Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске

Методическое обеспечение дисциплины

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Смоленск – 2021 г.

Методические материалы составил:

к.т.н., доцент_____ __Беляков М. В.__
подпись ФИО

« 24» _июня__ 2021 г.

Заведующий кафедрой «Электроники и микропроцессорной техники**»:**

_____ Якименко Игорь Владимирович
подпись ФИО

«02» июля 2021 г.

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске

Методическое обеспечение лекций
по дисциплине

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Смоленск – 2021 г.

Комплект слайдов к лекциям

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске

Лабораторный практикум
по дисциплине

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Смоленск – 2021 г.

1. Цели лабораторного практикума

Лабораторный практикум по дисциплине «Оптико-электронные приборы и системы» служит для практического подкрепления лекционного материала и привития навыков оценки соответствия функционирования оптико-электронных систем требованиям технологии работы конкретных приборов, узлов и их моделей.

Лабораторные занятия по дисциплине проводятся в лаб. В-206 «Оптико-электронные системы» учебно-лабораторного корпуса филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске.

Цель студента при работе в лаборатории по дисциплине «Оптико-электронные приборы и системы» – отработка навыков работы с приборами ночного видения и их составными частями: электронно-оптическими преобразователями, объективами, а также бесконтактными системами измерения температуры.

2. Теоретическое введение и состав лабораторного оборудования

Целью работы является измерение и расчёт основных параметров электронно-оптических преобразователей (ЭОП).

В процессе производства ЭОП, а также при их эксплуатации обычно предусматривается измерение следующих основных параметров:

1. Интегральной чувствительности – S, мкА/лм – отношение фототока фотокатода ЭОП к падающему на фотокатод световому потоку от источника излучения, работающего в режиме источника типа A.

2. Коэффициент преобразования – η, о. е. – отношение светового потока, излучаемого экраном ЭОП, к световому потоку, падающему на фотокатод от источника излучения, работающего в режиме источника типа A.

3. Коэффициент преобразования по яркости – η_L, кд/(м^2·лк) – отношение яркости экрана к освещенности фотокатода ЭОП.

4. Электронно-оптическое увеличение – $Г_{ЭО}$, о.е. – отношение линейного размера изображения тест-объекта на экране ЭОП к соответствующему размеру этого же тест-объекта на фотокатоде ЭОП.

5. Квантовый выход фотокатода ЭОП – K, о.е. – отношение числа фотоэлектронов к общему числу фотонов, упавших на фотокатод, на данной длине волны.

Описание лабораторной установки

Измерительная лабораторная установка (рисунок 1.1), состоит из следующих элементов: эталонного источника света ($I_{ЭТ}$ = 0,8 кд), селенового фотоэлемента ФЭС-10, гальванометра и собранных в одном блоке двух исследуемых ЭОП с многощелочным и кислородно-цезиевым фотокатодами. Кроме того, предусмотрено наличие съёмного светофильтра. Все элементы находятся на оптической скамье.

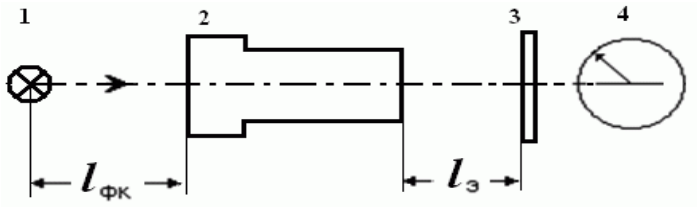

Рисунок 1.1 - Схема лабораторной установки:

1 – источник света, 2 – ЭОП, 3 – селеновый фотоэлемент, 4 – гальванометр, регистрирующий ток от фотоэлемента

Целью работы является исследование характеристик одного из приборов визуализации изображений с использованием электронно-оптического преобра-зователя (ЭОП).

Прибор ночного видения (ПНВ), предназначенный для наблюдения различных объектов при инфракрасном освещении, характеризуется рядом параметров, которые определяются в данной работе.

Увеличение прибора Г определяется отношением тангенсов углов, под которыми виден наблюдаемый объект при работе с прибором σ' и без него σ:

$$\Gamma = \operatorname{tg}\sigma'/tg\,\sigma = \Gamma_0 \cdot \Gamma_{ЭО}, \qquad (2.1)$$

где Γ_0 – увеличение оптической системы прибора ($\Gamma_0 = f'_{об} / f'_{ок}$); $\Gamma_{ЭО}$ – электронно-оптическое увеличение (отношение размеров изображения объекта на экране к размеру изображения того же объекта, созданного объективом на фотокатоде).

Угловое поле (поле зрения) прибора 2ω определяется размером фотокатода и фокусным расстоянием объектива и вычисляется по формуле

$$2\omega = 2\cdot\operatorname{arctg}\,[D_{ФК}/(2\ f'_{об})], \qquad (2.2)$$

где $D_{ФК}$ – диаметр фотокатода; $f'_{об}$ – фокусное расстояние объектива.

