алюминиевая пленка; 3 – стеклянная основа; 4 – падающий электронный пучок; 5 – световые лучи.

Рисунок 1.4 – Катодолюминесцентный экран в разрезе [6]

Люминофорный экран генерирует излучение в зеленом спектре, так как человеческий глаз способен различать большее количество оттенков зеленого цвета, чем любого другого цвета [7]. Люминофорный экран наряду с фотокатодом определяет основные функции ЭОП как преобразователя спектра и усилителя яркости изображения.

### 1.3 Люминофорные экраны

Как отмечалось выше, одним из основных элементов, составляющих электронно-оптический преобразователь, является люминесцентный экран, преобразующий энергию падающего на экран электронного пучка, в энергию света, обычно в видимой части спектра. Экран электронно-оптического преобразователя представляет собой слой светящейся под воздействием электронов вещества, нанесенного на прозрачную подложку. Эффект генерации излучения в видимой части спектра, свечение экрана, как правило, образуется с противоположной бомбардируемой электронами поверхности экрана, т.е. через прозрачную подложку [8].

Свойства экрана в основном определяются природой вещества (люминофором), преобразующего энергию электронов в видимый свет. Однако на практике также было доказано, что тип подложки, способ и методика нанесения слоя люминофора, его структура, толщина, наличие примесей и дополнительных покрытий, а также термическая обработка и некоторые другие факторы могут заметно изменить свойства экрана [9].

Научные исследования люминофоров имеют весьма долгую историю, насчитывающую более 100 лет. Первые прототипы люминофоров на основе ZnS, довольно случайно, были впервые получены в 1866 году молодым французским химиком Теодором Сидо. Это открытие положило начало научным исследованиям и синтезу люминофоров.

С конца 19 века до начала 20 века Филипп Э. А. Ленард вместе с коллегами провели ряд активных и обширных исследований люминофоров, добившись при этом впечатляющих результатов. Группа исследователей получили множество различных видов люминофоров на основе халькогенидов щелочноземельных металлов (сульфидов и селенидов) и сульфида цинка, провели множество исследований люминесцентных свойств. В ходе работы исследователи установили принцип синтеза люминофоров этих соединений

путем введения в материалы металлических примесей в процессе отжига [10]. Металлические примеси, называемые активаторами, в процессе отжига образуют центры люминесценции в матрице.

Несмотря на то, что о явлении свечения веществ было известно достаточно давно, основная идея катодолюминесценции была разработана лишь в 30-40 годах прошлого столетия. В настоящее время некоторые аспекты теории требуют уточнения.

После окончания Второй мировой войны исследования люминофоров и твердотельной люминесценции резко расширились. Этому способствовал прогресс в области физики твердого тела, особенно в физике полупроводников и дефектов решетки; успехи в понимании оптической спектроскопии твердых тел, особенно ионов переходных металлов и редкоземельных ионов [11].

Большинство люминофоров состоят из прозрачной основы (матрицы) и активатора, т.е. небольшого количества преднамеренно добавленных (легированных) примесных атомов, распределенных равномерно в объеме матрицы, процессы, происходящие в слое люминофора условно можно разделить на две части: процессы, связанные с матрицей самого материала, а также процессы, происходящие с участием активатора [12]. Процессы пропускания, поглощения и отражения связаны с материалом матрицы. С участием атомов примеси в материале люминофора проходят такие процессы как: возбуждение электронной оболочки, миграция и передача энергии падающего электрона в виде фотона.

Испускание света из материала происходит за счет двух механизмов: теплового излучения и люминесценции. В то время когда все атомы матрицы участвуют в тепловом процессе, в процессе люминесценции очень небольшое количество атомов (как правило, это примеси или дефекты кристаллов) возбуждаются и участвуют в процессе излучения света.

Согласно современным представлениям, способность люминофора к катодолюминесценции можно объяснить следующим образом, при снятии возбуждения происходит переход электрона с более высокого энергетического

уровня на один из разрешенных низких энергетических уровней. В результате этого перехода, электрон испускает часть своей энергии в кванта света, энергия генерируемого кванта света определяется разностью энергетических уровней [12].

Для более подробного рассмотрения процесса явления катодолюминесценции на рисунке 1.4 представлена диаграмма энергетических уровней, являющейся типичной для многих катодолуминофоров.

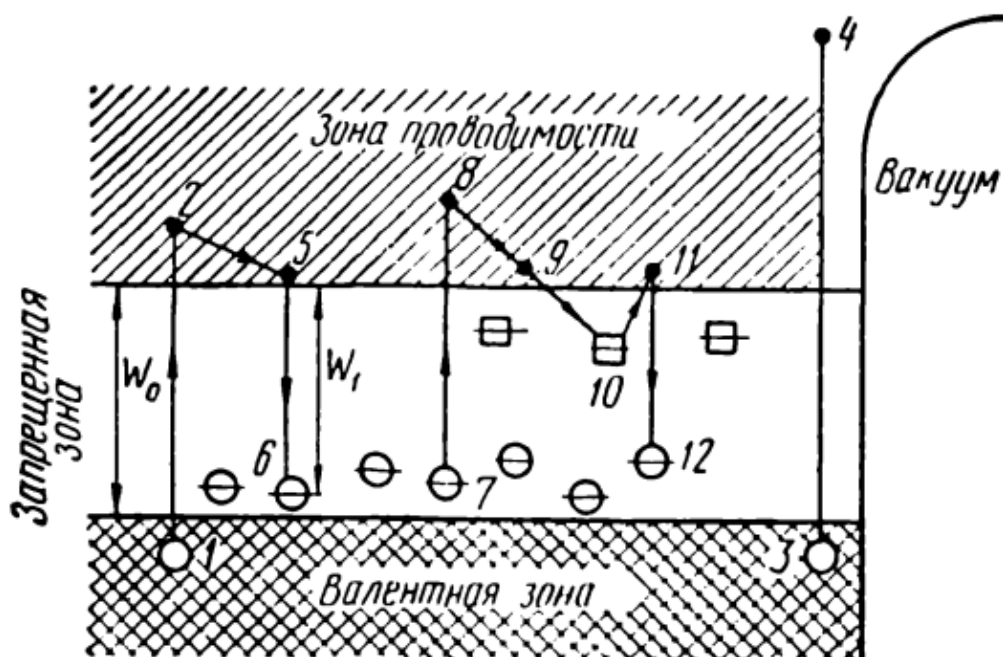


Рисунок 1.5 – Схема возникновения катодолюминесценции [12]

Из представленной схемы возникновения катодолюминесценции на рисунке 1.5, в широкой (1,5–2 эВ) запрещенной зоне  $W_0$  расположены так называемые локальные разрешенные уровни. Эти уровни, генерируются там из-за примесей, а также дефектов кристаллической структуры люминофора. Благодаря данной структуре можно сделать вывод, что по своим физическим свойствам, катодолуминофоры подобны примесным полупроводникам. Наличие дополнительных уровней внутри энергетической запрещенной зоны, играет важную роль в процессе генерации излучения в ходе процесса люминесценции, а также определяет их полупроводниковый характер,

В результате бомбардировки люминофора ускоренными электронами, в свою очередь возбуждающими эффект люминесценции, некоторая часть электронов из валентной зоны может перейти в зону проводимости (переходы 1–2, 3–4, 7–8). В том случае, если в ходе таких переходов электроны перемещаются в зону проводимости на энергетический уровень выше потенциального барьера (переход 3–4), тогда эти электроны могут эмитироваться из объема кристалла; в таком случае имеет место вторичная эффект электронной эмиссии. Данный процесс играет важную роль в работе электронно-лучевых приборов. Та часть электронов, что остается в зоне проводимости, увеличивает электропроводность кристалла. Такое явление известно под названием возбужденной проводимостью. Однако стоит сказать, что лишь малая часть вторичных электронов способна покинуть объем экран, а значительная их часть взаимодействует с поликристаллами люминофора, тем самым вызывая новые акты возбуждения люминофора. Также стоит отметить, что акты возбуждения вторичными и третичными электронами, более вероятны, в отличие от прямого возбуждения быстрыми (первичными) электронами.

Электроны, генерируемые в область зоны проводимости, но не из кристалла, переходят на нижележащие свободные энергетические (переходы 2–5, 8–9). Такие электроны имеют следующие возможности для процесса рекомбинации: с дыркой – переход или в валентную зону, или же на один из локальных уровней расположенных в запрещенной зоне (переход 5–6). Как показали проделанные теоретические расчеты, случай рекомбинации электрона с дыркой маловероятен (так как такой переход будет сопровождаться испусканием кванта света с энергией  $h\nu_0=W_0$ ). Более же вероятным является переход на один из примесных уровней в запрещенной зоне, образованный примесью. Такой переход, как правило, сопровождается испусканием кванта с энергией  $h\nu_1=W_1<W_0$ . Также стоит учесть, что поскольку реальный кристалл имеет целый ряд локальных уровней в запрещенной зоне, то спектр излучения катодоллюминофора обычно имеет определенную полосу с ярко выраженным



максимумом, соответствующую переходам электронов с нижнего уровня зоны проводимости на локальные уровни в запрещённой зоне. Также размытие спектра излучения в значительной степени обусловлено тепловыми колебаниями атомов кристаллической решетки.

Рассмотренный механизм генерации излучения в ходе катодолюминесценции позволяет предположить, что спектр излучения определяется только природой люминофора, и не зависит от параметров пучка, возбуждающего свечение (энергии электронов, плотности тока, скорости перемещения пучка по поверхности экрана). Однако полученные результаты демонстрируют, что изменение параметров падающего пучка в некоторых случаях способно влияет на спектр излучения люминесценции. Это влияние более заметно в случае наличия нескольких полос в спектре излучения. Данный эффект объясняется тем, что условия возбуждения для разных полос неодинаковы: коротковолновое излучение в большей степени возбуждается быстрыми (первичными) электронами, длинноволновое в свою очередь – медленными (вторичными, третичными). Исходя из этого можно сделать вывод, что увеличение ускоряющего напряжения ведет к возрастанию интенсивности коротковолнового излучения, что приводит к наблюдаемому изменению цвета свечения экрана.

Такие переходы как 1–2–5–6 протекают, как правило, весьма быстро за время ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с), поэтому процессы зажигания и затухания генерации излучения люминофора должны протекать практически мгновенно. На практике было показано, что возгорание в большинстве случаев протекает быстро, однако процесс затухания – спад яркости после прекращения бомбардировки ускоренными электронами растягивается во времени. Этот эффект можно объяснить тем, что электроны способны захватываться ловушками образованными в зоне проводимости, с последующим удерживанием в течение некоторого времени. Электронные ловушки представляют собой локальные дефекты кристаллической решетки. Из подобной ловушки электрон способен перейти в зону проводимости под

действием тепловых колебаний, после чего осуществить переход на один локальных уровней с испусканием кванта света с определённой энергией. Такой переход с задержкой в ловушке показан на представленной схеме в виде цепочки 7–8–9–10–11–12.

Как было указано выше, достаточно эффективное преобразование энергии электронного луча в излучение люминофора возможно лишь при наличии дефектов кристаллической решетки – локальных уровней в запрещенной зоне. В некоторых случаях подобные дефекты могут возникать при термической обработке люминофора. Например, при прогреве окиси цинка в кристаллической решетке обнаруживаются избыточные атомы цинка, т. е. имеет место нарушение стехиометрической закономерности. Такие же нарушения наблюдаются в некоторых вольфраматах, например в  $\text{CaWO}_4$  используемом в качестве катодолюминофора. Обычно для получения необходимой яркости свечения катодолюминофоры активируют, т. е. вводят в основное вещество, например, сульфид или силикат цинка, небольшое количество примесей, называемых активаторами. В качестве активаторов часто используются тяжелые металлы – Ag, Cu, Mg. Концентрация примеси-активатора обычно подбирается экспериментально, в большинстве случаев достаточны доли процента активатора по отношению к основному веществу. Следует отметить, что некоторые примеси к люминофорам не только не увеличивают яркости, но могут совершенно погасить свечение. Такими «отравляющими» многие люминофоры примесями являются железо и кобальт [13].

Поскольку основные свойства экрана зависят от катодолюминофора, требования, предъявляемые к экранам электронно-оптических приборов, являются определяющими в выборе люминофора. Первым и особенно важным требованием является высокая эффективность преобразования энергии падающих на поверхность люминофора электронов в генерируемое излучение. Учитывая это, люминофор должен обладать высоким энергетическим выходом (КПД), определяемый как отношение энергии генерируемого излучения

люминофора к энергии электронного пучка, бомбардирующего поверхность экрана. Энергетический выход люминофоров невелик (8–10%), у наиболее эффективных сульфидных люминофоров он достигает 15–20%. Второе, также весьма существенное требование – определенный состав излучения (цвет свечения) люминофора [14]. Очень важным является также определенный характер затухания свечения или длительность послесвечения (свечения после прекращения электронной бомбардировки). В некоторых случаях необходима неизменность спектра излучения при изменении параметров возбуждающего электронного луча. Немаловажную роль играют также вторично- эмиссионные свойства экрана, так как отвод электрического заряда с непроводящего экрана во многих типах приборов возможен только за счет вторичной эмиссии.

Общими требованиями, предъявляемым к люминофору, является его высокая физико-химическая стойкость ко всяческому воздействию. Люминофор при этом должен быть влагостойким, в противном случае возникает проблема с хранением и нанесением люминофорного покрытия на поверхность подложки. Люминофор при этом на должен изменять своих технических характеристик во время нагрева до температуры 400–450 °С. Люминофор должен сохранять свои параметры при измельчении до размера зерна в несколько микрон [15]. Парой к люминофору предъявляется высокая химическая стойкость к агрессивным средам, в частности к парам щелочных металлов, что вводятся в устройство во время изготовления фотокатодов. Еще одним важным условием, предъявляемым к люминофору, является то, что люминофор должен быть хорошим вакуумным материалом, т. е. легко дегазироваться и не выделять газы или пары при работе в вакуумном устройстве.

Как видно, требования, предъявляемые к люминофорам, являются достаточно жесткими, и удовлетворение этим требованиям часто оказывается довольно сложной задачей.

### 1.3 Параметры катодолуминесцентных экранов

Как было сказано ранее, характеристики катодолуминесцентного экрана определяются составом, толщиной слоя люминофора, размером зерна и методом нанесения люминофора, а также наличием дополнительных покрытий. Согласно предъявляемым требованиям в настоящее время разработаны стандартные типы экранов, обладающие определенными параметрами, такими как цвет и длительность свечения, светоотдача (или яркость), предельный (второй критический) потенциал.

Как уже было сказано ранее, люминофор должен обладать как можно более высоким энергетическим выходом, т.е. по сути как можно меньше рассеивать энергию падающего электронного пучка превращая ее в энергию излучения. Энергетический выход современных катодолуминесцентных экранов составляет порядка 0,1–0,15 [15].

Световыход является еще одним определяющим параметром люминофора. Этот параметр является характеристикой эффективности преобразования энергии падающего электронного пучка в энергию генерируемую люминофором. У электронно-оптических преобразователей используемых для визуального наблюдения за объектами, световой выход определяется как:

$$\xi = 638 \cdot \gamma \cdot \frac{\int r_{\lambda} \cdot K_{\lambda} \cdot d\lambda}{\int r_{\lambda} d\lambda} \left[ \frac{\text{ЛМ}}{\text{Вт}} \right], \quad (1.1)$$

где  $\gamma$  – энергетический выход люминофора;  $K_{\lambda}$  – относительная видность глаза;  $r_{\lambda}$  – спектральная интенсивность излучения экрана [16].

Отношение интегралов в этом выражении определяет спектральное соответствие излучения экрана и чувствительности глаза. Данное отношение будет равно 1 только для монохроматического излучения с длиной волны 555 нм, для всех остальных случаев, это отношение будет меньше единицы.

Во время эксплуатации, а также испытаниях ЭОП определяется не световой выход, а яркость свечения. Яркость свечения  $B_3$  определяется как сила света, излучаемая 1 м<sup>2</sup> светящейся поверхности в направлении к наблюдателю.

Зависимость яркости экрана, кд/м<sup>2</sup>, от параметров электронного пучка выражается выражением:

$$B_3 = \xi \cdot j \cdot (U_a - U_0)^n, \quad (1.2)$$

где  $\xi$  – световая отдача люминофор, лм/Вт;  $j$  – плотность тока электронного луча, А/см<sup>2</sup>;  $U_a$  – ускоряющее напряжение, В;  $U_0$  – минимальное значение ускоряющего напряжения (100-300 В), при котором возникает свечение;  $n$  – показатель степени, значение которого лежит в пределах 1–2,5 для разных люминофоров [17].

Отношение (1.2) демонстрирует, что для повышения яркости свечения экрана следует увеличивать ускоряющее напряжение, при этом оставляя плотность тока электронного пучка незначительной ( $10^{-5}$ - $10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>). Практика показала, что увеличение значения плотности тока приводит к перенасыщению яркости, нагреву и последующему разрушению слоя люминофора.

При использовании ПНВ для наблюдения за движущимися объектами, важную роль играют временные параметры ЭОП. Время преобразования энергии регистрируемого излучения фотокатодом в энергию электронов составляет порядка  $10^{-13}$  с. Последующее ускорение и размножение электронов при их движении в электрическом поле хоть и происходит дольше, но все же наибольшее значение на показатель быстродействия ЭОП оказывает люминофорное покрытие.

В то время как скорость процессов свечения экрана определяется квантовыми переходами в слое люминофора и относительно мало ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с), то время послесвечения может составлять от нескольких микросекунд и даже до нескольких часов, что является решающей характеристикой при выборе люминофора для ЭОП различного предназначения.

Разрешающая способность прибора ночного видения зависит от толщины люминофорного слоя экрана ЭОП, также от величины зерен и их расположения, и от технологии изготовления люминофорного экрана. Дело в том, что при достаточно толстом покрытии люминофора (много больше длины пробега электрона в твердом теле), генерируемое излучение при взаимодействии люминофора с падающим электроном может рассеиваться в толстом слое люминофора. Благодаря чему, изображение получаемое экраном может быть недостаточно четкое, это приводит к размытию генерируемой картины в работающем ПНВ [18].

#### **1.4 Способы нанесения люминесцентного покрытия**

Как правило, катодолуминесцентный экран представляет собой люминофорный слой, нанесенный на стеклянную (экран) подложку, покрытую тонким металлическим (алюминиевым) слоем (рисунок 1.4). В работах [19–27] довольно подробно описаны основные технологии изготовления люминесцентных экранов, а также операции изготовления люминофорных покрытий и органического подслоя для алюминирования. Несмотря на практическую ценность имеющихся работ, предлагаемые в них методы имеют ряд существенных недостатков, в основном они либо не экономичны и непроизводительны (фракционирование люминофоров, нанесение органической пленки методом облива [25]), либо требуют дальнейшей доработки (ультразвуковое диспергирование люминофоров [23], механические методы нанесения органической пленки [26] и т.д.).

##### **1.4.1 Седиментационные методы нанесения люминофора**

Одной из наиболее распространенных групп методов получения люминофорных покрытий является седиментация (оседание дисперсной фазы в жидкости под действием гравитационного поля или центробежной силы). К

седиментационным методам нанесения слоя люминофора можно отнести такие методы как метод центрифугирования, пульверизации, а также так называемый метод осаждения люминофора, все эти методы будут далее более детально рассмотрены. В процессе седиментации скорость осаждения, зависит таких параметров как масса, вязкость, плотность, размер зерен люминофора, а также от ускорения, силы тяжести и действующих на частицы центробежных сил.

Данные методы осаждения является наиболее простыми и универсальными, позволяющими получать равномерные люминофорные покрытия на поверхности прозрачной подложки. Недостатком этих методов является существенная длительность процесса. Причиной этого является неоднородность и замедленность кинетики адсорбции и структурообразования (полимеризации) связующего компонента рабочей суспензии на частицах люминофора и поверхности экрана. Также стоит отметить тот факт, что сформированные слои люминофора рыхлые и обладают крупнозернистой структурой, что обусловлено полидисперсностью исходных порошков люминофора, их высокой агломерированностью, дополнительной агрегацией в процессе седиментации, обусловленной свойствами дисперсионной среды рабочей суспензии.

Все эти факторы, приводят к ухудшению структуры люминофора, что в конечном итоге отрицательно сказываются на светотехнические характеристики люминесцентных узлов, и на параметров ПНВ в целом.

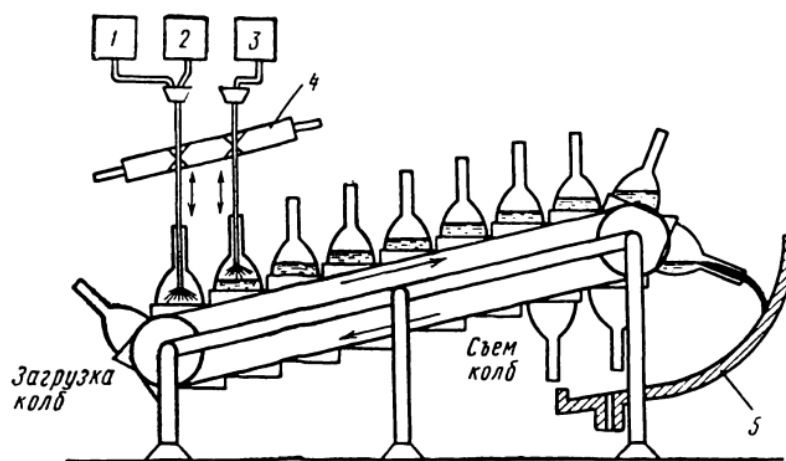
С целью повышения качества структуры люминофорных покрытий, и сокращения времени осаждения, в работах [23, 29] было предложено предварительное диспергирование люминофор в водном растворе силиката калия или других неорганических диспергаторов ультразвуковым (УЗ) полем, с дальнейшим введением полученной суспензии в силикатный гель. Затем люминофор наносится на поверхность подложки экрана.

### 1.5.1.1 Нанесение люминофора методом осаждения

Одним из видов седиментационного метода формирования люминофорной структуры является так называемый метод осаждения. Этим методом изготавливают экраны кинескопов, каскадные экраны радиолокационных трубок, а также экраны многих приборов специального назначения. Поскольку сульфидные люминофоры обычно имеют достаточно крупные зерна, то основным методом осаждения люминофоров этих составов является метод осаждения из жидкой фазы. При этом жидкая фаза должна прочно связывать частицы люминофора между собой и с подложкой. Средой, фиксирующей люминофор, чаще всего является раствор силиката калия. При растворении в деминерализованной воде силиката калия, помимо истинного раствора  $K_2SiO_3$ , образуется также коллоидный раствор двуокиси кремния ( $SiO_2$ ), обладающий свойством полимеризации. Коллоидные частицы  $SiO_2$  обволакивают зерна люминофора и прочно связывают их с подложкой. Поскольку полимеризация в обычных условиях протекает очень медленно (для закрепления люминофора потребовалось бы несколько десятков часов), в раствор силиката калия добавляют вещество, ускоряющее этот процесс, так называемый коагулятор. Нитрат стронция чаще всего используют в качестве коагулятора. При наличии коагулятора люминофор прочно фиксируется через 30–40 мин.

Схема полуавтоматического конвейера нанесения люминофора методом осаждения продемонстрирована на рисунке 1.6.





1, 2, 3 – сосуды со специальными растворами; 4 – дозатор раствора; 5 – слив раствора

Рисунок 1.6 – Схема полуавтомата для нанесения люминофора методом осаждения

Колбы устанавливаются на движущуюся ленту, над которой размещены сосуды 1, 2, 3 с необходимыми растворами. С помощью специальной каретки и дозирующего устройства 4 порции растворов заливаются в колбы.

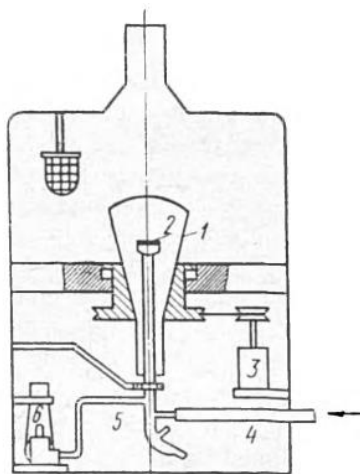
Скорость движения ленты рассчитана так, чтобы за время движения колб от момента заливки до слива 5 люминофор был надежно закреплен.

Помимо этого, также методом осаждения наносятся и двухслойные экраны. Осаждение, как правило, производится из предварительно заливаемого в колбу одного раствора силиката калия. В раствор силиката калия вводится сначала суспензия фотолюминофора, а по прошествии 15–20 мин. суспензия катодолюминофора. Слив раствора производится после полного осаждения катодолюминофора.

### 1.5.1.2 Метод пульверизации

Люминофоры, допускающие размельчение зерен до размера меньше 5 мкм, могут наноситься методом пульверизации. Этот метод широко распространен при изготовлении массовых осциллографических трубок с виллемитовыми экранами. Методом пульверизации может наноситься также

вольфрамат кальция. Схема установки для нанесения люминофора методом пульверизации представлена на рисунке 1.7.



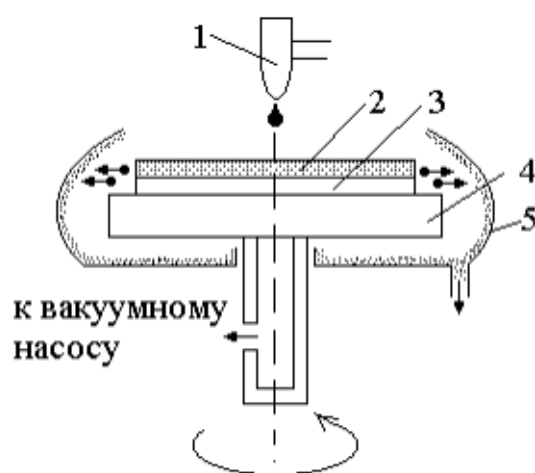
1 – колба, дно которой и есть экран; 2 – пульверизатор; 3 – мотор для вращения экрана; 4 – патрубок для подачи суспензии; 5 – патрубок для подачи сжатого воздуха; 6 – компрессор

Рисунок 1.7 – Схема установки для нанесения люминофора методом пульверизации

Колба 1 горлом вниз зажимается в держателе – патроне, вращающемся при помощи мотора 3 со скоростью около 50–60 об/мин. Внутри колбы вводится пульверизатор 2, который может качаться в вертикальной плоскости вдоль диаметра экрана. В пульверизатор через патрубок 4 подается суспензия люминофора, распыляемая струей сжатого воздуха от насоса 6 через патрубок 5. Качество экрана, нанесенного методом пульверизации, существенно зависит от быстроты высыхания светосостава, поэтому при использовании спиртово-ацетоновой суспензии колба подогревается до 50–60° С, а при нанесении люминофора из водной суспензии до 100–120° С. Подогрев колбы обеспечивает достаточно быстрое высыхание экрана, способствующее получению однородных по толщине и прочно удерживающихся на стекле слоев люминофора. Производительность метода достаточно велика, однако по качеству экраны, нанесенные методом пульверизации, несколько уступают остальным методам.

### 1.5.1.3 Нанесение люминофора методом центрифугирования

Пожалуй, наиболее распространенным методом формирования более равномерного слоя люминофора является метод центрифугирования. При нанесении данным методом на поверхность подложки удастся получить наибольшую равномерность покрытия. Люминофор при этом является однородным по толщине во всей площади экрана, без проколов, царапин и при этом имеет хорошую адгезию. Схематически нанесение люминофора методом центрифугирования представлено на рисунке 1.8.



1 – дозатор люминофора (капельница); 2 – слой люминофора; 3 – подложка;  
4 – диск центрифуги; 5 – сбор люминофора

Рисунок 1.8 – Схема процесса нанесения люминофора центрифугированием

При нанесении люминофора на поверхность экрана, под действием центробежных сил люминофор, находящийся в жидком состоянии растекается по поверхности экрана, образуя при этом сплошной однородный слой. За счет силы поверхностного натяжения, не весь люминофор удаляется с поверхности. Толщина формируемого на поверхности экрана слоя люминофора зависит от вязкости раствора, скорости вращения центрифуги, ускорения, а также времени центрифугирования. При использовании данного метода, возможно, получить тонкие слои с высокой степенью равномерности.

## 1.5.2 Сублимационные методы нанесения люминофора

Хоть экраны, сформированные методом осаждения, пульверизации и центрифугирования, и удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к экранам большинства электроннолучевых приборов, однако все же имеют некоторые недостатки. Люминофорный слой, нанесенный методом осаждения или пульверизации, формирует на подложке сравнительно рыхлый, неуплотненный слой, из-за чего толщина пленки оказывается довольно большой. Поэтому генерируемое излучение, излучаемое зернами люминофора, испытывает заметное рассеяние в толщине слоя светосостава, что в свою очередь приводит к кажущемуся увеличению диаметра светящегося пятна на экране и, как следствие, к снижению разрешающей способности прибора и уменьшению четкости и контрастности формируемого на экране изображения. В случае применения крупнозернистых люминофоров ограничение разрешающей способности может быть связано с размером зерна, так как, очевидно, диаметр светящегося пятна на экране принципиально не может быть меньше размера зерна люминофора, высвечивающегося под электронным лучом.

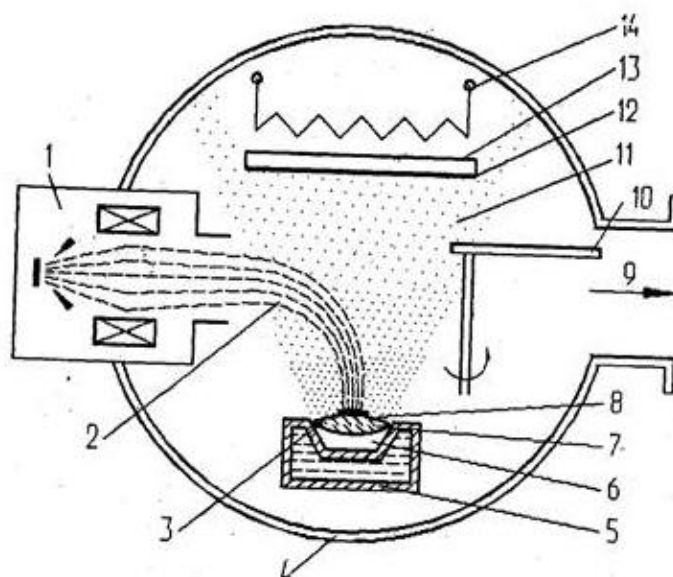
Свободны от этих недостатков так называемые сублимат-экраны, представляющие собой тонкие бесструктурные пленки, образующие оптический контакт с подложкой. Сублимат-экраны могут быть получены путем возгонки и осаждения люминофора на подложку либо напылением люминофора на тугоплавкую подложку (например, кварц) с последующим отжигом. Несмотря на явные преимущества в отношении однородности, разрешающей способности и контрастности, сублимат-экраны пока не получили широкого распространения главным образом из-за недостаточной световой отдачи люминофоров и технологической сложности изготовления.

### 1.5.2.1 Метод электронно-лучевого испарения

Одним из малоизвестных методов нанесения люминофорного покрытия является метод электронно-лучевого испарения (ЭЛИ). В работах [30–34] катодолюминесцентный экран был нанесен путем электронно-лучевого испарения мишени стехиометрического состава на сапфировые подложки.

Суть метода ЭЛИ заключается в испарении мишени под воздействием высокоэнергетического направленного сфокусированного пучка электронов [35]. В ЭЛИ катод эмитирует сфокусированный магнитным полем высокоэнергетический пучок электронов, который попадая на материал мишени, локально испаряет его. Испаренный материал с тигля адсорбируется на поверхность подложки, образуя тем самым покрытие стехиометрического состава с мишенью. Схематически процесс ЭЛИ представлен на рисунке 1.8.

В настоящее время метод ЭЛИ использует электронно-лучевые испарители для нанесения тонких пленок металлов, сплавов, а также диэлектриков [36]. При хорошей фокусировке падающего электронного луча можно получить высокую концентрацию мощности (до  $5 \cdot 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) приходящуюся на локальную площадь испаряемого материала, тем самым обеспечивая высокую температуру и высокую скорость испарения даже тугоплавких материалов.



1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – поверхность бомбардируемая пучком; 4 – стенки камеры; 5 – водоохлаждаемый тигель; 6 – испаряемый материал; 7 – испаряемая часть материала; 8 – поверхность испарения; 9 – выход к насосу; 10 – заслонка; 11 – поток испаряемого вещества; 12 – адсорбируемый материал; 13 – подложка; 14 – нагреватель подложки

Рисунок 1.8 – Принципиальная схема электронно-лучевого испарения материалов

При работе, электронно-лучевой испаритель размещают в вакуумной камере с давлением вакуума порядка  $\sim 10^{-4}$  Па. Такое низкое давление в вакуумной камере необходимо для минимизации влияния остаточной атмосферы на эффективность прохождения электронного пучка от катода до поверхности испаряемого материала, а также во избежание загрязнения другими материалами находящимися внутри камеры растущей пленке [36].

### 1.5.2.2 Метод магнетронного распыления

Еще одним методом получения люминофорного покрытия является метод магнетронного распыления. На сегодняшний день существует множество работ получения разного состава катодолуминесцентного покрытия методом

магнетронного распыления. В работах [37–43] исследователи получали различные по составу люминофорные покрытия методом высокочастотного (ВЧ) и среднечастотного магнетронного распыления.

Системы магнетронного распыления - к системам распыления диодного типа, в которых материал в качестве мишени распыляется путем бомбардировки поверхности заряженными ионами рабочего газа, образующегося в плазме аномально тлеющего разряда [44]. Процесс ионного распыления (рисунок 1.9) протекает при давлении в вакуумной камере от 0,05 до 1 Па. В качестве рабочих газов как правило используют Ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Основные виды покрытий, полученные магнетронным распылением мишени: керамические покрытия, углеродные покрытия, нанокompозиты, а также полный спектр металлических покрытий [45].

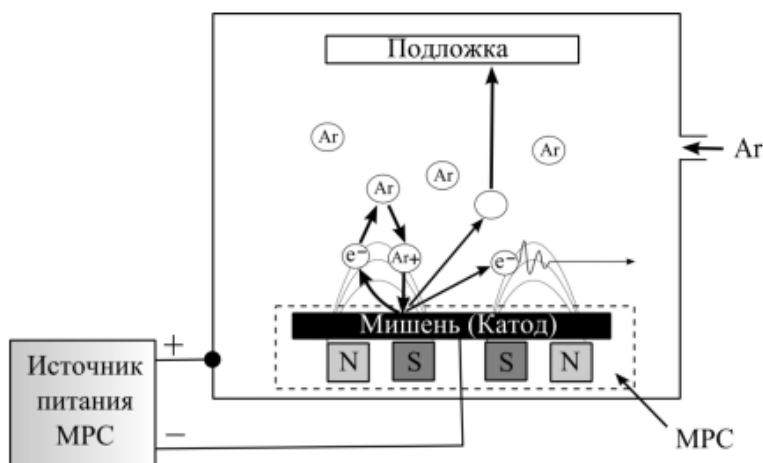


Рисунок 1.9 – Принцип магнетронного осаждения покрытий [46]

Основными элементами МРС являются магнитная система, катод являющийся мишенью, а также анод, в роли которого выступают стенки камеры и корпус магнетрона (рисунок 1.9). Источником питания системы является источник постоянного (DC) или импульсного (AC) тока с определенной частотой, а также с определенным коэффициентом заполнения импульса. Эрозия материала мишени происходит между местами выхода и входа силовых линий магнитного поля. За счет этого место распыления имеет

вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы.

В ходе образования разряда, первичный электрон попадает в магнитную ловушку, образованную скрещенными электрическим и магнитным полями. Под воздействием сил магнитного поля, электрон начинает двигаться по циклоиде, в процессе претерпевая столкновения с атомами газа, тем самым производя акты ионизации газа. Вследствие чего, заряженные ионы рабочего газа, под действием электрического поля, бомбардируют поверхность катода, что приводит к распылению её поверхности. В свою очередь электроны, охватившие катод, ускоряясь перпендикулярно электрическому полю, попадают на анод и в итоге захватываются им. Во время процесса распыления увеличение плотности ионного тока приводит к увеличению скорости распыления мишени, что в свою очередь напрямую связано с локализацией плазмы на распыляемой поверхности.

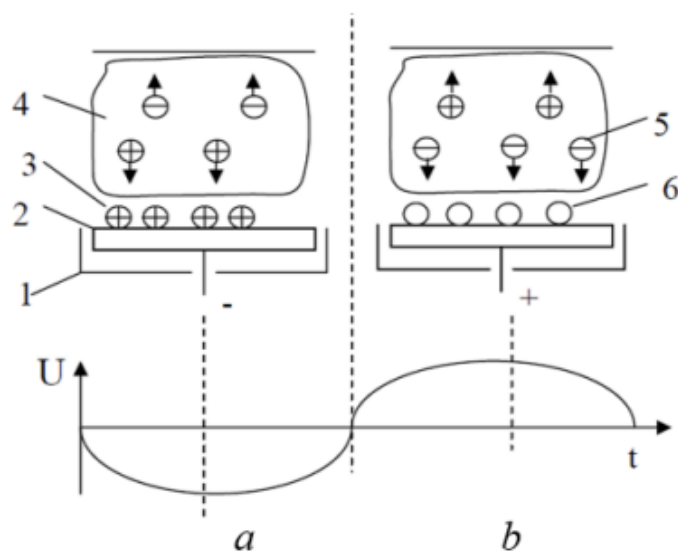
Среди преимуществ метода магнетронного распыления можно выделить: возможность нанесения покрытий на термочувствительные материалы при низких температурах, высокая скорость осаждения и плотная микро- (нано-) кристаллическая структура формируемых покрытий при полном отсутствии капельной фазы.

К недостатку данного метода относятся: высокая стоимость оборудования, а также техническая сложность реализации процесса [45].

При распылении диэлектрических материалов методом магнетронного распыления существует проблема связанная с накоплением положительного заряда на поверхности мишени, учитывая это, для распыления диэлектрических материалов на катод подается высокочастотный переменный потенциал.

В связи с этим, с целью нанесения непроводящих покрытий применяется метод высокочастотного (ВЧ). Преимуществами данного метода является то, что переменное напряжение позволяет нейтрализовать положительный заряд, накопленный в течение одного полупериода, бомбардировкой электронами во время второго полупериода, как это показано на рисунке 1.10.





1 – экран; 2 – анод; 3 – положительно заряженные ионы; 4 – объем плазмы;  
5 – электроны; 6 – молекула вещества мишени

Рисунок 1.10 – Схема ВЧ распыления при отрицательном (а) и положительном (б) полупериодах напряжения [48]

Во время процесса ВЧ-магнетронного распыления поверхность диэлектрической мишени имеет некоторое отрицательное смещение относительно плазмы ( $U_{см}$ ), в результате чего вблизи поверхности мишени образуется темное катодное пространство (ТКП), в котором имеется ионная оболочка (рисунок 1.11). Потенциал смещения выражается как:

$$U_{см} = 0,5 \cdot U_{ВЧ} \cdot \eta, \quad (1.3)$$

где  $U_{ВЧ}$  – максимальное значение ВЧ-напряжения;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, который определяется из решения уравнений движения электронов и ионов ВЧ-поля, предполагая, что на частицу действуют две силы: постоянная, обусловленная  $U_{см}$ , и переменная, представляющая собой малые отклонения с частотой ВЧ-поля [49].

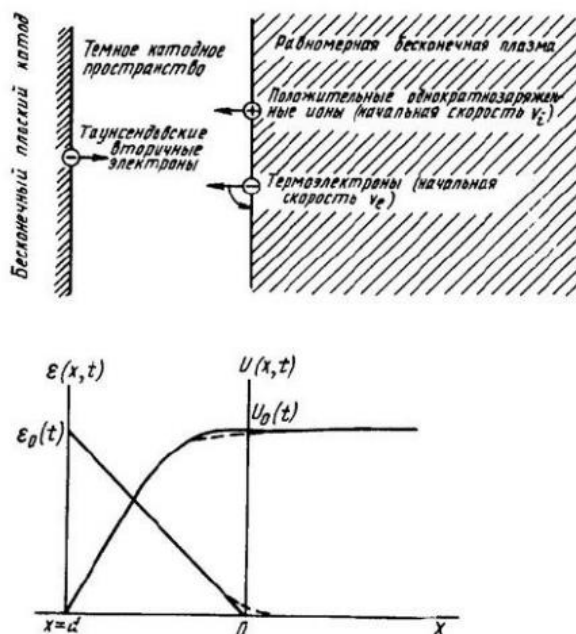


Рисунок 1.11 – Идеальная одномерная модель области ТКП при ВЧ-распылении [49]

Важным условием для эффективного распыления материала мишени, является то, чтобы период ВЧ-напряжения был достаточно мал, на практике частота ВЧ-разряда не менее 1 МГц. Данное условие позволяет уменьшить величину ионного тока, тем самым препятствуя образованию формирования положительного заряда на мишени. Параметры разряда, такие как рабочее давление, мощность разряда, конфигурация магнитного поля (сбалансированный или несбалансированный магнетрон) влияют на распределение потенциала, а следовательно, и на энергию частиц [49].

Преимуществом ВЧ магнетронного распыления как уже было отмечено является возможность нанесения диэлектрических материалов. В качестве недостатка данного метода стоит выделить низкую скорость осаждения покрытий, а также дороговизна оборудования.

## 1.6 Люминофорные покрытия на основе $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ полученного методом ВЧ магнетронного распыления

В ходе проведенного литературного обзора по теме тонкопленочные люминесцентные покрытия, наносимые методом магнетронного распыления, было изучено множество работ исследователей со всего мира. Условно, тонкопленочные люминофоры излучающие фотоны с длиной волны зеленого свечения наносимые методом магнетронного распыления можно разделить на 3 группы: люминофоры, имеющие в составе цинк, люминофоры с примесью европия, а также люминофоры на основе иттрий-алюминиевого граната легированные церием. Стоит сказать, что в данной работе также приведена информация и о других наносимых люминофорах, имеющих различный состав.

Проведя литературный обзор в данной области было принято решение наносить люминофор структуры иттрий-алюминиевый гранат легированный церием ( $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ ). Люминофор данного состава, судя по найденным работам способен удовлетворить заявленным техническим характеристикам. В отчете представлены не все работы связанные с осаждением тонкопленочного люминофора данного состава.

Люминофоры на основе цинка было решено не использовать в связи с нежелательным свойством цинка сублимировать даже при незначительном нагреве в вакууме. Для нанесения структуры имеющей в своем составе цинк, как правило, используется отдельная вакуумная установка. Люминофоры, содержащие в качестве активирующей примеси европий, было решено также не использовать, в связи с высокой стоимостью мишени из европия диаметром 90 мм. Более целесообразно в дальнейшем разработать магнетрон, имеющий меньший диаметр, с целью уменьшения затрат на покупку данной мишени.

В работе [37] Тонкие пленки люминофора  $YAG:Ce$  ( $Y_3Al_5O_{12}$ , легированного  $Ce$ ) были осаждены методом высокочастотного магнетронного распыления на кварцевую и сапфировую подложки. Было исследовано влияние параметров напыления, условий отжига и подложек на кристалличность и

люминесцентные свойства. Парциальное давление кислорода в напыляющем газе сильно влияет на кристалличность и атомное соотношение Al/Y, а также на люминесцентные свойства пленок YAG:Ce. Стехиометрические и поликристаллические пленки YAG:Ce могут быть получены при соотношении кислорода в газе соотношении 50% кислорода. После отжига аморфные пленки YAG:Ce не только трансформировались в кристаллические фазы, но и активировали желтый пик эмиссии при 550 нм при длине волны возбуждения 450 нм.

Пленки, нанесенные на сапфировые подложки с-плоскости, показали более высокую интенсивность фотолюминесценции, чем пленки на кварцевых подложках из-за более высокой кристалличности.

В данной работе [38] исследованы структурные и люминесцентные свойства тонких пленок YAG:Ce, выращенных при различных условиях осаждения. Тонкие пленки люминофора YAG:Ce были осаждены на кварц при комнатной температуре методом высокочастотного магнетронного распыления. Было показано, что парциальное давление кислорода в распыляющем газе и мощность ВЧ-магнетрона сильно влияют на атомное соотношение Al/Y, скорость роста, кристалличность и люминесцентные свойства пленок YAG:Ce. Влияние соотношения  $O_2/(Ar + O_2)$  на состав, осаждающийся при низкой температуре, отличается от состава, полученного при высокой температуре. Скорость роста пленок YAG:Ce, осажденных при соотношении газов  $O_2/(Ar + O_2) = 0\%$ , была значительно увеличена. В чистом Ar были получены стехиометрические и поликристаллические пленки YAG:Ce. Пленки YAG:Ce, отожженные в  $N_2$ , имели более высокую интенсивность люминесценции, чем отожженные на воздухе, поскольку отжиг в  $N_2$  предотвращает окисление  $Ce^{3+}$ . Исследователи также обнаружили, что прозрачность пленки YAG:Ce/кварц, отожженной при 1100 °C, сохраняется, и тонкая пленка YAG:Ce имеет пропускание 75%, включая подложку, в видимой области. Образец отожженный при 1200 °C, имел значительно меньший коэффициент

пропускания, но большую интенсивность, чем образец, отожженный при 1100 °С.

К примеру, в работе ученых томского политехнического университета при взаимодействии с китайскими исследователями [55] было исследовано влияние концентрации церия на люминесцентные свойства  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  при возбуждении ультрафиолетовым возбуждением. Хотя в работе люминофор и был получен методом высокотемпературной твердофазной реакции в атмосфере азота, однако, проанализировав данную статью можно сделать вывод о влиянии примеси церия в структуре иттрий-алюминиевого граната, а также почерпнуть информацию касательно процесса отжига структуры.

В работе [56] к примеру, говорится о том что, интенсивность люминесценции неактивированного  $Y_3Al_5O_{12}$  при комнатной температуре у монокристаллической пленки значительно меньше, чем у объемного кристалла, однако также в статье доказано, что для  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  люминесценция ионов  $Ce^{3+}$  при переходе от кристалла к пленке значительно увеличивается.

Работа [57] направлена на исследование влияния отжига  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ , в статье приведена информация о параметрах отжига (температура, среда отжига), говорится о процессах, что проходят при отжиге.

## Глава 2. Описание экспериментального оборудования

В данной главе представлено описание используемого экспериментального оборудования для осаждения тонкопленочного люминесцентного покрытия на основе иттрий-алюминиевого граната легированного церием, а также диагностического оборудования, необходимого для исследования формируемых покрытий.

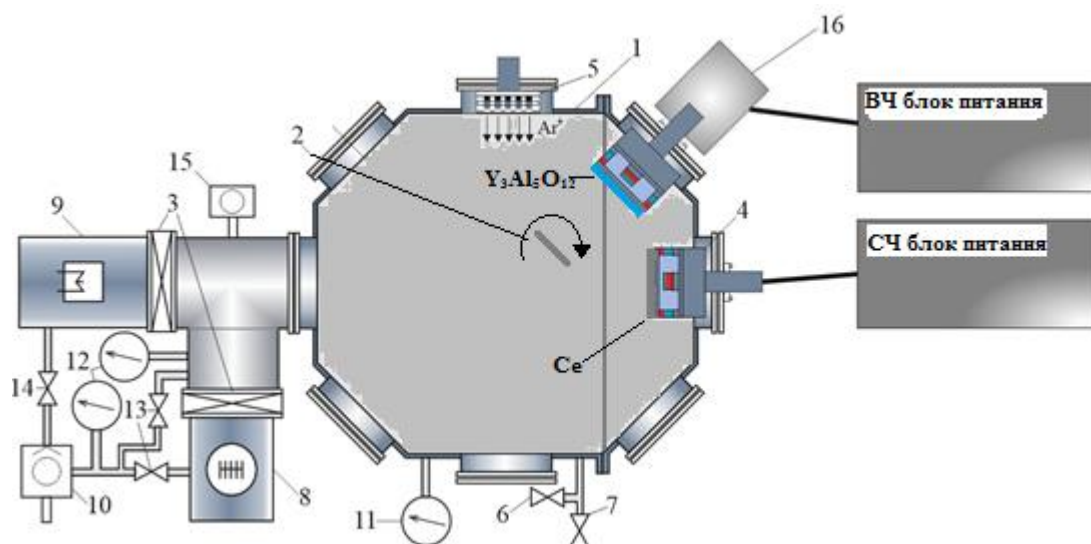
### 2.1 Экспериментальная ионно-плазменная установка

В ходе выполнения магистерской работы для получения тонкопленочных люминесцентных пленок использовалась вакуумно-плазменная установка. Данная установка (рисунок 2.1) разработана в научно-образовательном центре Б.П. Вейнберга и предназначена для модификации поверхности воздействием заряженных частиц в среде вакуума.



Рисунок 2.1 – Внешний вид экспериментальной ионно-плазменной установки

На рисунке 2.2 представлена общая схема экспериментальной вакуумной ионно-плазменной установки с подробным расположением устройств.



- 1 – корпус вакуумной камеры; 2 – карусель планетарного типа вращения;  
 3 – высоковакуумный затвор; 4 – магнетронный диод; 5 – ионный источник;  
 6 – электромагнитный клапан для подачи рабочего газа; 7 – клапан напуска;  
 8 – турбомолекулярный насос; 9 – насос криогенный; 10 – спиральный форвакуумный насос; 11, 12 – вакуумметр; 13, 14 – электромагнитный клапан;  
 15 – масс-спектрометр;  
 16 – блок автоматического согласования.

Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки

Вакуумная камера экспериментальной установки выполнена из нержавеющей стали аустенитного класса в форме восьмиугольника, рабочий объем которой составляет  $0,25 \text{ м}^3$ . Камера имеет каналы для водяного охлаждения по всему периметру. На боковых стенках расположены 7 фланцев ISO-K 160. Система вакуумной откачки соединена с вакуумной камерой через пневматический вакуумный затвор. На дне камеры установлен подложкодержатель вращающийся вокруг своей оси. В объем вакуумной камеры возможна подача газа через электромагнитный клапан (6). Вакуумная система установки собрана на базе турбомолекулярного (8) Shimadzu TMP 403 и криогенного (9) высоковакуумного насоса. Для форвакуумной откачки используется спиральный насос (10) Anest Iwata 250C. Откачка давления с объема вакуумной камеры возможна по трем линиям. Для достижения

предварительного вакуума в камере ( $\sim 80$  Па) откачка производится спиральным насосом. Для контроля давления в вакуумной камере расположен широкодиапазонный вакуумметр (11). После достижения в камере давления порядка 80 Па, с камеры ведется откачка высоковакуумным турбомолекулярным насосом. С целью уменьшить время цикла откачки используется криогенный высоковакуумный насос. Также использование криогенного насоса способствует удалению остатков водяной фракции с объема вакуумной камеры. Время получение вакуума порядка  $5 \cdot 10^{-3}$  Па  $\sim 40$  мин.

Для подачи рабочих газов в камеру используется электромагнитный клапан и система регуляторов расхода газа РРГ-10.

Используемая вакуумно-плазменная установка также оснащена трубчатым электронагревателем (ТЭН). Наличие ТЭН в используемой установке дает возможность провести предварительный прогрев подложек перед нанесением тонкопленочного покрытия с целью улучшения адгезии люминесцентного покрытия, а также для дополнительной дегазации подложки.

## **2.2 Ионный источник с замкнутым дрейфом электронов**

Используемая установка оснащена многоячейковым ионным источником (5) с замкнутым дрейфом электронов, который позволяет проводить предварительную очистку поверхности путем бомбардировки положительно заряженными ионами аргона. Конструкция используемого многоапертурного ионного источника APEL-IS-7CELL представлена на рисунке 2.3.

Апертура одной ячейки с замкнутым дрейфом электронов формирует узконаправленный поток моноэнергетичных ионов технологического газа, который подаётся напрямую в корпус ячейки. При использовании множества ячеек образуется широкий направленный пучок ионов с заданной энергией.



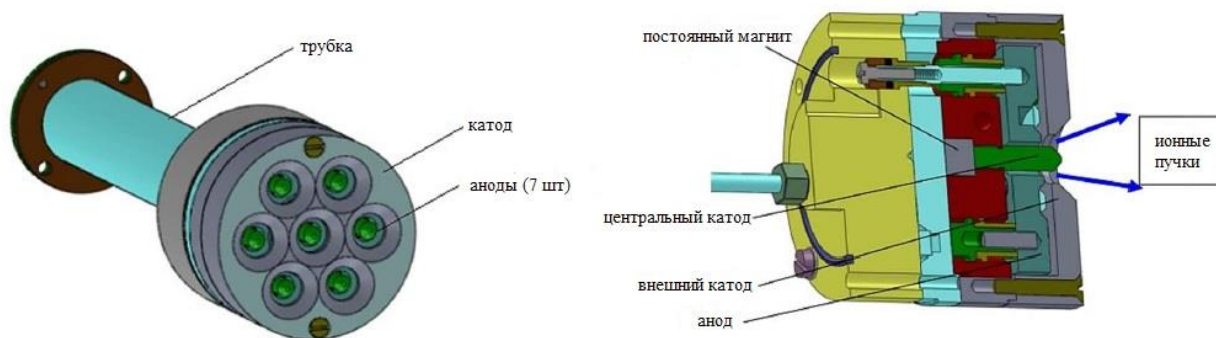


Рисунок 2.3 – Многоапертурный ионный источник APPEL-IS-7CELL с замкнутым дрейфом электронов

Используемый в данной работе источник питания ионного источника обладает следующими характеристиками:

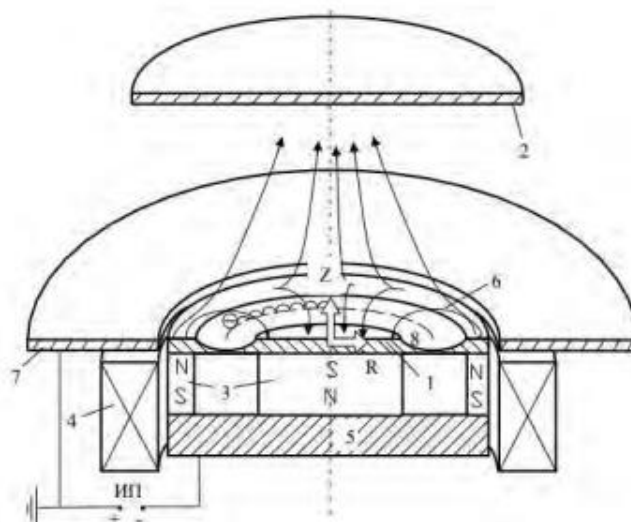
- предельное ускоряющее напряжение – до 3 кВ;
- предельный ток – до 1 А;
- предельная мощность – до 3 кВт.

Помимо очистки поверхности перед осаждением пленки, с помощью ионного источника также возможно провести травление поверхности подложки, что приведет к увеличению шероховатости. Как было сказано в работе [37] увеличение шероховатости между подложкой и наносимым люминофором приводит к улучшению интенсивности ФЛ.

### 2.3 Импульсная магнетронная распылительная система

Конструкция установки позволяет устанавливать магнетроны с водяным охлаждением в различных композиционных исполнениях, что позволяет изменять геометрическую компоновку эксперимента.

В работе планируется использовать две дисковые магнетронные распылительные системы (МРС) с различными мишенями диаметром 90 мм и толщиной 8 мм. Конструкция используемых МРС представлены на рисунке 2.4.



1 – катод (материал мишени); 2 – подложка; 3 – постоянные магниты; 4 – электромагнит; 5 – магнитопровод; 6 – линии магнитного поля; 7 – анод; 8 – зона распыления мишени;

Рисунок 2.4 – Конструкция магнетронной распылительной системы

В ходе процесса планируется использовать высокочастотный источник питания для распыления мишени состава  $Y_3Al_5O_{12}$ . Так как известно, что если материал мишени выполнен из диэлектрика, то при распылении поверхность мишени очень быстро начнет накапливать положительный заряд, в последствии препятствующий процессу распыления генерируя электрическое поле. Как уже было отмечено выше, для того чтобы обеспечить распыление диэлектрической мишени, нужно нейтрализовать положительный заряд на ее поверхности подачей высокочастотного (ВЧ) переменного потенциала. В положительный полупериод мишень подвергается бомбардировке электронами, которые нейтрализуют накопленный положительный заряд на поверхности.

Однако стоит также учесть то, что на высоких частотах собственные индуктивности и емкости кабелей питания устройств сильно влияют на процесс передачи мощности. Другими словами, на высоких частотах, когда волновые процессы в силовых цепях становятся значительными, может происходить отражение высокочастотной мощности от нагрузки. В этом случае помимо того, что часть мощности не доходит до нагрузки, возникает ряд других

негативных явлений. В частности, интерференция падающей и отраженной волн образует в кабеле стоячую волну, что может привести к повышению номинальных значений токов и напряжений на некоторых участках питающего кабеля. Коэффициент отражения равен:

$$\Gamma = \frac{(R_0 - Z)}{(R_0 + Z)}, \quad (2.1)$$

где  $R_0$  – волновое сопротивление высокочастотного кабеля, обычно равное 50 Ом (реже 75 Ом);  $Z$  –импеданс нагрузки.

Передача мощности без потерь от источника в нагрузку достигается только при согласовании:  $Z=R_0$ . Так как мнимая часть импеданса нагрузки обычно больше действительного импеданса, а последнее существенно отличается от стандартных 50 или 75 Ом, между нагрузкой и кабелем необходимо подключать специальное устройство согласования. Поскольку требуемый импеданс является чисто активным, реактивное сопротивление нагрузки должно быть полностью компенсировано. Согласующее устройство представляет собой колебательный контур, настроенный на резонанс. Так как импеданс источника плазмы может изменяться в широких пределах, то основными элементами любой схемы согласования являются переменные реактивные элементы – емкости и индуктивности.

В данной работе во избежание проблем связанными с отражением мощности на высоких частотах, на магнетрон мощность планируется подавать не напрямую от источника питания, а через согласующее устройство Comdel CPMX-2500 MatchPro RF.

В устройстве реализована наиболее распространенная Г-образная (в англоязычной литературе – L-образная) схема согласования, состоящая из двух переменных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Совместно с нагрузкой она представляет собой параллельный контур, состоящий из емкостной ветви (образованной конденсатором  $C_2$ ) и индуктивной (образованной конденсатором  $C_1$  и индуктором  $L+R$ ).

Источником питания для магнетронного ВЧ распыления керамической мишени  $Y_3Al_5O_{12}$  является ВЧ генератор Comdel CX-1250S.

ВЧ генератор питания магнетрона обладает следующими характеристиками:

- максимальная мощность 1250 Вт;
- стабильность частоты  $13,56 \text{ МГц} \pm 0,005\%$ ;
- регулятор мощности: вход 0-10 В постоянного тока для номинальной мощности от 0 до полной;
- линейность регулирования мощности:  $<2\%$  от установки при уровнях мощности выше 10% номинальной мощности.

Для распыления металлической мишени из церия планируется использовать аналогичный дисковый магнетрон (рисунок 2.4) представленный выше. Отличие заключается в методе подачи мощности на магнетрон. Мощность с источника питания на нагрузку (МРС) будет подаваться не через устройство согласования, а непосредственно напрямую, как показано на схеме 2.2. Для питания МРС с металлической мишенью из церия использовался источник питания серии APDL-M-5PDC-1000A (ООО «Прикладная Электроника», г. Томск) (рисунок 4.7).

Данная серия источников питания предназначена для электропитания регулируемым напряжением постоянного тока и импульсного тока магнетронных распылительных систем мощностью до 5 кВт, используемых в процессах вакуумного нанесения тонкопленочных покрытий. Источник питания APDL-M-5PDC обладает следующими техническими характеристиками:

- входное напряжение: 380 В; 50/60 Гц;
- максимальная выходная мощность 5 кВт;
- диапазон регулирования напряжения: 50-1000В (шаг изменения напряжения 1 В);
- диапазон регулирования выходного среднего тока: 0,10-10,00 А (шаг изменения выходного тока 0,01 А);

- режим стабилизации: напряжение, ток, мощность;
- точность стабилизации: не хуже 3%.

## 2.4 Быстродействующий спектральный эллипсометр «Эллипс-1891»

В ходе работы для определения толщины получаемых покрытий использовался спектральный эллипсометрический комплекс Эллипс-1891 (рисунок 2.5), предназначенный для измерения толщины и оптических характеристик покрытий: диэлектрической проницаемости и показателя преломления.



Рисунок 2.5 – Спектральный эллипсометрический комплекс Эллипс-1891

Принцип работы эллипсометра можно представить на примере схемы демонстрируемой на рисунке 2.6. На поверхность исследуемого образца попадает плоская поляризованная волна, которая после отражения в общем случае становится эллиптически поляризованной. Параметры эллипса поляризации, т.е. ориентация его осей и эксцентриситет, определяются оптическими свойствами отражающей структуры и углом падения.

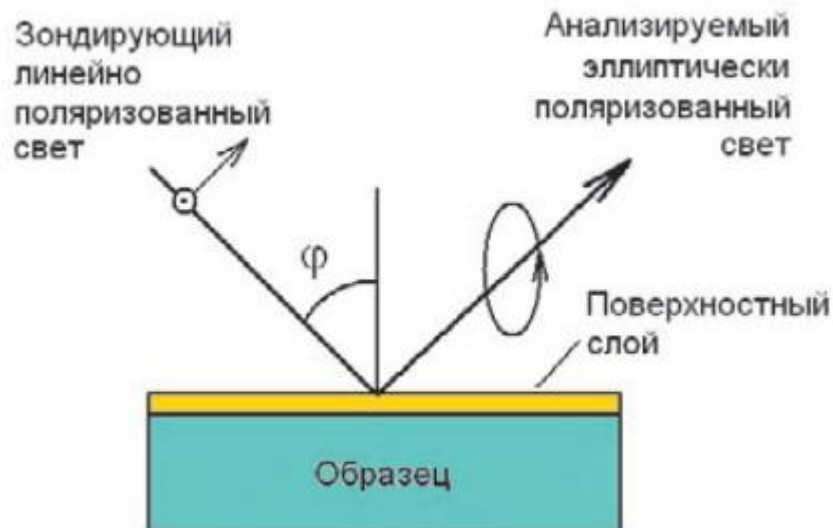


Рисунок 2.6 – Схема, поясняющая принцип эллипсометрических измерений

Спектральный эллипсометр, как правило, предназначен для прецизионных измерений оптических параметров, спектральных зависимостей оптических констант поверхностей различных материалов металлов, полупроводников, диэлектриков и т.д., а также толщин тонкопленочных структур. В основе комплекса измерений находится быстродействующая статистическая схема эллипсометрических измерений. Алгоритмы считывания сигналов и расчета рабочих параметров обеспечивают очень высокую чувствительность, необходимую для измерений с высоким спектральным разрешением.

## 2.5 Рентгеновский дифрактометр

Кристаллическая структура полученных покрытий исследовалась методом рентгеновской дифракции (англ. X-Ray Diffraction (XRD)). Рентгеновская дифракция является аналитическим методом, который предоставляет информацию о структуре, а также фазовом составе кристаллических материалов. В основе метода лежит явление дифракции

рентгеновских лучей на трехмерной кристаллической решетке, принцип рентгеновского дифрактометра схематически представлен на рисунке 2.8.

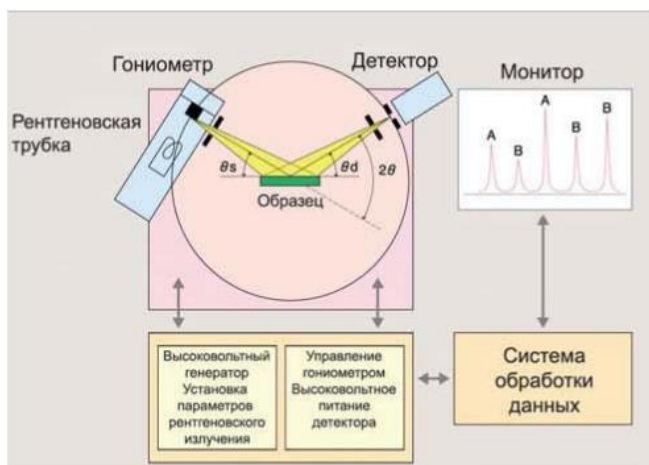


Рисунок 2.8 – Принцип действия рентгеновского дифрактометра

Принцип действия рентгеновского дифрактометра основан на том, что рентгеновские лучи, сфокусированное на образце, установленном на оси спектрометра (гонометра), дифрагируют на образце, как показано на рисунке 2.8. Дифракция рентгеновских лучей в кристалле подчиняется четкому закону: лучи определенной длины волны отражаются от граней кристалла только при определенных углах падения на него (рисунок 2.9). В этом случае лучи взаимно усиливают или ослабляют друг друга, т.е. интерферируют друг с другом. Интерференция возможна, если разность хода лучей, отраженных от двух соседних плоскостей, составляет целое число длин волн  $n$ .

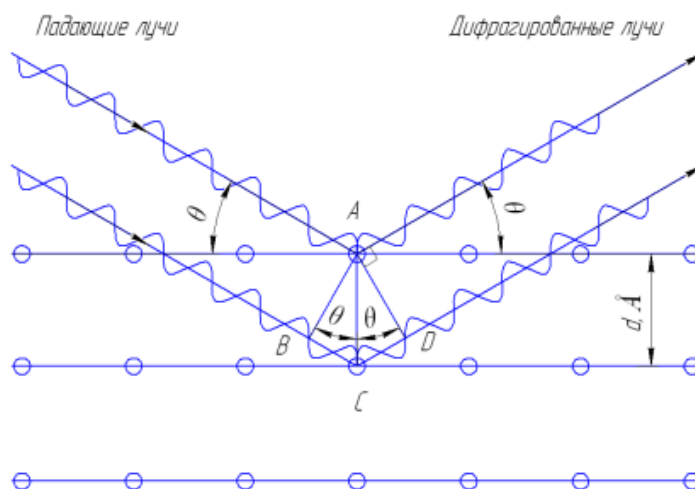


Рисунок 2.9 – Схема метода рентгеновской дифракции [50]

Из рисунка 2.9 видно, что разность BCD равна:

$$BC = CD = d \cdot \sin(\theta), \quad (2.2)$$

$$BCD = 2d \cdot \sin(\theta), \quad (2.3)$$

Учитывая равенства (2.2) и (2.3), получаем уравнение называемое законом Вульфа-Брегга [51]:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin(\theta), \quad (2.4)$$

где  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения;

$d$  – межплоскостное расстояние, нм;

$\theta$  – угол дифракции рентгеновских лучей, °;

$n$  – порядок отражения.

В данной магистерской работе для структурного анализа полученных тонкопленочных люминесцентных покрытий использовался рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000S. Данный дифрактометр исследовательского класса с вертикальным  $\theta$ - $\theta$  гониметром (проба всегда неподвижна) используется для проведения рентгенофазного анализа степени кристалличности, анализа напряжений, остаточного аустенита и решения многих других задач. Параметры рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-7000S: напряжение рентгеновской трубки 30 кВ, ток 40 мА в Cu K $\alpha$ -излучении). Шаг по углу  $\theta$  составлял 0,03° в диапазоне измерений  $2 \cdot \theta$  от 10 до 90°. Идентификация структуры проводилась с помощью базы данных PDF-4 ICDD.

## 2.5 Стенд измерения фотолюминесценции

Стенд предназначен для определения фотолюминесценции люминофорного покрытия, нанесенного на прозрачную подложку. Данный стенд состоит из блока осветителя, блока держателя образцов, светочувствительного блока и амперметра. Внешний вид стенда продемонстрирован на рисунке 2.7.



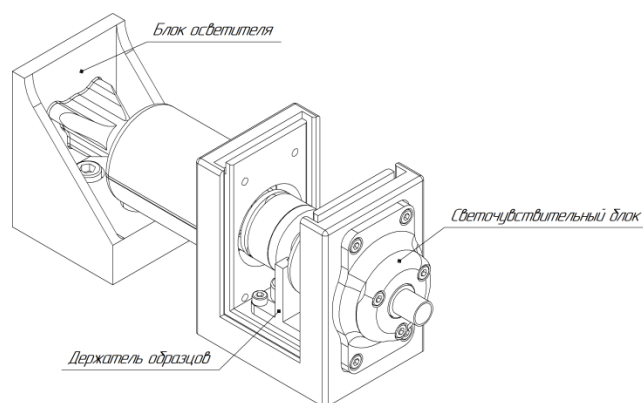


Рисунок 2.9 – Внешний вид стенда измерения фотолюминесценции

Стенд смонтирован на алюминиевую направляющую, а блоки осветителя и держателя образцов закреплены на подвижных блоках для регулировки расстояния между осветителем и образцом. Светочувствительный блок закреплен на раме держателя образцов и может быть снят для установки камеры.

Блок осветителя в экспериментальном стенде представляет из себя источник ультрафиолетового излучения (УФ). В качестве источника УФ в стенде применяется светодиод UVTOP-270 с длиной волны  $275\pm 5$  нм и с мощностью излучения 1,5 мВт. Блок осветителя может быть собран в двух исполнениях: со светофильтром и без светофильтра. Светофильтр изготовлен из стекла УФС-2 для создания светового потока с длиной волны 270-380 нм.

Для регистрации фотолюминесценции применяется фотодиод ФДУК100-УВ входящий в состав светочувствительного блока.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Выполнение раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» несет в себе цель выполнить комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов проекта. Необходимо оценить полные денежные затраты на проект, а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов его внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- Оценка коммерческого потенциала разработки;
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет стоимости научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

### **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Целью данной магистерской диссертации является исследование фотолюминесцентных покрытий тонкопленочного люминофора состава  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ , полученного методом магнетронного распыления. Вакуумно-плазменная установка по нанесению покрытий на основе иттрий-алюминиевого граната расположена в лаборатории 101 НОЦ Б. П. Вейнберга. Настоящая работа предполагает исследование физических свойств тонкопленочного люминофора, а именно фотолюминесценцию, с целью дальнейшего использования покрытия в приборах ночного видения. Оценка перспективности, планирование и формирование бюджета научного исследования позволяют анализировать его экономическую эффективность.

#### 4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Данная работа посвящена технологии изготовления покрытий на основе иттрий-алюминиевого граната легированного церием при использовании магнетронной распылительной системы. Новизна разработки состоит в использовании магнетронной распылительной системы для нанесения люминофора, что приводит к увеличению равномерности покрытий, а также увеличению частотно-контрастной характеристики пленок.

Люминофор структуры  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  при облучении преобразует падающую энергию широкий спектр излучения с центром 545 нм, что соответствует зеленому цвету. В ходе работы было исследовано влияние количества церия в структуре, парциальное влияние кислорода в ходе процесса конденсации люминофора в вакуумной камере, а также параметры отжига структуры на физические свойства люминофора, в частности на фотолюминесценцию. В работе было выявлено взаимосвязь между способами получения люминофора и его свойствами. Проведя литературный обзор по данной тематике, было выявлено, что получить пленки люминофора  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  можно также методом электронно-лучевого испарения, а также методом магнетронного ВЧ распыления. Данные методы позволяют получить покрытие стехиометрического состава с используемой мишенью. В данной же работе формирование люминесцентного покрытия проводится путем распыления двух мишеней ( $Y_3Al_5O_{12}$ , Ce). Осаждение с двух отдельных мишеней дает возможность регулировать потоки конденсируемых атомов на подложку, тем самым можно управлять составом покрытия.

Разработанная технология может быть востребована на любом производстве, связанном с технологиями тонких плёнок.

#### 4.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений позволяет производить сравнения между конкурирующими разработками и определить тенденции для ее дальнейшего роста.

Данное исследование целесообразно производить с использованием оценочной карты, показанной в таблице 4.1. Для этого были определены 2 конкурента на рынке технологии нанесения люминесцентных покрытий на основе иттрий-алюминиевого граната легированного церием методом высокочастотного магнетронного распыления стехиометрического состава мишени ( $K_1$ ) и электронно-лучевого испарения мишени состава  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  ( $K_2$ ).

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{k1}$	$B_{k2}$	$K_{\phi}$	$K_{k1}$	$K_{k2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1. Производительность	0,12	5	4	3	0,6	0,5	1,25
2. Надёжность	0,1	5	5	3	0,5	0,5	0,3
3. Простота методики получения покрытий	0,08	5	4	5	0,4	0,32	0,4
4. Стоимость оборудования	0,06	4	4	4	0,24	0,3	0,24
5. Возможность автоматизации	0,1	4	4	5	0,4	0,4	0,5
6. Качество покрытий	0,12	5	4	3	0,6	0,48	0,36
7. Сложность получения	0,08	5	4	4	0,4	0,5	0,32

покрытий							
8. Безопасность	0,05	4	4	4	0,2	0,25	0,2
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	3	4	5	0,12	0,16	0,2
3. Стоимость технологии	0,07	3	4	5	0,21	0,28	0,35
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	5	5	3	0,4	0,4	0,24
5. Послепродажное обслуживание	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>57</b>	<b>54</b>	<b>52</b>	<b>4,42</b>	<b>4,38</b>	<b>3,87</b>

Расчет конкурентоспособности, на примере стабильности срабатывания, определяется по формуле (1.1):

$$K = \sum B_i \cdot B_i = 0,1 \cdot 3 = 0,3, \quad (1.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность проекта;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – балл показателя.

Согласно вышеприведенному расчету видно, что предлагаемая нами технология осаждения покрытий имеет более высокий показатель конкурентоспособности (4,42), в то время как у конкурентов 4,38 и 3,87, соответственно. Результаты показывают, что данная научно-исследовательская разработка является конкурентоспособной и имеет полное преимущество по таким показателям, как производительность, качество покрытия, которые являются для нанесенного материала наиболее важными.

## 4.2 SWOT-анализ

**SWOT** – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ проводится для комплексной оценки внешней и внутренней среды проекта. При SWOT-анализе рассматриваются сильные и слабые стороны, возможности и угрозы применительно к способу решения поставленной задачи. Результаты исследования приведены в SWOT-анализ (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b>	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b>
	<p><b>С1.</b> Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии.</p> <p><b>С2.</b> Экологичность технологии.</p> <p><b>С3.</b> Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями.</p>	<p><b>Сл1.</b> Отсутствие прототипа научной разработки</p> <p><b>Сл2.</b> Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с научной разработкой</p> <p><b>Сл3.</b> Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p><b>В1.</b> Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p>	<p>1. Получение технологии исследований</p> <p>2. Продвижение НТИ на рынок</p>	<p>1 Поиск дополнительного финансирования в виде грантов и др.</p> <p>2. Повышение квалификации кадров у потенциальных</p>

<b>В2.</b> Повышение стоимости конкурентных разработок		потребителей 3. Приобретения необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ
<b>Угрозы:</b> <b>У1.</b> Отсутствие спроса на технологию <b>У2.</b> Введения дополнительных государственных требований к сертификации технологии.	1. Продвижение технологии с целью создания спроса 2. Сертификация и стандартизация технологии	1. Приобретение необходимого оборудования либо использование инновационной инфраструктуры ТПУ 2. Продвижение технологии с целью создания спроса

По итогам SWOT-анализа выявлены возможности для дальнейшего развития и автоматизации технологии для создания тонкопленочного люминофора на основе иттрий-алюминиевого граната легированного церием.

Для противодействия угрозе У1 следует приобрести и ввести в эксплуатацию современное оборудование, чтобы увеличить производительность и качество получаемых покрытий, но, так как стоимость таких установок значительно высока, необходимо активное участие принимать в конкурсах на гранты для разработок научных исследований. Также необходимо участвовать в различных конференциях и вебинарах с целью продвижения технологии.

Для противодействия угрозе У2 необходимо своевременно сертифицировать и стандартизировать технологии в соответствии с

актуальными ГОСТами РФ. В случае, если этим пренебречь, разработанная технология может не выйти в промышленное использование.

## 4.3 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.3.1 Структура работ в рамках научного исследования

Прежде чем начать работу над проектом, необходимо провести планирование этапов работы, обозначив при этом занятость каждого из участников, а также привести сроки выполнения каждого этапа.

Комплекс предполагаемых работ включает в себя следующие задачи:

- определить структуру работ в рамках исследования;
- определить участников каждой работы;
- установить продолжительность работ;

Работа выполнялась студентом (инженер) под руководством научного руководителя (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Список производимых задач и работ и их исполнители

Основные этапы	№	Содержание работ	Должность
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель – 100 %
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований и способа решения задач	Руководитель – 100 %
	3	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер – 100 %
Теоретические и экспериментальные исследования	4	Составление плана экспериментов	Руководитель – 20 % Инженер – 80 %



	5	Подготовка образцов для экспериментов	Инженер – 100 %
	6	Проведение экспериментальных работ	Руководитель – 50% Инженер – 50 %
	7	Выполнение расчётов	Инженер – 100 %
Обобщение и оценка результатов	8	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер – 100 %
	9	Обсуждение и оценка эффективности результатов	Руководитель – 50 % Инженер – 50 %
Оформление отчета по НИР	10	Составление пояснительной записки	Инженер – 100 %
	11	Подготовка к защите	Инженер – 100 %

#### 4.3.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Основная часть стоимости разработки проекта составляется из трудовых затрат, поэтому важно определить трудоемкость работ всех участников разработки проекта.

Несмотря на то, что трудоемкость зависит от трудно учитываемых параметров, т.е. носит вероятностный характер, ее можно определить экспертным путем, в «человеко-днях». Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости  $t_{ожі}$  определяется по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5} \quad (4.2)$$

где  $t_{ожі}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$  – минимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является оптимистичной оценкой: при удачном стечении обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$  – максимально возможное время выполнения поставленной задачи исполнителем (является пессимистичной оценкой: при неудачном стечении обстоятельств, чел.-дн).

На основании расчетов ожидаемой трудоемкости работ, необходимо определить продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ :

$$T_{p_i} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i} \quad (4.3)$$

где  $Ч_i$  – количество исполнителей, одновременно выполняющих поставленную задачу, чел.

По всем работам результаты расчета продолжительности в рабочих днях представлены в таблице 4.4.

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8 \text{ чел. - дн.}$$

$$T_{рд} = \frac{t_{ож}}{Ч_i} = \frac{2,8}{1} = 2,8 \text{ раб. дн.}$$

### 4.3.3 Разработка графика проведения научного исследования

Диаграмма Ганта является наиболее удобным и наглядным способом представления графика проведения работ и представляет собой отрезки, размещенные на горизонтальной шкале времени. Каждый отрезок соответствует отдельной задаче или подзадаче. Начало, конец и длина отрезка на шкале времени соответствуют началу, концу и длительности задачи.

Для построения графика Ганта длительность каждой из выполняемых работ из рабочих дней переводились в календарные дни по формуле:

$$T_{ки} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}} \quad (4.4)$$

где  $T_{ki}$  – календарный коэффициент. Для каждого исполнителя расчеты производились индивидуально.

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Календарный коэффициент определялся по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \quad (4.5)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – общее количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – общее количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – общее количество праздничных дней в году.

Расчет календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$k_{\text{кал}} = \frac{366}{366 - 104 - 14} = 1,48$$

Расчет календарной продолжительности выполнения работы, на примере задачи «Выбор направления исследований»:

$$1) \quad t_{\text{ож}i} = \frac{3 \cdot 2 + 2 \cdot 4}{5} = 2,8; \quad T_{pi} = \frac{2,8}{1} = 2,8; \quad T_{ki} = 2,8 \cdot 1,49 = 4,2 \approx 4$$

кал. дн.

Все полученные значения в календарных днях округлялись до целого числа. Результаты представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4. Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость						Длит-сть в рабочих днях, $T_{pi}$		Длит-сть в календарных днях, $T_{ki}$	
	$t_{\text{min}}$ , чел.- дн.		$t_{\text{max}}$ , чел.- дн.		$t_{\text{ож}}$ , чел.- дн.					
	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер	Руковод.	Инженер
Постановка целей					2,8	–	2,8		4	



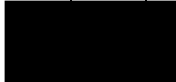










и задач исследования										
Составление и утверждение технического задания	2	–	4	–	2,8	–	2,8	–	4	–
Выбор направления исследований и способа решения задач	2	–	4	–	2,8	–	2,8	–	4	–
Подбор и изучение материалов по теме	–	21	–	28	–	23,8	–	23,8	–	35
Составление плана экспериментов	4	4	7	7	5,2	5,2	2,6	2,6	4	4
Подготовка образцов для экспериментов	–	3	–	5	–	3,8	–	3,8	–	7
Проведение экспериментальн ых работ	14	24	20	34	16,4	28	8,2	14	12	21
Выполнение расчетов	–	7	–	10	–	8,2	–	8,2	–	12
Анализ и обработка полученных	–	5	–	8	–	6,2	–	6,2	–	9


результатов										
Обсуждение и оценка эффективности результатов	5	6	7	9	5,8	7,2	2,9	3,6	4	5
Составление пояснительной записки	–	3	–	6	–	4,2	–	4,2	–	6
Подготовка к защите	–	4	–	6	–	4,8	–	4,8	–	7
Итого					35,8	85,3	21,1	71,2	32	106



Проанализировав таблицу 4.4 видно, что на выполнение поставленных работ, инженер прodelывает более трудоемкую работу (85,3 чел.-дн.), по сравнению с руководителем (35,8 чел. дн.). Длительность работы для руководителя составила 21,1 рабочего дня, и 32 календарных дня, из которых большее время было уделено постановки целей и задач, составления технического задания и проведение экспериментальных работ вместе с инженером. Длительность работы инженера составила 71,2 рабочего дня, или 106 календарного дня. В ходе выполнения поставленных руководителем работ большое количество времени было потрачено на подбор и изучение материалов по теме (23,8 раб. дня, 35 кал. дня соответственно), а также на проведение экспериментальных работ ( 14 раб. дня, 21 кал. дня).

Таблица 4.5 – календарный план-график проведения НИОКР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнитель	$T_{ki}$ , кал. Дн.	Продолжительность выполнения работ									
				февр		март		апр		май			
				1	2	1	2	1	2	1	2		
1	Постановка задач и целей	Руководитель	4										

	исследования											
2	Составление ТЗ	Руководитель	4									
3	Выбор направления исследований	Руководитель	4									
4	Составление литературного обзора по теме	Инженер	35									
5	Построение модели проведения эксперимента	Руководитель, инженер,	4									
6	Подготовка образцов к эксперименту	Инженер	7									
7	Проведение эксперимента (нанесение покрытий)	Руководитель, Инженер	21									
8	Выполнение расчетов	Инженер	12									
9	Анализ и обработка полученных результатов	Инженер	9									
10	Обсуждение и оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, Инженер	5									
11	Составление	Инженер	6									

	пояснительной записки										
12	Подготовка к защите ВКР	Инженер	7								

 - научный руководитель;  - инженер

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей.

#### 4.4 Бюджет научно-технического исследования (НТИ)

Планирование бюджета позволяет оценить затраты на проведение исследования до его фактического начала и позволяет судить об экономической эффективности работы. В данном разделе подсчитываются следующие статьи расходов:

- материальные затраты;
- амортизационные отчисления;
- заработная плата исполнителей;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

##### 4.4.1 Расчет материальных затрат НТИ

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Также в стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены).

Теоретические исследования, а также моделирование системы требуют ряд программных продуктов: Microsoft Office, OriginLab др. Большинство из них предоставляются бесплатно для студентов ТПУ, другие находятся в свободном доступе в сети «Интернет».

Расчёт материальных затрат приведён в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	Кол-во	Цена за единицу, руб	Цена за единицу, руб
Баллон Кислорода	O <sub>2</sub> , 99,99%	1	13000	13000
Баллон Аргон	Ar, 99,99%	1	9000	9000
Всего за материалы				22000
Транспортно-заготовительные расходы (3–5%)				1760
<b>Итого по статье</b>				<b>23760</b>

#### 4.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

При выполнении исследования дополнительное оборудование для проведения исследований не было приобретено. Все использованное оборудование являлось собственностью отделения экспериментальной физики НИИ ТПУ. Необходимо рассчитать амортизационные отчисления для использованного оборудования.

Таблица 4.7 – Затраты на оборудование

№	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Срок полезного использования, лет	Цены единицы оборудования, тыс.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб.
---	---------------------------	-------------	-----------------------------------	---------------------------------	---



				руб.	
<b>1</b>	ВЧ – генератор COMDEL CB 5000	1	7	1000	1000
<b>2</b>	Генератор плазмы РПГ128	1	10	2000	2000
<b>Итого:</b>	3000 тыс. руб.				

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации:

$$N_A = \frac{1}{n} \cdot 100\%, \quad (4.6)$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация:

$$A = \frac{N_A \cdot И}{12} \cdot m, \quad (4.7)$$

где  $И$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Таким образом, если срок полезного использования для ВЧ генератора COMDEL CB 5000 принять равным 7 лет, то амортизация  $N_A$  будет составлять:

$$N_A = \frac{1}{7} \cdot 100\% = 14,3\%$$

$$A = \frac{0,143 \cdot 1000000}{12} \cdot 0,5 = 5958 \text{ руб}$$

Сканирующий электронный микроскоп, при сроке полезного использования 10 лет:

$$N_A = \frac{1}{10} \cdot 100\% = 10\%$$

$$A = \frac{0,1 \cdot 2000000}{12} \cdot 0,5 = 8333 \text{ руб}$$

Суммарные затраты амортизированных отчислений:

$$A = 5958 + 8333 = 14291$$

#### 4.5 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} \quad (4.8)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12–15 % от  $Z_{осн}$ ).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (4.9)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Основная заработная плата ( $Z_{осн}$ ) руководителя, инженера от рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.10)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. Дн;  $Z_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} \quad (4.11)$$

где  $Z_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

М – количество месяцев работы без отпуска в течение года;  
 при отпуске в 24 раб. дней М = 11,2 месяца, 5-дневная неделя;  
 при отпуске в 48 раб.дней М=10,4 месяца, 6-дневная неделя;

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени (для 5-дневной рабочей неделе)

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	104	104
- выходные дни	14	14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	24	24
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	223	223

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{tc} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (4.12)$$

где  $Z_{tc}$  – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от  $Z_{tc}$ );

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 – 0,5;

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томской области).

Расчёт основной заработной платы приведён в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Оклад	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ , руб	$Z_{дн}$ , руб.	$T_p$ , раб. Дн.	$Z_{осн}$ , руб.	$Z_{доп}$ , руб.

Руководитель	52 700	0,3	0,3	1,3	68 510	3440, 8	21	72 256	9 393,3
Инженер	23 800	0,3	0,3	1,3	30 940	1553, 9	71	110 329	33 098
<b>Итого</b>								<b>182 585</b>	<b>42 491,3</b>

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10–15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы.

#### 4.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды (таблица 4.11) определяется по формуле:

$$Z_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (4.13)$$

где  $K_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2022 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

Таблица 4.11– Отчисления во внебюджетные фонды

<b>Исполнитель</b>	<b>Основная заработная плата, руб.</b>	<b>Дополнительная заработная плата, руб.</b>	<b>Отчисления во внебюджетные фонды</b>
Руководитель проекта	72 256	9 393	24 494
Инженер	110 329	33 098	43 028
<b>Итого</b>			<b>67 522</b>

#### 4.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (Z_{\text{мат}} + Z_{\text{амор}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (4.14)$$

где  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Тогда величина накладных расходов будет выражена как:

$$Z_{\text{накл}} = (23\,760 + 14\,291 + 182\,585 + 42\,491 + 67\,522) \cdot 0,16 = 52\,903,8 \text{ руб.}$$

#### 4.8 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Рассчитанный бюджет затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
Материальные затраты НИИ	23 760	6,19
Амортизация оборудования	14 295	3,73
Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	182 585	47,6

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	42 491	11,08
Отчисления во внебюджетные фонды	67 522	17,6
Накладные расходы	52 903	13,79
<b>Бюджет затрат НИИ</b>	<b>383 556</b>	<b>100</b>

В ходе подсчёта затрат на разработку проекта выявлено, что основная часть (47,6%) средств расходуется на заработную плату исполнителей.

#### **4.9 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования**

**Интегральный показатель финансовой эффективности** научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве вариантов исполнения были выбраны ближайшие аналоги ВЧ магнетронного распыления мишени стехиометрического состава ( $\Phi_{p1}=383\ 556$ ), электронно-лучевое испарение мишени ( $\Phi_{p2}=560\ 535$ ) и метод вакуумного осаждения ( $\Phi_{p3}=340\ 000$ ).

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (4.15)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{финр}^{исп.1} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{383\ 556}{560\ 535} = 0,68;$$

$$I_{финр}^{исп.2} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{560\ 535}{560\ 535} = 1;$$

$$I_{финр}^{исп.3} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{340\ 000}{560\ 535} = 0,6.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

### **Интегральный показатель ресурсоэффективности**

Оценка ресурсоэффективности проекта определялась посредством расчета интегрального критерия по формуле:

$$I_{испi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (4.15)$$

где  $I_{испi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент проекта;

$b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 4.13.

Таблица 4.13 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Магнетронное ВЧ распыление составной мишени	Электронно-лучевое испарение	Метод вакуумного осаждения
Чистота покрытий	0,25	5	3	4

Скорость осаднения покрытий	0,15	5	4	3
Адгезионная прочность	0,15	3	4	3
Коррозионная стойкость покрытий	0,2	4	3	5
Безопасность использования	0,13	4	2	4
Надежность	0,12	4	4	4
Итого:	1	4,25	3,29	3,9

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{\text{исп1}} = 0,25 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,13 \cdot 4 + 0,12 \cdot 4 = 4,25$$

$$I_{\text{исп2}} = 0,25 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,13 \cdot 2 + 0,12 \cdot 4 = 3,29$$

$$I_{\text{исп1}} = 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 + 0,13 \cdot 4 + 0,12 \cdot 4 = 3,9$$

### **Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки**

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп1}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{фин.р}}} = \frac{4,25}{0,58} = 7,32$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных (таблица 4.14). Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ ):

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп1}}}{I_{\text{исп2}}} = \frac{7,32}{4,27} = 1,77 \quad (4.16)$$



Таблица 4.14 - Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,58	0,77	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	3,29	3,9
3	Интегральный показатель эффективности	7,32	4,27	3,9
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	1,71	1,87

В результате выполнения изначально сформулированных целей раздела, можно сделать следующие выводы:

1. Результатом проведенного анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации травления плёнок углерода, как наиболее предпочтительного и рационального, по сравнению с остальными;

2. Составлен бюджет проектирования, позволяющий оценить затраты на реализацию проекта, которые составляют 558537 руб;

3. По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

3.1 Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 1, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;

3.2 Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,25, по сравнению с 3,29 и 3,9;

3.3 Значение сравнительной эффективности ИР составляет 1, по сравнению с 0,92 и 0,89, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

#### **4.10 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсосбережение и ресурсоэффективность»**

В данном разделе была проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности научного исследования:

1. Выявлены потенциальные потребители результатов исследования. Разработанная технология может быть востребована на любом производстве, связанном с технологиями тонких плёнок. (см. подраздел 1.1.1).

2. Проведён анализ конкурентных технических решений. Были определены один конкурент на рынке технологии нанесения тонкопленочных люминесцентных покрытий на основе иттрий-алюминиевого граната: метод электроннолучевого испарения  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  мишени и технология высокочастотного магнетронного распыления  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  мишени (см. подраздел 1.1.2). Разрабатываемая нами технология имеет преимущество, относительно конкурентов, за счет компактной и безопасной технологии, простотой в эксплуатации и надежности, а также возможностью влияния на структуру осаждаемых покрытий.

3. В ходе SWOT-анализа основными угрозами обозначены: отсутствие спроса на технологию и введение дополнительных гос. требований к сертификации технологии. Возможные пути снижения влияния выявленных угроз представлены в подразделе 1.2.

4. Подсчёт затрат (см. подраздел 1.4) на разработку позволяет заключить, что основной статьёй расходов в научно-исследовательской работе является заработная плата исполнителей: основная – 182 585 руб. (47,6%), дополнительная – 42 491 руб. (11,08%). На втором месте страховые взносы – 67

522 руб. (17,6%). Затем идут накладные расходы – 52 903 руб. (13,79%). Меньше всего средств уходит на амортизацию оборудования – 14 295 руб. (3,73%) и на материальные затраты – 23 760 руб. (6,19%). Общий бюджет разработки составил 383556 руб. При этом запланированная продолжительность работы составляет 71,2 дня (см. подраздел 1.3).

5. В подразделе 1.5 оценена экономическая эффективность разработки. Были выбраны ближайшие аналоги комбинированного магнетронного распыления, высокочастотного распыления керамической мишени, а также среднечастотного распыления металлической мишени церия, электронно-лучевое испарение цельной мишени состава  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  и высокочастотное распыление мишени состава  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$ . Разрабатываемая система превосходит выше перечисленные аналоги по ресурсоэффективности в виду лучшего получения качества покрытий. А также разработка превосходит аналоги по интегральному показателю эффективности в следствии меньшей стоимости реализации проекта.

## **5. Социальная ответственность**

### **5.1 Введение**

В текущем разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места в соответствии с нормами производственной санитарии, техники производственной безопасности и охраны окружающей среды.

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть объединение разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

В основе законодательства Российской Федерации об охране труда лежит конституция Российской Федерации и трудовой кодекс Российской Федерации. Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда в организации возлагаются на работодателя. Согласно Федеральному закону от 17 июля 1999 г. №181–ФЗ "Об основах охраны труда в Российской Федерации" (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.).

В настоящей магистерской диссертации ведется исследование условий осаждения тонкопленочного люминесцентного покрытия пленок на основе иттрий-алюминиевого граната легированного церием комбинированным методом реактивного магнетронного напыления, высокочастотным и среднечастотным распылением мишеней  $Y_3Al_5O_{12}$  и Се соответственно.

Процесс нанесения покрытий осуществлялся на вакуумно-плазменной установке. Исследование предполагает работу с высоким напряжением и различными газами. В связи с этим, в данном разделе ВКР рассматриваются вопросы анализа и выявления возможных опасных и вредных факторов на рабочем месте научного сотрудника.

Под проектированием рабочего места понимается целесообразное пространственное размещение в горизонтальной и вертикальной плоскостях функционально взаимосвязанных средств производства (оборудования, оснастки, предметов труда и др.), необходимых для осуществления трудового процесса.

При проектировании рабочих мест должны быть учтены освещенность, температура, влажность, давление, шум, наличие вредных веществ, электромагнитных полей и другие санитарно-гигиенические требования к организации рабочих мест.

При проектировании лаборатории необходимо уделить внимание и охране окружающей среды, в частности организации безотходного производства.

Также необходимо учитывать возможность чрезвычайных ситуаций. Так как лаборатория находится в Томске, то наиболее вероятной ЧС является мороз. Так же, в связи с неспокойной ситуацией в мире, одной из возможных ЧС может быть диверсия.

Научно-технической базой для проведения исследований стала лаборатория научно-образовательного центра Б.П. Вейнберга.

## **5.2 Анализ имеющихся вредных и опасных факторов**

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникнуть при работе с ПЭВМ. Перечень вредных и опасных факторов, воздействующих на оператора ЭВМ приведен в таблице 5.1.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего человека в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности. Опасным называется производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному резкому ухудшению здоровья. Критерии

отношения фактора к вредным или опасным устанавливаются ГОСТ 12.0.003–2015 ССБТ [59].

Таблица 5.1 – Вредные и опасные факторы

Источник фактора Наименование видов работ	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
<p>1. Запуск питания в помещении</p> <p>2. Анализ полученных результатов при помощи ПЭВМ</p> <p>3. Чтение литературы с описанием процесса</p>	<p>1. Отклонение показателей микроклимата</p> <p>2. Превышение уровня шума в рабочей зоне</p> <p>3. Недостаточная освещенность рабочей зоны</p> <p>4. Повышенный уровень электромагнитного излучения</p> <p>5. Повышенное инфракрасное, ультрафиолетовое излучение</p>	<p>1. Электрический ток</p> <p>2. Пожароопасность</p>	<p>ГОСТ 12.0.003–2015 ССБТ;</p> <p>ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ;</p> <p>ГОСТ 27818–88 (СТ СЭВ 5147–85);</p> <p>СП 52.13330.2016;</p> <p>СанПиН 1.2.3685–21;</p> <p>ПУЭ (изд. 7);</p> <p>ГОСТ 12.1.038–82* ССБТ;</p> <p>ГОСТ 12.1.019–2017 ССБТ;</p> <p>НПБ 105-03;</p> <p>СП 12.13130.2009;</p> <p>СанПин 2.2.2.540-96</p>

### 5.3 Категории тяжести труда

Разделение работ по категориям тяжести труда, в соответствии с ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ [60], приводится в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Категории работ по тяжести

Категории работ	Энергозатраты	
	Вт	Ккал/ч
Легкие (Iа)	До 139	До 120
Легкие (Iб)	140-174	121-150
Средней тяжести (IIа)	175-232	151-200
Средней тяжести (IIб)	233-290	201-250
Тяжелые (III)	Более 290	Более 250

В ходе выполнения магистерской работы основная работа выполняется с использованием специальной вакуумной установки, а также анализ полученной информации при помощи персонального компьютера. Работы проводимые в ходе выполнения работ не подразумевали значительного физического напряжения или передвижения на большие расстояния, поэтому их можно отнести к категории легких (Iа). К категории Iа относятся работы, производимые сидя и сопровождающиеся незначительным физическим напряжением (ряд профессий на предприятиях точного приборо- и машиностроения, на часовом, швейном производствах, в сфере управления и т.п.).

## 5.4 Вредные факторы

### 5.4.1 Отклонение показателей микроклимата

Микроклимат производственных помещений – это климат внутренней среды этих помещений, который определяется действующими на организм сочетаниями температуры, влажности и скорости движения воздуха. Оптимальные микроклиматические условия обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены, не вызывают отклонений в состоянии здоровья и создают предпосылки для высокой работоспособности благодаря отсутствию посторонних раздражителей организма человека.

Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху в рабочей зоне должны соответствовать ГОСТ 12.1.005–88 ССБТ [60] в соответствии с легкой (Ia) категорией работ. Оптимальные и допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха для проведения производственных работ приведены в таблице.

Микроклимат рабочего помещения на рассматриваемом предприятии поддерживается на оптимальном уровне системой водяного центрального отопления, принудительной вентиляцией, а также дополнительным прогревом в холодное время года.

В таблице 5.3 представлены оптимальные и допустимые значения температуры, влажности и скорости движения воздуха согласно ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

Таблица 5.3 – Допустимые нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в рабочей зоне производственных помещений

Период	Категория	Параметр микроклимата	Допусти
--------	-----------	-----------------------	---------



года	работ, Вт		мая величина
Холодный	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещ щении Относительная влажность Скорость движения воздуха	15-28°С 20 – 80% Не более 0,2 м/с
Теплый	Іб (140-174)	Температура воздуха в помещении Относительная влажность Скорость движения воздуха	21-28°С 20 – 80% 0,1-0,5 м/с

При работе установки включены охлаждающие системы и одновременно с этим процессом происходит, нагрев вакуумной камеры, что приводит к изменению микроклимата в помещении.

Выполняемые работы относятся к Іб категории работ. К данной категории относятся работы с интенсивностью энергозатрат 121–150 ккал/ч (140–174 Вт), производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением.

Температура наружных поверхностей технологического оборудования, ограждающих устройств, с которыми соприкасается в процессе труда человек, не превышает 45 °С. Для создания оптимальных метеорологических условий применяется кондиционер, который поддерживает оптимальные параметры микроклимата автоматически, независимо от меняющихся условий. В холодное время года для поддержания в помещении оптимальной температуры воздуха применяется отопление.

### **5.4.3 Превышение уровня производственного шума на рабочем месте**

Шум является общебиологическим раздражителем и в определенных условиях может влиять на органы и системы организма человека. Шум ухудшает точность выполнения рабочих операций, затрудняет прием и восприятие информации. Длительное воздействие шума большой интенсивности приводит к патологическому состоянию организма, к его утомлению. Интенсивный шум вызывает изменения сердечно-сосудистой системы, сопровождаемые нарушением тонуса и ритма сердечных сокращений, изменяется артериальное кровяное давление.

Методы установления предельно допустимых шумовых характеристик ЭВМ и прочих устройств для исследований, разработок, конструирования, программирования и врачебной деятельности устанавливаются в соответствии с ГОСТ 27818-88 (СТ СЭВ 5147-85) [61]. Шум на рабочих местах также может проникать извне через каналы вентиляции и проем двери из кабинета в коридор. Для оценки шума используются значения эквивалентного уровня звука, выраженного в децибелах (дБ).

Получение люминесцентных покрытий осуществляется на плазменно-вакуумной установке, одними из основных частей которой являются форвакуумный и турбомолекулярный насосы, являющиеся источниками шума. По СанПин 3359-16 [61] для офисных помещений уровень звукового давления не должен превышать 82 дБ.

При работе с ПЭВМ основной источник шумов – вентилятор системы охлаждения внутреннего электронного оборудования, а также периферийное оборудование (клавиши клавиатуры). Для рабочих мест с использованием устройств для исследований, разработок, конструирования, программирования и врачебной деятельности уровень шума не должен превышать 50 дБ (ГОСТ 27818-88 [61]). При работе с используемым ПЭВМ уровень шума от работы исправного вентилятора охлаждения не превышает 15 дБ.

Шум от работы ПК можно понизить, используя малошумные вентиляторы охлаждения, либо водяное охлаждение системного блока.

Уменьшение влияния данного фактора возможно путём:

- 1) Изоляции источников шумов;
- 2) Проведения акустической обработки помещения: применения звукопоглощающей облицовки, акустических экранов;
- 3) Создания дополнительных перегородок из ДВП, ДСП или других звукоизоляционных материалов;
- 4) Проведения профилактических работ.
- 5) Применения средств индивидуальной защиты органов слуха-противошумных наушников, ушных вкладышей (берушей).

В ходе работы с целью снижения уровня шума до оптимально допустимого использовались шумопоглощающие наушники.

#### **5.4.4 Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Освещенность - важнейший параметр на рабочем месте оператора, обеспечивающий комфортные условия, повышенную эффективность и безопасность труда, снижающий утомление и травматизм, сохраняющий работоспособность.

В соответствии со СП 52.13330.2016 [62] освещение должно обеспечить: санитарные нормы освещенности на рабочих местах, равномерную яркость в поле зрения, отсутствие резких теней и блескости, постоянство освещённости по времени и правильность направления светового потока. Освещенность на рабочих местах и в производственных помещениях должна контролироваться не реже одного раза в год. Фактическая освещённость в помещении должна быть больше или равна нормируемой освещенности. Требования, приведенные в таблице 5.4, соответствуют условиям труда оператора ЭВМ.

К гигиеническим требованиям, отражающим качество производственного освещения, относятся:

- равномерное распределение яркостей в поле зрения и ограничение теней;

- ограничение прямой и отраженной блёскости;

- ограничение или устранение колебаний светового потока.

Для обеспечения рационального освещения, отвечающего техническим и санитарно-гигиеническим нормам, в помещении предусмотрены остекленные окна в стенах для достаточного проникновения солнечного света в светлое время суток, а также система светильников дневного света, обеспечивающих достаточную освещенность в темное время суток.

#### **5.4.5 Расчет искусственного освещения**

Согласно СП 52.13330.2016 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 200 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на

должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Световой поток лампы определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta}, \quad (5.1)$$

где  $E_H$  – нормируемая минимальная освещённость по СП 52.13330.2016, лк;  $S$  – площадь освещаемого помещения, м<sup>2</sup>;  $K_3$  – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли (табл. 4.9);  $Z$  – коэффициент неравномерности освещения, отношение  $E_{ср}/E_{min}$ . Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1;  $N$  – число ламп в помещении;  $\eta$  – коэффициент использования светового потока.

Лаборатория, в которой производилось нанесение тонкопленочного люминесцентного покрытия покрытий имеет следующие размеры  $A = 7$  м, ширина  $B = 6$  м, высота  $H = 3,5$  м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_{рп} = 1,0$  м. Требуется создать освещённость  $E \geq 200$  лк. Данное значение соответствует СП 52.13330.2016 [62]. Площадь помещения равна:

$$S = A \cdot B = 42 \text{ м}^2 \quad (5.2)$$

Коэффициент отражения стен (свежепобеленные с окнами, без штор)  $R_c = 50 \%$ , потолка (свежепобеленный)  $R_n = 70 \%$ .

Коэффициент запаса (помещение с малым выделением пыли)  $k = 1,5$ , коэффициент неравномерности (для люминесцентных ламп)  $Z = 1,1$ .

Рассчитываем систему общего люминесцентного освещения.

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен  $\Phi_{ЛД} = 2600$  лм. К ней выберем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-30. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина - 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda = L/h$ , характеризующая наивыгоднейшее относительное

расстояние между светильниками. Уменьшение  $\lambda$  удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Для люминесцентных светильников с защитной решёткой  $\lambda$  лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda = 1,1$ .

Расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p, \quad (5.3)$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса;

$h_{rp}$  – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР:  $h_n = 3,5$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле (5.4):

$$h_n = H - h_c - h_p = 3,5 - 1 - 0,5 = 2 \text{ м} \quad (5.4)$$

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле (5.5):

$$L = \lambda \cdot h = 1,1 \cdot 2 = 2,2 \text{ м}, \quad (5.5)$$

Число рядов светильников в помещении (5.6):

$$N_B = \frac{B}{L} = \frac{6}{2,2} = 2,72 \approx 3 \text{ шт}, \quad (5.6)$$

Число светильников в ряду (5.7):

$$N_A = \frac{A}{L} = \frac{7}{2,2} = 3,18 \approx 3 \quad (5.7)$$

Общее число светильников (5.8):

$$N = N_A \cdot N_B = 3 \cdot 3 = 9 \text{ шт}. \quad (5.8)$$

Принимаем общее количество ламп 18, при этом получаем 9 светильников, т.е. 3 ряда по 3 светильника.

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле (5.9):

$$l = \frac{L}{3} = \frac{2,2}{3} = 0,7 \text{ м.} \quad (5.9)$$

Таким образом, размещаем по 3 светильника в 3 ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами. Однако необходимо провести дополнительные расчеты для ширины комнаты, для точного определения расположения светильника, где  $L_1$  – расстояние между светильниками по ширине,  $L_2$  – расстояние между светильниками по длине:

Из условий равномерности освещения определяем расстояния  $L_1$  и  $L_1/3$  и  $L_2$  и  $L_2/3$  по следующим уравнениям:

$$7000 = 2 \cdot L_1 + 2/3 \cdot L_1 + 3 \cdot 265; \quad L_1 = 2327 \text{ мм}; \quad L_1/3 = 775 \text{ мм};$$

$$6000 = 2 \cdot L_2 + 2/3 \cdot L_2 + 3 \cdot 1227; \quad L_2 = 870 \text{ мм}; \quad L_2/3 = 290 \text{ мм};$$

Размещаем светильники в три ряда по трисветильника в каждом. На рисунке 1 изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

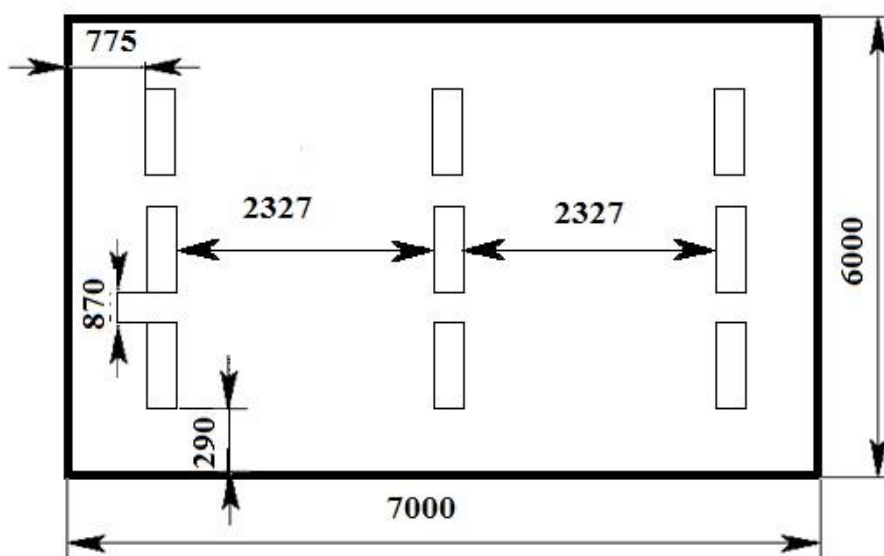


Рисунок 5.1 – Расположение светильников в помещении

Индекс помещения определяется по формуле (5.11):

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A+B)} = \frac{7 \cdot 6}{2 \cdot (7+6)} = 1,6 \quad (5.11)$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{\text{п}} = 70\%$ ,  $\rho_{\text{с}} = 50\%$  и индексе помещения  $i=1,6$  равен  $\eta=0,47$ .

Потребный световой поток группы люминесцентных ламп светильников определяется по формуле:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{E \cdot A \cdot B \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{300 \cdot 5,7 \cdot 4,3 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{18 \cdot 0,47} = 2457,44 \text{ лм}, \quad (5.12)$$

Световой поток выбранной лампы ЛД-40 составляет  $\Phi_{\text{лд}} = 2600$  лм.

Проверим выполнение условия выбора лампы:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \leq 20\% \quad (5.13)$$

$$\frac{\Phi_{\text{лд}} - \Phi_{\text{п}}}{\Phi_{\text{лд}}} \cdot 100\% = \frac{2600 - 2457,44}{2600} \cdot 100\% = 5,5\%$$

Таким образом, получаем  $-10\% \leq 5,5\% \leq 20\%$ .

Определяем электрическую мощность осветительной установки:

$$P = 18 \cdot 40 = 720 \text{ Вт}.$$

Таким образом, необходимый световой поток не выходит за пределы требуемого диапазона. Выбранный тип ламп и светильника позволяют создать нужную освещенность в помещении.

#### 5.4.4 Электромагнитные поля в производственных помещениях

Основным вредным фактором является электромагнитное поле (ЭПМ). Находясь в электромагнитном поле, человек поглощает его энергию, в тканях возникают высокочастотные токи с образованием теплового эффекта.

Биологическое действие электромагнитного излучения зависит от длины волны, напряженности поля, длительности и режима воздействия. При воздействии на человека электромагнитного поля возникают нарушения электрофизиологических процессов в центральной нервной и сердечно-



сосудистой системах, функций щитовидной железы, генеративной функции организма.

Основным источником электромагнитного излучения во время проведения исследовательских работ был персональный ЭВМ.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 [64], временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых источниками электромагнитного излучения (в т.ч. ПЭВМ):

- ПДУ напряженности магнитного поля промышленной частоты 50 Гц составляет 10 мкТл.

- ПДУ электромагнитного поля (ЭП) частотой 50 Гц на рабочем месте составляет 5 кВ/м.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [5], ПДУ синусоидального магнитного поля частотой 50 Гц:

Таблица 5.4 – Предельно допустимые уровни синусоидального магнитного поля частотой 50 Гц

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП, $H$ [А/м]/ $B$ [мкТл] при воздействии	
	Общем	Локальном
$\leq 1$	1600/2000	6400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

ПДУ напряженности и плотности потока энергии ЭМП диапазона частот  $\geq 30$  кГц – 300 ГГц составляют:

Таблица 5.6 – ПДУ напряженности и плотности потока энергии ЭМП диапазона частот  $\geq 30$  кГц – 300 ГГц

Параметр	Максимально допустимые уровни в диапазонах частот (МГц)
----------	---

	$\geq 0,03$ – 3,0	$\geq 3,0$ – 30,0	$\geq 30,0$ – 50,0	$\geq 50,0$ – 300,0	$\geq 300,0$ – $3 \cdot 10^5$
$E, \text{В/м}$	500	300	80	80	-
$H, \text{А/м}$	50	-	3,0	-	-
ППЭ, $\text{мкВт/см}^2$	-	-	-	-	1000

Защита человека от опасного воздействия электромагнитного излучения осуществляется посредством средств коллективной защиты:

- защита временем,
- защита расстоянием,
- снижение интенсивности излучения непосредственно в самом источнике излучения,
- экранирование источника заземленным металлическим ограждением.

Основным коллективным средством защиты от воздействия ЭМП является экранирование источника электромагнитного излучения или же объекта защиты. При возможности эффективной защитой является удаление источника излучения из рабочей зоны.

К индивидуальным средствам защиты от статического электричества и электрических полей промышленной частоты относят комбинезоны, специальная одежда, выполненная из металлизированной ткани, очки, спецобувь, заземляющие браслеты, заземляющие устройства, устройства для увлажнения воздуха, антиэлектростатические покрытия и пропитки, нейтрализаторы статического электричества.

В процессе выполнения научного исследования не были превышены нормы СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [5]. В процессе выполнения научного исследования не были превышены нормы СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к

персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года) [5].

#### **5.4.5. Повышенное инфракрасное, ультрафиолетовое излучение**

Вредное воздействие могут оказывать не только видимые световые лучи, но и невидимые лучи. Они вызывают воспаление слизистой оболочки глаза, если действуют в течении (10-30) с на расстоянии до 1 м от источника излучения, а более 30 с – до 5 м. Результат действия – резкая боль в глазах, слезоточивость, электроофтальмия. На незащищенных частях тела ультрафиолетовое и инфракрасное излучение вызывает покраснение и ожоги различной степени, в зависимости от расстояния до источника излучения.

Защита рабочих от инфракрасного и ультрафиолетового излучения может быть обеспечена сокращением времени пребывания в зоне воздействия теплового излучения.

Защита от ИК излучения выполнена в виде отражающих экранов расположенных в непосредственной близости от его источника.

Средствами защиты от повышенного уровня УФ и ИК излучения являются: ограждающие устройства, герметизирующие устройства, устройства дистанционного управления, знаки безопасности.

В качестве средств индивидуальной защиты от ИК излучения применяется теплозащитная одежда из хлопчатобумажных, льняных тканей, грубо- дисперсионного каучука. Также используются отражающие ткани, на поверхность которых нанесен тонкий слой металла.

Основными средствами индивидуальной защиты от УФ-излучения являются: защитная одежда с длинным рукавом, очки со стеклами содержащими оксид свинца.

## 5.5 Опасные факторы

### 5.5.1 Электрический ток

Все оборудование должно быть выполнено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019-2017ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [65].

В отношении опасности поражения людей электрическим током различают:

- помещения без повышенной опасности, в которых отсутствуют условия, создающие повышенную или особую опасность,

- помещения с повышенной опасностью, которые характеризуются наличием в них одного из следующих условий, создающих повышенную опасность: сырость, токопроводящая пыль, токопроводящие полы (металлические, земляные, железобетонные, кирпичные и т.п.), высокая температура, возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей металлоконструкциям, технологическим аппаратам, с одной стороны, и к металлическим корпусам электрооборудования с другой,

- особо опасные помещения, которые характеризуются наличием оборудования с выше 100 В и до 1000 В при наличии двух и более из следующих условий, создающих особую опасность: особой сырости, химически активной или органической среды, одновременно двух или более условий повышенной опасности. Территории размещения наружных электроустановок в отношении опасности поражения людей электрическим током приравниваются к особо опасным помещениям.

Рассматриваемое производственное помещение относится ко первой категории (безопасно), ввиду незначительной влажности (40–45%), температура воздуха колеблется в диапазоне 18-20 °С, отсутствия токопроводящей пыли, наличие токонепроводящего пола.

Ионно-плазменная установка работает под напряжением 380 вольт трехфазного переменного тока (относится к группе установок до 1000 В) и имеет заземленную магистраль. В соответствии с ТКП 181-2009 для установок напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью, с учетом того, что заземляющее устройство является искусственным заземлителем, расположенным в непосредственной близости от нейтрали трансформатора, при трехфазном токе напряжением 380 В, нормируемое сопротивление заземления составляет 30 Ом. Групповой заземлитель предполагается изготовить со стержневыми (вертикальными) электродами в форме стальных уголков. Минимальные размеры стальных заземлителей из угловой стали, при их расположении в земле, составляют 4 мм. Наименьшее сечение медных заземляющих проводников для данной установки, при прокладке жил заземляющих кабелей в общей защитной оболочке со средними жилами, составляет 1 мм. Безопасные номиналы тока составляют 0,1 А, напряжения – (12...36) В, заземления – 4 Ом

ПЭВМ работает под напряжением 220 В (относится к группе электроустановок до 1000 В), относится к группе установок с малыми токами замыкания на землю. Согласно ПУЭ [66], сопротивление заземляющего устройства в любое время года должно быть не более 4 Ом, при этом сечение заземляющей жилы должно быть не менее 4 мм<sup>2</sup> для медных проводников, не менее 6 мм<sup>2</sup> – для алюминиевых и не менее 20 мм<sup>2</sup> – для стальных. Безопасные значения тока составляют 0,1 А, напряжения – (12...36) В, сопротивления заземления – 4 Ом, в соответствии с ГОСТ 12.1.038-82\* ССБТ [66].

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении.

Каждому необходимо знать меры медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое, необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);

- очистить дыхательные пути; - приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);

- в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца.

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

- возникновения угрозы жизни или здоровью человека;

- появления запаха, характерного для горячей изоляции или пластмассы;

- появления дыма или огня;

- появления искрения;

- обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или других устройств.

Для защиты от поражения электрическим током используют СИЗ и СКЗ.

Средства коллективной защиты:

1. Заземление источников электрического тока;

2. Использование щитов, барьеров, клеток, ширм, а также заземляющих и шунтирующих штанг, специальных знаков и плакатов.

Средства индивидуальной защиты:

1. Использование диэлектрических перчаток, изолирующих клещей и штанг, слесарных инструментов с изолированными рукоятками, указатели величины напряжения, калоши, боты, подставки и коврики.

В зависимости от расположения заземлителей по отношению к заземляемому оборудованию заземления бывают выносные (сосредоточенные) и контурные.

Заземлители выносных заземлений располагают сосредоточенно на расстоянии свыше 20 м от заземляемого оборудования, т. е. вне зоны растекания тока замыкания на землю. Заземлители контурного заземления располагают по периметру и внутри площадки, на которой установлено заземляемое оборудование. Все эти заземлители электрически соединены друг с другом. Заземлители могут быть естественными и искусственными. Искусственные заземлители выполняются в виде электродов. По расположению в грунте и по формам электродов заземлители делятся на:

- углубленные, состоящие из полос или круглой стали, укладываемых глубоко на дно котлована горизонтально по периметру фундаментов;

- вертикальные, состоящие из электродов, верхний конец которых заглубляется на (0,5 - 0,7) м от поверхности земли; в качестве их используют стальные вертикальные заложённые стержни диаметром (10 - 16) мм, (или отрезки стальных труб, различного диаметра), длиной (3-5) м, а также уголкообразная сталь длиной (2,5 - 3) м;

- горизонтальные (протяжённые), состоящие из электродов, применяемых для связи между собой вертикальных заземлителей, соединяемых сваркой. В качестве таких заземлений используется круглая сталь диаметром не менее 10 мм или стальные полосы толщиной не менее 4 мм, сечением 48 мм<sup>2</sup>.

В качестве заземляющих проводников-ответвлений к оборудованию, где по условиям работы не требуются гибкие проводники, применяются медные или алюминиевые проводники. В качестве заземляющих проводников, образующих заземляющую магистраль, применяется полосовая или круглая сталь, сечением порядка 48 мм<sup>2</sup>. Заземляющий проводник присоединяется к заземлению сваркой внахлестку не менее чем в двух местах. Длина нахлестки должна быть равна двойной ширине проводника при прямоугольном сечении или круглом шести диаметрам. Болты (винты, шпильки) для крепления заземляющего проводника должны изготавливаться из стойкого в отношении коррозии металла. Диаметр болта (винта, шпильки), зависит от номинального тока потребителя: при токе потребителя до 16 А, диаметр болта 4 мм

потребителя (250-300) А диаметр болта 10 мм. Нельзя применять для выполнения заземления крепежные детали машин, оборудования.

Основными причинами поражения электрическим током могут послужить следующие факторы: прикосновение к токоведущим частям или прикосновение к конструктивным частям, оказавшимся под напряжением. С целью исключения опасности поражения электрическим током необходимо соблюдать следующие правила электрической безопасности:

- перед включением установки должна быть визуально проверена ее электропроводка на отсутствие возможных видимых нарушений изоляции, а также на отсутствие замыкания токопроводящих частей держателей электродов;

- при появлении признаков замыкания необходимо немедленно отключить от электрической сети установку.

К защитным мерам от опасности прикосновения к токоведущим частям электроустановок относятся: изоляция, ограждение, блокировка, понижение напряжения, индивидуальные электрозщитные средства.

Изолирующие средства индивидуальной защиты разделяются на:

1. Основные. Они могут выдержать долговременное воздействие напряжения, поэтому их целесообразно применять при производстве электромонтажных работ без обесточивания устройств от сети. Средства индивидуальной защиты, относящиеся к основным, включают в себя: указатели напряжения; изолирующие штанги; изолированный инструмент; электроизмерительные клещи; диэлектрические перчатки; переносные заземления; изолирующие устройства;

2. Дополнительные. Такая защита не способна полностью обеспечить защиту человека от воздействия электрического тока, в связи с чем такие средства используются совместно с основными. К таким средствам защиты относятся: диэлектрические сапоги или галоши; изолирующие накладки и подставки; коврики диэлектрические; диэлектрические колпаки; сигнализаторы напряжения.



К работам на ионно-плазменной установке допускаются лица, достигшие 18 лет, прошедшие инструктаж и обученные безопасным методам труда. Также электробезопасность зависит и от профессиональной подготовки работников, сознательной производственной и трудовой дисциплины. Целесообразно каждому работнику знать меры первой медицинской помощи при поражении электрическим током. Все оборудование должно быть изготовлено в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.019–79 [67].

### **5.5.2 Пожарная безопасность**

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д.

Согласно НПБ 105-03 лаборатория относится к категории В– горючие и трудно горючие жидкости, твердые горючие и трудно горючие вещества и материалы, вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом только гореть, при условии, что помещения, в которых находится, не относятся к категории наиболее опасных А или Б.

По степени огнестойкости данное помещение относится к 1-й степени огнестойкости по СНиП 2.01.02-85 (выполнено из кирпича, которое относится к трудносгораемым материалам).

Пожарная безопасность обеспечивается системой предотвращения пожара и системой пожарной защиты. В производственном помещении обязательно должен быть план эвакуации людей при пожаре, регламентирующий действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающий места расположения пожарной техники. План эвакуации при пожаре представлен на рисунке 5.2.

В целях пожарной безопасности помещение оборудовано рубильниками для полного обесточивания помещения, а также применением специальных защитных устройств (сетевые фильтры, автоматические выключатели), что

также дополняет меры по электробезопасности. Осуществляется дистанционный контроль количества кислорода в окружающем воздухе с помощью автоматических или ручных приборов. Согласно нормам, в воздухе должно присутствовать не меньше 20 % кислорода.



Рисунок 5.2 – План эвакуации при пожаре и ЧС

В качестве средств оповещения при пожаре в помещении установлена система экстренного оповещения со звуковым извещателем. Она получает сигнал о пожаре от установленных в помещении специальных фототепловизионных датчиков, реагирующих на пламя по выделяемому им теплу и свечению.

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера: халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для локализации или ликвидации загорания на начальной стадии используются первичные средства пожаротушения. Первичные средства пожаротушения обычно применяют до прибытия пожарной команды.

Огнетушители водо-пенные (ОХВП-10) используют для тушения очагов пожара без наличия электроэнергии. Углекислотные (ОУ-2) и порошковые огнетушители предназначены для тушения электроустановок, находящихся под напряжением до 1000В. Для тушения токоведущих частей и электроустановок применяется переносной порошковый огнетушитель, например ОП-5.

В общественных зданиях и сооружениях на каждом этаже должно размещаться не менее двух переносных огнетушителей. Огнетушители следует располагать на видных местах вблизи от выходов из помещений на высоте не более 1,35 м. Размещение первичных средств пожаротушения в коридорах, переходах не должно препятствовать безопасной эвакуации людей.

Для предупреждения пожара и взрыва необходимо предусмотреть:

1. специальные изолированные помещения для хранения и разлива легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), оборудованные приточно-вытяжной вентиляцией во взрывобезопасном исполнении - соответствии с ГОСТ 12.4.021-75 и СНиП 2.04.05-86;

2. специальные помещения (для хранения в таре пылеобразной канифоли), изолированные от нагревательных приборов и нагретых частей оборудования;

3. первичные средства пожаротушения на производственных участках (передвижные углекислые огнетушители ГОСТ 9230-77, пенные огнетушители ТУ 22-4720-80, ящики с песком, войлок, кошма или асбестовое полотно);

4. автоматические сигнализаторы (типа СВК-3 М 1) для сигнализации о присутствии в воздухе помещений предвзрывных концентраций горючих паров растворителей и их смесей.

Лаборатория полностью соответствует требованиям пожарной безопасности, а именно, наличие охранно-пожарной сигнализации, плана эвакуации, порошковых огнетушителей с поверенным клеймом, табличек с указанием направления к запасному (эвакуационному) выходу.

С целью предотвращения пожаров необходимо:

1. Уходя из помещения, проверить отключение всех электронагревательных приборов, электроустановок, а также силовой и осветительной сети.

2. Курить только в отведенных для курения местах. В случае возникновения пожара приступить к его тушению имеющимися средствами, эвакуироваться и вызвать по телефону «01», сотовый «010» пожарную службу.

3. Провести ознакомление сотрудников с планом эвакуации людей и материальных ценностей при пожаре. План эвакуации должен находиться в каждом помещении и на каждом этаже лестничной площадке.

## **5.6 Экологичность разрабатываемого проекта**

В настоящее время одним из важных вопросов в любой сфере деятельности является вопрос экологичности. Экологичность отхода представляет собой способность отхода не оказывать отрицательного воздействия на окружающую среду за пределами допустимых значений. В настоящий момент ведутся активные работы по переработке отходов, их утилизации или обеспечения повторного использования. Переработка является процессом деятельности, направленным на изменение физического, химического состояния отхода для дальнейшего обращения с отходами.

По степени воздействия на организм человека вредные вещества, согласно ГОСТ 12.1.007-99 [68], делятся на четыре класса опасности:

1. 1-й класс – вещества чрезвычайно опасные (ртуть, свинец, тетраэтилсвинец и др.);

2. 2-й класс – вещества высокоопасные (бензол, марганец, медь, сероводород и др.);

3. 3-й класс – вещества умеренно опасные (толуол, метанол, уксусная кислота и др.);

4. 4-й класс – вещества малоопасные (нефть, бензин, ацетон, этиловый спирт и др.).

В компьютерах огромное количество компонентов, которые содержат токсичные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся:

- свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему);
- ртуть (поражает мозг и нервную систему);
- никель и цинк (могут вызывать дерматит);
- щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу);

Поэтому компьютер требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят:

- отделение металлических частей от неметаллических;
- металлические части переплавляются для последующего производства;
- неметаллические части компьютера подвергаются специально переработке[6];

Исходя из сказанного выше, перед планированием покупки ЭВМ для дальнейшего использования необходимо:

- Выяснить заранее о том, каким образом будет утилизирована имеющаяся техника, перед покупкой новой.
- Узнать, насколько новая техника соответствует современным эко-стандартам и примут ее на утилизацию после окончания срока службы.

Утилизировать оргтехнику специальным образом, а не выбрасывать на полигон твердых бытовых отходов необходимо по следующим причинам:

Во-первых, в ЭВМ и организационной технике содержится некоторое количество драгоценных металлов.

Во-вторых, предприятие также может быть оштрафовано за несанкционированный вывоз техники или оборудования на объекты захоронения твердых бытовых отходов;

Таким образом, утилизацию компьютера можно провести следующим образом:

- отделить металлические детали от неметаллов;
- разделить изделия из черных металлов от изготовленных из цветных металлов;
- пластмассовые изделия (крупногабаритные) измельчить для уменьшения объема;
- печатный порошок упаковать в отдельную упаковку, точно так же, как и все проклассифицированные и измельченные компоненты оргтехники, и после накопления на складе транспортных количеств отправить предприятиям и фирмам, специализирующимся по переработке отдельных видов материалов.

## **5.7 Безопасность в чрезвычайных ситуациях (ЧС)**

Природная чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившейся в результате возникновения источника природной чрезвычайной ситуации, который может повлечь или повлек за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей и (или) окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Производство находится в городе Томске с континентально-циклоническим климатом. Природные явления (землетрясения, наводнения, засухи, ураганы и т. д.), в данном городе отсутствуют.

Возможными ЧС на объекте в данном случае, могут быть сильные морозы и диверсия.

Для Сибири в зимнее время года характерны морозы. Достижение критически низких температур приводит к авариям систем тепло-

водоснабжения, сантехнических коммуникаций и электроснабжения, приостановке работы. В этом случае при подготовке к зиме следует предусмотреть а) газобаллонные калориферы (запасные обогреватели), б) дизель или бензоэлектрогенераторы; в) запасы питьевой и технической воды на складе (не менее 30 л на 1 человека); г) теплый транспорт для доставки работников на работу и с работы домой в случае отказа муниципального транспорта. Их количества и мощности должно хватать для того, чтобы работа на производстве не прекратилась.

В лаборатории наиболее вероятно возникновение чрезвычайных ситуаций (ЧС) техногенного характера.

Для предупреждения вероятности осуществления диверсии предприятие необходимо оборудовать системой видеонаблюдения, круглосуточной охраной, пропускной системой, надежной системой связи, а также исключения распространения информации о системе охраны объекта, расположении помещений и оборудования в помещениях, системах охраны, сигнализаторах, их местах установки и количестве. Должностные лица раз в полгода проводят тренировки по отработке действий на случай экстренной эвакуации.

## **5.8 Выводы по разделу «Социальная ответственность»**

В главе социальной ответственности были рассмотрены условия работы с вакуумной установкой при напылении люминесцентных покрытий на основе иттрий-алюминиевого граната, выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты, описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы.

## Заключение

В ходе выполнения работы был подробно рассмотрен метод магнетронного распыления, который был использован в качестве способа нанесения тонкопленочного люминофора состава  $Y_3Al_5O_{12}$ , легированного Се. В работе было рассмотрено влияние технологических параметров осаждения люминофора на его структурные и физические свойства.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) Увеличение концентрации реактивного газа в рабочей камере приводит к снижению скорости осаждения тонкопленочного люминофора. Из представленных зависимостей разряда МРС при распылении Се видно, что по мере увеличения потока кислорода происходит переход от чистой мишени к поверхности мишени покрытой соединением с кислородом, при этом скорость осаждения покрытия на подложке уменьшается.

2) По мере увеличения мощности на цериевом магнетроне, скорость осаждения тонкопленочного люминофора значительно увеличивается, что свидетельствует о доминировании церия в составе растущей пленки. Данная зависимость коррелируется с представленными далее рентгенограммам.

3) В ходе работы была доказана необходимость проведения высокотемпературного отжига для рекристаллизации формируемой структуры. Осаждаемая тонкая пленка люминофора до процесса отжига имела аморфную структуру. После процесса отжига положение дифракционных пиков соответствует положениям стандартной фазы  $Y_3Al_5O_{12}$ , полученной Объединенным комитетом по стандартам порошковой дифракции (JCPDS-33-0040).

4) Из представленной рентгенограммы в зависимости от расхода кислорода во время процесса видно, что с уменьшением расхода  $O_2$  во время осаждения, в формируемой структуре образуется нежелательная фаза  $Al_2Y_3$ . Это явление можно объяснить недостаточным количеством кислорода в пленке



для формирования фазы иттрий-алюминиевого граната, в процессе высокотемпературного отжига.

5) По мере увеличения температуры отжига, формируемая кристаллическая структура  $Y_3Al_5O_{12}$  становится более поликристаллической. С ростом температуры отжига увеличивается размер зерна кристаллической фазы иттрий-алюминиевого граната.

Исследование зависимости тока люминесценции на сконструированном стенде демонстрирует:

1) С ростом количества церия в структуре тонкопленочного люминофора, ток люминесценции уменьшается, что свидетельствует о препятствии эффекта люминесценции.

2) По мере уменьшения расхода кислорода в вакуумную камеру, ток фотолюминесценции снижается. Данную зависимость можно объяснить тем, что при недостаточном количестве кислорода в осаждаемой структуре, после процесса отжига формируется нежелательная фаза  $Al_2Y_3$ , наличие которой препятствует эффекту люминесценции. При осаждении люминофора в атмосфере кислорода, поток  $O_2$  – 100 см<sup>3</sup>/мин, после отжига структура не содержит фазы  $Al_2Y_3$ , осаждение в среде кислорода является более приемлемым с точки зрения значения тока фотолюминесценции.

3) Из зависимости тока люминесценции от температуры отжига видно, что увеличение температуры приводит к увеличению тока люминесценции. Данную зависимость можно объяснить тем, что с ростом температуры отжига, формируемая структура люминофора более упорядоченная, данная тенденция продемонстрирована на соответствующих рентгенограммах.

## Список публикаций студента

1. Yurjev Y. N., Goreninsky S. I., Runts A. A., Prosetskaya E. A., Plotnikov E. V., Shishkova D. K., Kudryavtseva Y. A., Bolbasov E. N. **DLC-coated ferroelectric membranes as vascular patches: Physico-chemical properties and biocompatibility** // Membranes. - 2021 - Vol. 11 - №. 9, Article number 690. - p. 1-13. doi: [10.3390/membranes11090690](https://doi.org/10.3390/membranes11090690)

2. Рунц А. А., Ручкин С. Е., Жидик Ю. С., Юрьева (Дудун) А. В., Полосухина М. И. **Исследование влияния режимов осаждения пленок алмазоподобного углерода на их физико-механические характеристики = Study of the influence of diamond-like carbon film deposition technology on the change of its physical and mechanical characteristics** // Прикладная физика = Applied Physics. - 2021 - № 6. - С. 58-62. doi: [10.51368/1996-0948-2021-6-58-62](https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-6-58-62)

3. Грудинин В. А., Рунц А. А., Блейхер Г. А. **Влияние плотности мощности магнетронного диода на скорость осаждения и фазовый состав CrNx покрытий** // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции, Томск, 25-29 Октября 2021. - Томск: ТПУ, 2021 - С. 133-134.

4. Рунц А. А., Юрьев Ю. Н., Больбасов Е. Н. **Сегнетоэлектрические мембраны с DLC-покрытием в виде сосудистых пластырей: физические свойства** // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции, Томск, 25-29 Октября 2021. - Томск: ТПУ, 2021 - С. 175-176.

5. Юрьев Ю. Н., Рунц А. А. **Исследование алмазоподобных покрытий, полученных методом импульсного осаждения** // Современные проблемы машиностроения: сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции, Томск, 28-30 Октября 2020. - Томск: ТПУ, 2020 - С. 195-196.

## Список используемой литературы

1. Miettinen K. *Nonlinear Multiobjective Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
2. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ. Н. В. Васильченко под ред. А. И. Горячева. — М.: Мир, 1978. — 361 с.
3. Орлов В. А., Петров В. И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. — М.: Военное изд-во, 1989. — 254 с
4. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. — М.: Радио и связь, 1988. — 272 с.
5. Бутслов М. М., Степанов Б. М., Фанченко С. Д. Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях. — М.: Наука, 1978. — 432 с
6. *Photomultiplier Handbook* // American Institute of Physics. — N. Y., 1998.
7. Волков В. В., Луизов А. В., Овчинникова Б. В., Травникова Н. П. Эргономика зрительной деятельности человека. — Л.: Машиностроение, 1989. — 112 с.
8. Borissova D., I. Mustakerov. Multicriteria Choice of Night Vision Devices Considering the Impact of Their Performance Parameters. – *Int. Journal Advanced Modeling and Optimization*, Vol. 10(1), 2008, pp. 81-93.
9. Borissova D. Multicriteria choice of the NVG optoelectronic channel elements. – *Problems of Engineering Cybernetics and Robotics*, Vol. 56, 2006, pp. 61-68.
10. Казанкин О.Н. Неорганические люминофоры / О. Н. Казанкин [и др.]. – Л.: Химия, 1975. – 192 с.
11. Пустоваров, В. А. Люминесценция твердых тел: учеб. пособие / В. А. Пустоваров. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 128 с.
12. Гурецкая, З. И. Технология люминофоров и люминесцентных экранов: учеб. пособие / З. И. Гурецкая; под ред. В. Н. Зубковской. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. – 208 с.

13. Бендерская, Л. П. Эффективные люминофоры для люминесцентных ламп / Л. П. Бендерская, Ф. И. Косинцев // Технология производства и исследование люминофоров: сб. науч. тр. / ВНИИЛ. – Ставрополь, 1981. – Вып. 20. – С. 3–14.
14. Mirzu M. Multiconfiguration optical system with applications in night vision devices. Sixth Symposium on Optoelectronics, T. Necsoiu, M.Robu, D. C. Dumitras, Eds. – Proc. SPIE, Vol. 4068, 2000, pp. 627-632.
15. Кочубей, В. И. Формирование и свойства центров люминесценции в щелочно-галогидных кристаллах / В. И. Кочубей. – М.: Физматлит, 2006. – 192 с.
16. Орлов В. А., Петров В. И. Приборы наблюдения ночью и при ограниченной видимости. — М.: Военное изд-во, 1989. — 254 с.
17. Mustakerov I., D. Borissova. Technical systems design by combinatorial optimization choice of elements on the example of night vision devices design. – Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences, Tome 60, No 4, 2007, pp. 373-380.
18. Авербух, В. М. Основные этапы развития люминесцентных материалов для цветного телевидения / В. М. Авербух, А. Ф. Голота // Вестник Ставропольского государственного университета. – 2004. – Т. 37. – С. 6–12.
19. Hopkinson R. G. // Inst. Electr. Eng. — 1946. — V. 93, N 3A. — P. 779.
20. Малкиель Б. С. Исследование, разработка и промышленное освоение осциллографических запоминающих и цветных ЭЛТ: дисс. на соиск. уч. ст. д. т. н. — Львов, 1981.
21. Саминский Л. А. Исследования в области технологии нанесения люминофоров: дисс. на соиск. уч. ст. к. х. н. — М., 1969.
22. Grosspo P. F., Neck R. F. Method of forming phosphor screen: патент США. — Field July 27, № 3672931. — 1970.
23. Лобанова И. И., Фадеева Ю. Н. Сокращение цикла люминесцентного экрана методом осаждения // Электронная техника. — 1976. — Т. 72, № 2. — С. 51–54.

24. McGee J. D., Aslam M., Airay R. W. The Evaluation of Cascade Phosphor-Photocathode Screens // Advances in Electronics and Electron Physics (Third Symposium of Photoelectronic image devices). — University of London, England. — 1966. — V. 22A. — P. 407–423.

25. Жилинскас Р. А., Наускас Ю.Ю., Пуртулис Р.Ю., Якученис Л. А. Влияние качества внутренних покрытий на оптические параметры ЭЛТ // Электронная техника. — 1982. — Т. 93, вып. 4. — С. 28–32.

26. Саминский Л. А., Твердохлеб И. Г. Нанесение органической пленки из акрилатного лака центробежным методом на тонкострунные экраны // Электронная техника. — 1972. — Т. 4, вып. 2. — С. 45–49.

27. Brill A., Klasens H. Intrinsic efficiencies of phosphors for cathode-ray excitation // Philips Research report. — 1952. — V. 7, N 5. — P. 17–21.

28. Лобанова И. И., Ширяева О. В. Оптимизация процессов формирования люминофорных покрытий и нанесения органической пленки с целью повышения процента выхода годных люминесцентных экранов ЭЛП на 10%: дисс. на соиск. уч. ст. д. т. н. — М., 1985.

29. Барановский В. И. Технология производства приемных электронно-лучевых трубок // М.: Энергия. — 1970. — С. 137–178.

30. Л. Ф. Коваленко, В. В. Севастьянов и др., Получение эффективных катодолюминесцентных структур на базе пленочной технологии. Украина, г. Винница, НИИ «Гелий», 29.08.2008.

31. М. М. Сычев, Y. Nakanishi., H. Kominami, Y. Hatanaka, Улучшение катодолюминесцентных свойств тонких пленок  $Y_2O_3:Eu$  легированием цинком и лазерным отжигом/ OSIC:310.6860. 2005г.

32. О. М. Бордун, Е. В. Довга, И. И. Кухарский / Катодолюминесценция пленок оксида иттрия и силикатов иттрия и цинка// УДК 535.37:539.216.

33. Sung Mook Chunga , Sang Hyuk Hanb , Young Jin Kimb // Characterization of compositional variation and luminescence of  $ZnGa_2O_4:Mn$  thin film phosphor.// Materials Letters 59 (2005) 786 – 789.

34. Вае, J., Kim, Y., Jang, J. *et al.* Усиленная люминесценция в тонкопленочных люминофорах  $ZnGa_2O_{4-x}S_x:Mn^{2+}$ , выращенных на подложке MgO(100). заявл. физ. 78, 1073–1077 (2004).
35. Harsha K.S.S. Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films / K.S.S. Harsha. – Elsevier, Great Britain, 2006. – P. 400.
36. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справ. / Н.Н. Рыкалин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
37. Joo Won Kim, Young Jin Kim // The effects of substrates and deposition parameters on the growing and luminescent properties of  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  thin films / Optical Materials 28 (2006). 698–702. doi:10.1016/j.optmat.2005.09.046.
38. Wen-Hsuan Chao, Ren-Jye Wu, Tai-Bor Wu // Structural and luminescent properties of YAG:Ce thin film phosphor / Journal of Alloys and Compounds 506. (2010). 98–102. doi:10.1016/j.jallcom.2010.04.136.
39. Jorge Gil-Rostra, Francisco Yubero Valencia, Agustín R. Gonzalez-Elipe. // Thin film electroluminescent device based on magnetron sputtered Tb doped  $ZnGa_2O_4$  layers/ Journal of Luminescence. 228 (2020) 117617.
40. Sung Mook Chunga, Sang Hyuk Hanb, Young Jin Kimb // Characterization of compositional variation and luminescence of  $ZnGa_2O_4:Mn$  thin film phosphor.// Materials Letters 59 (2005) 786 – 789.
41. М. М. Сычев, Y. Nakanishi., Н. Kominami, Y. Hatanaka, Улучшение катодолуминесцентных свойств тонких пленок  $Y_2O_3:Eu$  легированием цинком и лазерным отжигом/ OSIC:310.6860. 2005г.
42. J.M. Grace, D.B. McDonald, M.T. Reiten, J. Olson, R.T. Kampwirth, K.E. Gray, J. Vac. Sci. Technol. A 1600 (1992) 6.
43. О. М. Бордун, Е. В. Довга, И. И. Кухарский / Катодолуминесценция пленок оксида иттрия и силикатов иттрия и цинка// УДК 535.37:539.216.
44. Magnetron Sputtering Solutions. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.dentonvacuum.com/products-technologies/magnetron-sputtering/>

45. F. Shi, Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering, Magnetron Sputtering [Working Title], 2018
46. Магнетронная распылительная система для размещения внутри вакуумной камеры: руководство пользователя. – Т.: ООО прикладная электроника, 2013 г.
47. Conrads H., Schmidt M. Plasma generation and plasma sources // Plasma Sources Sci. Technol. – 2000. – 9. – P.441–454.
48. Anders, A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering / A. Anders // Surface and Coatings Technology. – 2011. – Т. 205. – С. S1–S9.
49. Черезова, Л.А. Ионно-лучевые методы в оптической технологии / Л.А. Черезова. – СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2007. – 151 с.
50. JSMSSD-5-02 Standard method for X-ray stress measurement – steel. JSMS committee on X-ray study on mechanical behavior of materials. – 2002. – p. 5–16.
51. Perry, A.J. Practical measurement of the residual stress in coatings / A.J. Perry, J.A. Sue, P.J. Martin // Surf. Coat. Technol. – 1996. – v. 81. – p. 17–28.
52. Берлин Е.В., Сейдман Л.А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. – М.: Техносфера. 2010. – 528 с.
53. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат. 1989. – 328 с.
54. Sproul W.D., Christie D.J., Carter D.C. Control of reactive sputtering processes // Thin Solid Films. – 2005. – Vol.491. – P.1–17.
55. Полисадова Е.Ф., Тао Хан, Олешко В.И., Валиев Д.Т., Ваганов В.А., Шонши Джанг. // Влияние концентрации церия на люминесцентные свойства  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  при ультрафиолетовом возбуждении. – 2002. – p. 5–16.
56. В. Н. Колобанов, В. В. Михайлин, Н. Н. Петровнин, Д. А. Спасский // Исследование спектров люминесценции монокристаллических пленок // Известия вузов. Физика. – 2011 – Т. 54 – №. 11/2 – С. 186-189.

57. Bin Wang, Hongji Qi, Hetong Han, Zhaohui Song, // Structural, luminescent properties and chemical state analysis of YAG:Ce // Vacuum. – 2004. – V. 74. – P. 397-401.

58. Takamura K., Abe Y., Sasaki K. Influence of oxygen flow ratio on the oxidation of Ti target and the formation process of TiO<sub>2</sub> films by reactive sputtering // Vacuum. – 2004. – V. 74. – P. 397-401.

59. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года).

60. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение.

61. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений;

62. СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона. Санитарные правила и нормы.

63. ГОСТ12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. Издательство стандартов. – Москва. – 1984.

64. ГОСТ 12.1.029-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства и методы защиты от шума. Классификация. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

65. ГОСТ 12.1.003-83 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности

66. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. «Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов»

67. ГОСТ 12.1.007-99 «Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности».

68. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности"



## Приложение А

(справочное)

### Production of thin-film luminescent coatings for the visible spectrum by magnetron sputtering

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ01	Рунц Артем Алексеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор, НОЦ Б.П. Вейнберга	Блейхер Г.А.	д.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков школы ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ОИЯ	Кабрышева О.П.			

## **1. Methods for applying cathodoluminescent coating**

As a rule, a cathodoluminescent screen is a luminescent layer formed on a glass (screen) substrate, covered with a layer of metal (aluminum) (Fig. 1.4). The works [1-9] describe in detail the basic methods of fabrication of luminescent screens, in particular, the operations for the manufacture of phosphor coatings and the organic sublayer for aluminization. Despite the practical value of the existing works, the methods proposed in them have a number of significant drawbacks, mostly they are either not economical and unproductive (fractionation of phosphors, deposition of organic film by pouring [7]), or require further development (ultrasonic dispersion of phosphors [5], mechanical methods of deposition of organic film [8], etc.).

### **1.1 Sedimentation methods of phosphor application**

One of the most common methods of obtaining phosphor coatings is the sedimentation method (deposition of the dispersed phase in a liquid under the action of a gravitational field or centrifugal force). In the sedimentation method of phosphor deposition, formation of a phosphor layer occurs under the action of a gravitational field or centrifugal force. The sedimentation methods of phosphor deposition include the method of centrifugation, pulverization, as well as the so-called method of phosphor deposition, all these methods will be discussed in more detail below. Sedimentation rate in deposition usually depends on the mass, viscosity, density, grain size of the phosphor, as well as on the acceleration, gravity and centrifugal forces acting on the particles.

This method is the simplest and most versatile, allowing to obtain uniform phosphor coatings on the surface of a transparent substrate. As a disadvantage of this method of phosphor deposition is a significant duration of the process. The reason for this is heterogeneity and slowness of kinetics of adsorption and structure formation (polymerization) of binder component of working suspension on luminophore particles and screen substrate. In addition, the layers are loose with a coarse-grained

structure due to the polydispersity of the initial phosphor powders, their high agglomeration, additional aggregation already in the process of deposition, due to the properties of the dispersion medium of the working suspension.

These factors, deteriorating the structure of the coating, ultimately have a negative impact on the luminescence parameters of fluorescent screens.

In order to improve the structure of phosphor coatings, as well as to reduce the deposition time, in [5, 11] it was proposed to pre-disperse the phosphor in an aqueous solution of potassium silicate or other inorganic dispersants by ultrasound (US) field, followed by introduction of the resulting suspension into the silicate gel. Then the phosphor is deposited on the surface of the screen substrate.

In [10] the results of previous studies are taken into account and ultrasonic pre-deposition for rare-earth oxysulfide phosphors in 0.8-1.0% potassium silicate solution for 20-30 min is recommended. It was shown that ultrasonic treatment of suspensions containing potassium silicate reduces the average particle size of luminophors and polydispersity of suspensions, as well as accelerates the fixing of coatings on the substrate and increases their adhesion strength by 2-3 times. This phenomenon can be explained by the fragmentation of aggregates into individual particles with subsequent stabilization of these particles by potassium silicate adsorbed on their surface. The proposed technological process, as compared with the process that does not use ultrasonic dispersion of phosphors, allows increasing the strength of adhesion of layers with a glass substrate by 2-2.5 times, reducing the duration of formation of the luminescent layer by 1.5-2 times (by 20-30 minutes) and increasing the yield by 20-30%. The use of layer vibration along with ultrasonic dispersion allows reducing the thickness of the phosphor layer almost 2 times, and the roughness - 2-3 times.

## **1.2 Application of phosphor by deposition**

A variation of the deposition method is the sedimentation method. This method is used for making screens for kinescopes, cascade screens for radar tubes as

well as screens for many special purpose devices. Since sulfide phosphors usually have rather large grains, the main method of phosphor deposition of these compositions is the method of deposition from the liquid phase. In this case, the liquid medium must firmly bind the phosphor particles to each other and to the substrate. The medium fixing the phosphor is most often a solution of potassium silicate. When potassium silicate is dissolved in demineralized water, in addition to the true  $K_2SiO_3$  solution, a colloidal solution of silicon dioxide ( $SiO_2$ ) is also formed, which has the property of polymerization. Colloidal particles of  $SiO_2$  envelope the phosphor grains and firmly attach them to the substrate. Since under normal conditions polymerization proceeds very slowly (to fix the phosphor would require several tens of hours), in a solution of potassium silicate a substance is added that accelerates the process, so-called coagulant. Strontium nitrate is most commonly used as a coagulant. In the presence of coagulant strong fixation of phosphor occurs in 30-40 minutes.

The scheme of the semi-automatic conveyor for phosphor deposition is shown in Figure 1.6.

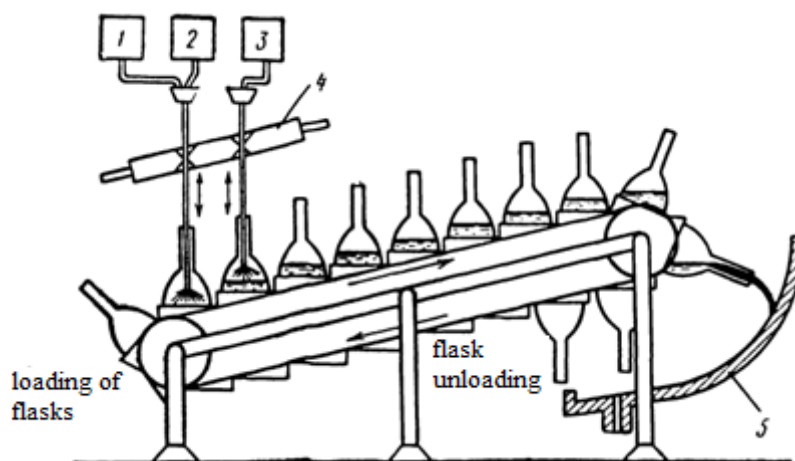


Figure 1.6 - Scheme of a semi-automatic device for applying a phosphor by deposition

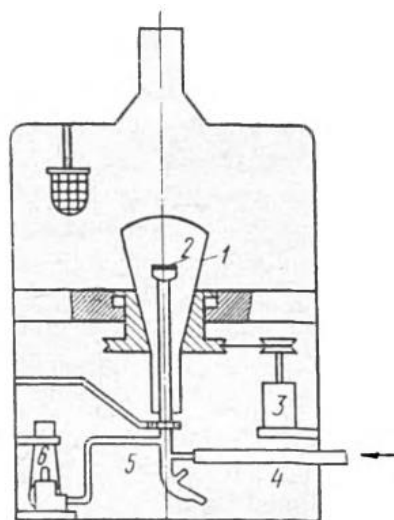
The flasks are mounted on a moving belt, above which containers 1, 2, 3 with the necessary solutions are placed. With the help of a special carriage and dispenser 4 portions of solutions are poured into the flasks.

The speed of the belt movement is calculated so that during the movement of the flasks from the moment of filling to the drain 5 the phosphor is securely fixed.

Two-layer screens are also applied by deposition. Deposition is usually carried out from a single solution of potassium silicate previously poured into the flask. At first, a photoluminophore suspension is introduced into the potassium silicate solution, and after 15-20 min a cathodoluminophore suspension is introduced. Drainage (siphoning) of the solution is carried out after complete precipitation of the cathodoluminophore.

### 1.3 Pulverization method

Luminophors that allow a reduction in grain size to less than 5  $\mu\text{m}$  can be applied by spraying. This method is widely used in the manufacture of volumetric oscillographic tubes with willemite screens. Calcium tungstate can also be spray applied. The scheme of the spraying installation is shown in Fig. 1.7.



1 - a flask, the bottom of which is the screen; 2 - spray gun; 3 – motor for screen rotation; 4 - branch pipe for supplying the suspension; 5 - steam pipe for supplying compressed air; 6 - compressor

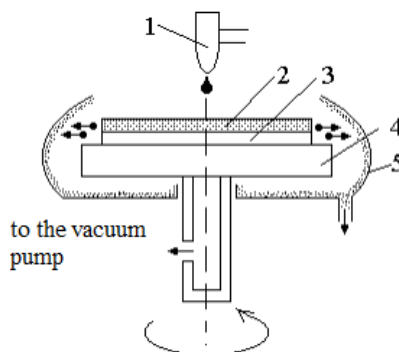
Figure 1.7 - Scheme of installation for applying the phosphor by spraying

Flask 1 is clamped by the neck down in the holder - cartridge, rotated by the motor 3 at a speed of about 50-60 rpm. Inside the flask the atomizer 2 is inserted,

which can swing in the vertical plane along the diameter of the screen. Atomizer through the tube 4 is fed with a suspension of phosphor, sprayed by a jet of compressed air from the pump 6 through the tube 5. When using villemite, the suspension is prepared in alcohol and diluted with acetone before use. Tungsten suspension is prepared on demineralized water. The quality of the screen applied by spraying depends significantly on the rate of drying of the compositions, so when using an alcoholic acetone suspension the flask is heated to 50-60 ° C, and when applying phosphor from an aqueous suspension - to 100-120 ° C. Heating of the flask provides a sufficiently rapid drying of the screen, which contributes to the production of phosphor layers, uniform in thickness and firmly adhered to the glass. The productivity of the method is quite high, however, the quality of the sprayed screens is somewhat inferior to the screen.

#### 1.4 Application of phosphor by centrifugation

Perhaps the most common method of forming a more uniform phosphor layer is the centrifugation method. When this method is used on the surface of the phosphor substrate, the highest uniformity of coating can be obtained. In this case, the phosphor has a uniform thickness over the entire area of the screen, without punctures, scratches, and at the same time has good adhesion. The scheme of phosphor application by centrifugation is shown in Figure 1.8.



- 1 – phosphor dispenser (dropper); 2 – phosphor layer; 3 - substrate;  
4 – centrifuge disk; 5 - collection of phosphor

Figure 1.8 - Scheme of the process of applying the phosphor by centrifugation

When the phosphor is applied to the screen surface, under the action of centrifugal forces, the phosphor, which is in the liquid state, spreads over the screen surface, forming a continuous homogeneous layer. Under the action of surface tension force not all the phosphor is removed from the surface. The thickness of the luminophore layer formed on the screen surface depends on the solution viscosity, centrifuge rotation speed, acceleration and centrifugation time. Using this method, thin layers with a high degree of homogeneity can be obtained.

## **2. Sublimation methods of phosphor screen application**

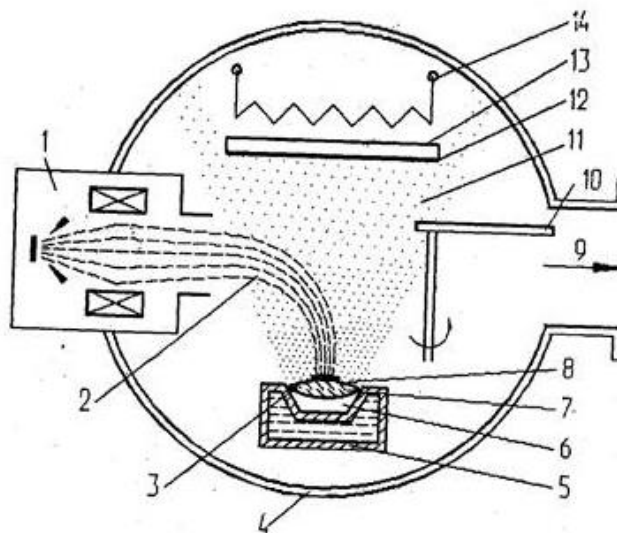
Screens deposited by deposition, pulverization and centrifugation, although meeting the basic requirements for the screens of most electron-beam devices, are not free from some drawbacks. The phosphor deposited by deposition or spraying is arranged on the substrate as a relatively loose, unconsolidated layer, resulting in an apparent coating thickness that is quite large. Therefore, the light emitted by the phosphor grains undergoes noticeable scattering in the thickness of the light composition layer, which leads to a visible increase in the diameter of the luminous spot on the screen and, as a consequence, to a decrease in the tube resolution and image contrast. In the case of using coarse-grained phosphors, the resolution limitation can be related to the grain size, because, obviously, the diameter of the luminous spot on the screen in principle cannot be smaller than the size of the phosphor grain emitted under the electron beam.

Free from these drawbacks are the so-called sublimation screens, which are thin, structureless films that form optical contact with the substrate. Sublimation screens can be produced by sublimation and deposition of the phosphor on a substrate or by sputtering the phosphor onto a refractory substrate (e.g., quartz) followed by annealing. Despite the obvious advantages in terms of homogeneity, resolution and contrast, sublimation screens are not yet widespread, mainly due to insufficient light output of phosphors and technological complexity of production.

## 2.1 Electron beam vaporization

One of the little-known methods of phosphor coating is the electron beam evaporation (EBE) method. In [12-16], a cathodoluminescent screen was obtained by electron-beam evaporation of a target of stoichiometric composition on a sapphire substrate.

The essence of the ELI method is the evaporation of the target under the influence of a high-energy focused electron beam [17]. In ELI the cathode emits a high-energy electron beam focused by a magnetic field, which, hitting the target material, locally vaporizes it. The evaporated material from the crucible is adsorbed on the surface of the substrate, thereby forming a coating of stoichiometric composition with the target. The ELI process is shown schematically in Figure 1.8.



- 1 - electron gun; 2 - electron beam; 3 - surface bombarded by the beam; 4 - chamber walls; 5 - water-cooled crucible;  
6 - material to be vaporized; 7 - material to be vaporized; 8 - vaporization surface; 9 - outlet to pump; 10 - flap; 11 - flow of material to be vaporized; 12 - material to be adsorbed; 13 - substrate; 14 - substrate heater

Figure 1.8 - Schematic diagram of electron-beam evaporation of materials

Currently, the ELI method uses electron-beam evaporators to produce thin films of metals, alloys, and dielectrics [18]. Good beam focusing allows a high



concentration of power (up to  $5 \cdot 10^{18}$  W/cm<sup>2</sup>) falling on a local area of the material to be vaporized, which provides high temperature and high evaporation rate even for refractory materials.

The electron-beam evaporator is placed in a vacuum chamber with a vacuum level of about  $10^{-4}$  Pa. This high degree of vacuum is necessary to minimize the effect of residual gas on the efficiency of the electron beam, and to prevent contamination by other materials inside the chamber [18].

## 2.2 Magnetron sputtering

Another method of obtaining phosphor coating is magnetron sputtering. To date, there are many works on obtaining various compositions of cathodoluminescent coatings by magnetron sputtering. In the works [19-25], researchers obtained phosphor coatings of different compositions by high-frequency (RF) and medium-frequency magnetron sputtering.

Magnetron sputtering systems refer to diode sputtering systems in which the material as a target is sputtered by bombarding the surface with charged ions of the working gas formed in the plasma of the anomalous luminous discharge [26]. Process of ion atomization (Fig. 1.9) takes place at pressure in the working chamber of 0.05 - 1 Pa. Ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> are used as working gases. The main types of coatings obtained by magnetron sputtering of the target are ceramic coatings, carbon coatings, nanocomposites and a full range of metal coatings [27].

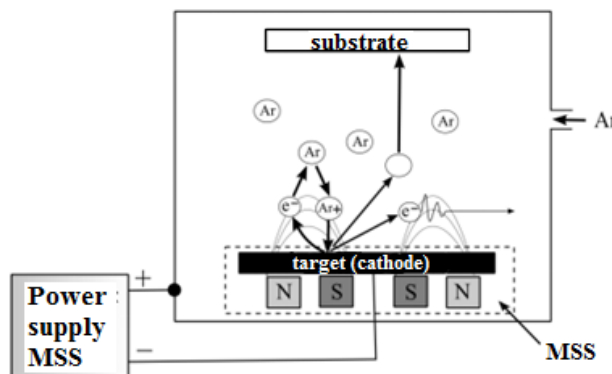


Figure 1.9 - The principle of magnetron deposition of coatings [28]

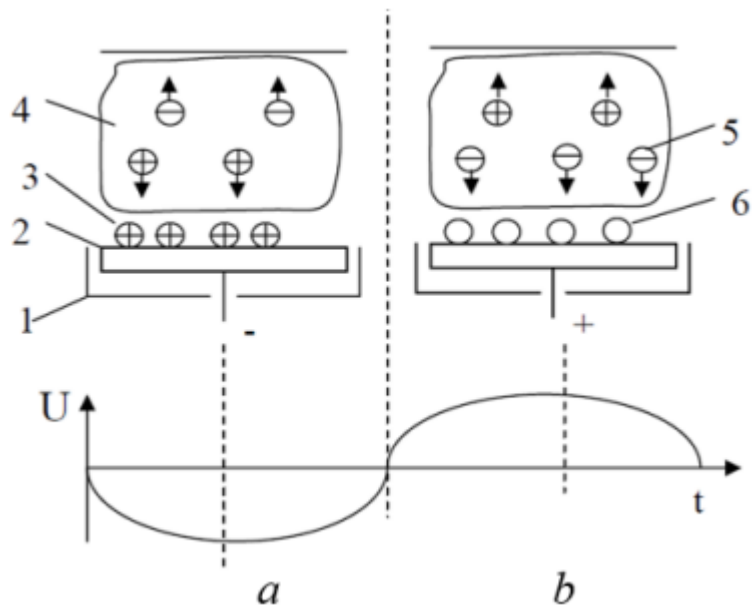
The main elements of the MRS are the magnetic system, the target cathode and the anode (Fig. 1.9). The power source of the system is a source of direct (DC) or pulsed (AC) current with a certain pulse duty cycle and a certain frequency. Sputtering of the target surface takes place between the exit and entry points of the magnetic field lines. This makes the sputtering location look like a closed trajectory, the geometry of which is determined by the shape of the poles of the magnetic system.

When a discharge is formed, the primary electron enters the magnetic trap formed by the crossed electric and magnetic fields. The electron begins to move along the cycloid, producing acts of gas ionization. Due to this, working gas ions with acquired energy bombard the target surface, which leads to sputtering of its surface; increase of ion current density leads to increase of the target sputtering rate, which in turn is directly related to plasma localization near the sputtering surface.

Advantages of this method include: deposition of coatings on heat-sensitive materials at low temperatures, which ensures sufficiently high deposition rate, as well as dense micro- (nano-) crystal structure of deposited coatings with complete absence of droplet phase.

The disadvantages of this method include: high cost of the equipment, as well as technical complexity of the process implementation [27].

When sputtering dielectric materials by magnetron sputtering, there is a problem associated with the accumulation of a positive charge on the target surface, taking this into account, for sputtering dielectric materials a high-frequency alternating potential is applied to the cathode. Therefore, high-frequency magnetron sputtering (RF magnetron sputtering) is used for the deposition of non-conductive coatings. The alternating voltage allows the positive charge accumulated during one half cycle to be neutralized by electron bombardment during the second half cycle, the scheme of this process is shown in Fig. 1.10.



1 - screen; 2 – anode; 3 - positively charged ions; 4 - plasma volume; 5 - electrons; 6 - molecule of the target substance

Figure 1.10 - Schemes of RF sputtering with negative (a) and positive (b) voltage half-cycles [30]

The surface of the dielectric target during RF magnetron sputtering has a certain negative displacement relative to the plasma ( $U_{cm}$ ), resulting in the formation of a dark cathode space (DCS) near the surface of the target, which contains the ion shell (Fig. 1.11). The displacement potential is expressed as:

$$U_{cm} = 0,5 \cdot U_{RF} \cdot \eta, \quad (1.3)$$

where  $U_{RF}$  is the maximum value of the RF voltage;  $\eta$  is a dimensionless coefficient, which is determined from the solution of the equations of motion of electrons and ions of the RF field, assuming that two forces act on the particle: a constant determined by  $U_{cm}$ , and a variable representing small deviations with the frequency of the RF field [31].

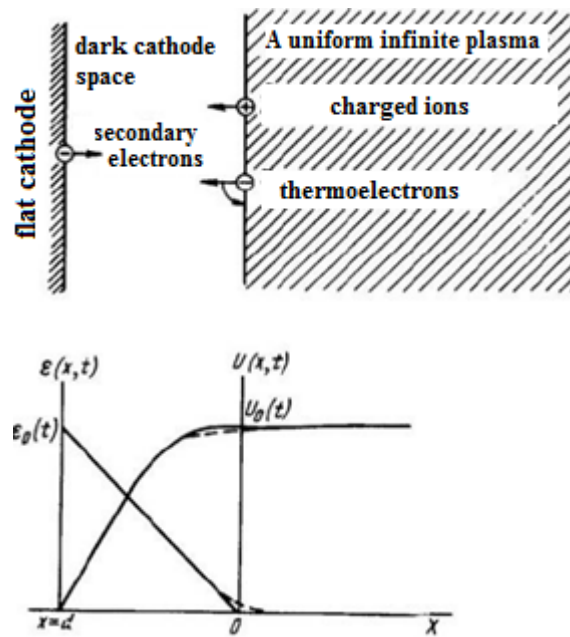


Figure 1.11 - Ideal one-dimensional model of the TST region during RF sputtering [31]

For effective sputtering of the target material it is necessary that the period of the RF voltage is sufficiently small; as a rule, in practice, a frequency of the RF discharge of at least 1 MHz is used. This reduces the ion current, thereby preventing the formation of a positive charge on the target. Discharge parameters, such as operating pressure, discharge power, and magnetic field configuration (balanced or unbalanced magnetron), affect the potential distribution and, therefore, the particle energy [31].

The advantage of RF magnetron sputtering, as already noted, is the possibility of sputtering dielectric materials. The disadvantage of this method is the low deposition rate of the coating.

## References

1. Hopkinson R. G. // Inst. electr. Eng. - 1946. - V. 93, N 3A. – P. 779.
2. Malkiel B.S. Research, development and industrial development of oscillographic storage and color CRTs: diss. for the competition uch. Art. d.t.s. - Lvov, 1981.
3. Saminsky L. A. Research in the field of phosphor deposition technology: diss. for the competition uch. Art. k. x. n. - M., 1969.
4. Grosspo P. F., Heck R. F. Method of forming phosphor screen: US patent. - Field July 27, No. 3672931. - 1970.
5. Lobanova II, Fadeeva Yu. N. Reducing the cycle of a luminescent screen by the deposition method // Elektronnaya tekhnika. - 1976. - T. 72, No. 2. - S. 51-54.
6. McGee J. D., Aslam M., Airay R. W. The Evaluation of Cascade Phosphor-Photocathode Screens // Advances in Electronics and Electron Physics (Third Symposium of Photoelectronic image devices). – University of London, England. - 1966. - V. 22A. - P. 407-423.
7. Zhilinskas R. A., Nauskas Yu. Yu., Purtulis R. Yu., Yakuchenis L. A. Influence of the quality of internal coatings on the optical parameters of a CRT // Elektronnaya tekhnika. - 1982. - T. 93, no. 4. - S. 28–32.
8. Saminsky L. A., Tverdokhleba I. G. Deposition of an organic film from acrylate varnish by centrifugal method on thin-string screens // Elektronnaya tekhnika. - 1972. - Vol. 4, issue. 2. – P. 45–49.
9. Brill A., Klasens H. Intrinsic efficiencies of phosphors for cathode-ray excitation // Philips Research report. - 1952. - V. 7, N 5. - P. 17–21.
10. Lobanova I. I., Shiryayeva O. V. Optimization of the processes of formation of phosphor coatings and deposition of an organic film in order to increase the percentage of yield of suitable ELP luminescent screens by 10%: diss. for the competition uch. Art. d.t.s. - M., 1985.
11. Baranovsky V.I. Technology of production of receiving cathode-ray tubes // M.: Energy. - 1970. - S. 137-178.

12. L. F. Kovalenko, V. V. Sevastyanov et al., Obtaining efficient cathodoluminescent structures based on film technology. Ukraine, Vinnitsa, Research Institute "Helium", 29.08.2008.
13. M. M. Sychev, Y. Nakanishi., H. Kominami, Y. Hatanaka, Improvement of the cathodoluminescence properties of  $Y_2O_3:Eu$  thin films by zinc doping and laser annealing / OSIC:310.6860. 2005
14. O. M. Bordun, E. V. Dovga, I. I. Kukharsky / Cathodoluminescence of films of yttrium oxide and yttrium and zinc silicates // UDC 535.37:539.216.
15. Sung Mook Chunga , Sang Hyuk Hanb , Young Jin Kimb // Characterization of compositional variation and luminescence of  $ZnGa_2O_4:Mn$  thin film phosphor.// Materials Letters 59 (2005) 786 – 789.
16. Bae, J., Kim, Y., Jang, J. et al. Enhanced luminescence in  $ZnGa_2O_{4-x}S_x:Mn^{2+}$  thin-film phosphors grown on a MgO(100) substrate. *dec. physical* 78, 1073–1077 (2004).
17. Harsha K.S.S. Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films / K.S.S. Harsha. - Elsevier, Great Britain, 2006. - P. 400.
18. Laser and electron-beam processing of materials: Ref. / N.N. Rykalin [i dr.]. - M.: Mashinostroenie, 1985. - 496 p.
19. Joo Won Kim, Young Jin Kim // The effects of substrates and deposition parameters on the growing and luminescent properties of  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  thin films / Optical Materials 28 (2006). 698–702.
20. Wen-Hsuan Chao, Ren-Jye Wu, Tai-Bor Wu // Structural and luminescent properties of YAG: Ce thin film phosphor / Journal of Alloys and Compounds 506. (2010). 98–102. doi:10.1016/j.jallcom.2010.04.136.
21. Jorge Gil-Rostra, Francisco Yubero Valencia, Agustin R. Gonzalez-Elipe. // Thin film electroluminescent device based on magnetron sputtered Tb doped  $ZnGa_2O_4$  layers/ Journal of Luminescence. 228 (2020) 117617.
22. Sung Mook Chunga , Sang Hyuk Hanb , Young Jin Kimb // Characterization of compositional variation and luminescence of  $ZnGa_2O_4:Mn$  thin film phosphor.// Materials Letters 59 (2005) 786 – 789.

23. M. M. Sychev, Y. Nakanishi., H. Kominami, Y. Hatanaka, Improvement of the cathodoluminescence properties of  $Y_2O_3:Eu$  thin films by zinc doping and laser annealing / OSIC:310.6860. 2005
24. J.M. Grace, D.B. McDonald, M.T. Reiten, J. Olson, R.T. Kampwirth, K.E. Gray, J. Vac. sci. Technol. A 1600 (1992) 6.
25. O. M. Bordun, E. V. Dovga, I. I. Kukharsky / Cathodoluminescence of films of yttrium oxide and yttrium and zinc silicates // UDC 535.37:539.216.
26. Magnetron Sputtering Solutions. [Electronic resource] - access mode: <https://www.dentonvacuum.com/products-technologies/magnetron-sputtering/>
27. F. Shi, Introductory Chapter: Basic Theory of Magnetron Sputtering, Magnetron Sputtering [Working Title], 2018
28. Magnetron sputtering system for placement inside a vacuum chamber: user manual. - T. : LLC applied electronics, 2013
29. Conrads H., Schmidt M. Plasma generation and plasma sources // Plasma Sources Sci. Technol. - 2000. - 9. - P.441-454.
30. Anders, A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering / A. Anders // Surface and Coatings Technology. - 2011. - T. 205. - S. S1–S9.