Разрешающая способность прибора представляет собой наименьший угол, под которым при оптимальных для глаза условиях наблюдения видны раздельно две светящиеся точки пространства предметов. Разрешающая способность R оптических элементов прибора обычно выше разрешающей способности ЭОПа. Поэтому можно считать, что при больших освещен-ностях фотокатода разрешение прибора ночного видения определяется разрешением ЭОПа. На практике разрешающая способность обычно определяется числом штрихов миры ГОИ, видимых на экране раздельно. Число видимых штрихов может быть отнесено и к фотокатоду:

$$N_{ФК} = N_Э \cdot \Gamma_{ЭО}, \qquad (2.3)$$

где $N_Э$ – число штрихов миры, видимых на экране раздельно.

Разрешающая способность на краю экрана ЭОПа, вследствие аберраций, отличается от разрешающей способности в центре экрана.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Лабораторная установка включает в себя стенд, на котором смонтированы блоки питания инфракрасного (ИК) осветителя и ЭОП прибора ПНВ-57а. Внешний вид центрального отсека стенда показан на рис 2.1.

ИК-излучатель конструктивно оформлен в виде экрана *1* (см. рис. 2.1). Яркость его регулируется ручкой автотрансформатора *4* (см. рис. 2.1).

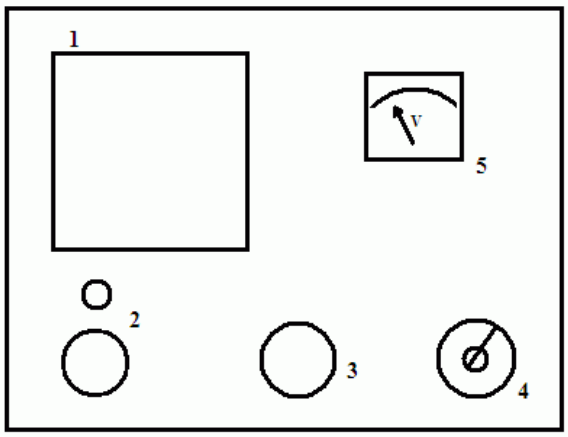

Рисунок 2.1 - Внешний вид центрального отсека стенда:
1 – ИК излучатель; 2 – тумблер и индикатор включения лабораторной установки; 3 – тумблер включения ИК-излучателя; 4 – автотрансформатор для регулирова-ния питания ИК-излучателя; 5 – вольтметр

Перед объективом ПНВ крепится коллиматор с объективом ($f'_К$ = 52,4 мм) в фокальной плоскости которого перемещается мира №4 (b=9,6 мм), что позволяет измерить разрешающую способность прибора по полю зрения. Блок питания ЭОП – источник питания, стабилизированный ИПС-1, – расположен в левом отсеке установки.

Для измерения яркости экрана ЭОПа используется фотометр ФПЧ, состоящий из двух блоков: оптического и электрического. Фотометр ФПЧ представляет собой яркомер. Пределы измерения – от $2 \cdot 10^{-2}$ кд/м^2 до $5 \cdot 10^4$ кд/м^2. Для контроля наводки на фотометрический объект на головке имеется встроенное визирное устройство. Результаты измерения снимаются по стрелочному прибору, встроенному в блок ФПЧ-БПУ.

Целью работы является измерение и расчёт характеристик системы визуализации, определяющих качество изображения.

К объективно измеряемым характеристикам, определяющим качество изображения, относят: импульсную реакцию $P(x, y)$, переходную $H(x, y)$ и передаточную $T(j\omega_x, j\omega_y)$ характеристики. Кроме того, часто используют:

– амплитудную характеристику, равную отношению амплитуды яркости на данной пространственной частоте к амплитуде яркости на частоте, стремящейся к нулю;

– характеристику потока, равную отношению среднего значения яркости за половину периода при заданной частоте к среднему значению яркости за половину периода при пространственной частоте, стремящейся к нулю.

Эти характеристики измеряют с помощью различных тест-объектов (штриховые черно-белые миры ГОИ и др.)

Выбор той или иной характеристики для объективной оценки качества связан с удобством ее измерения и дальнейшего практического использования.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В данной работе исследуются характеристики объективов приборов ночного видения. Измерительная установка для первой части работы, схема которой приведена на рисунке 3.1, состоит из следующих основных частей: *1* – осветитель; *2* – тест-объект; *3* – коллиматор; *4* – объектив прибора ночного видения; *5*– микроскоп; *6* – экран.

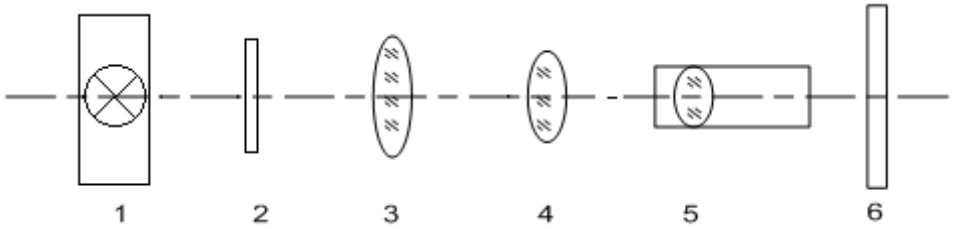

Рисунок 3.1 - Схема установки

В качестве осветителя 1 используется стандартный осветитель ОИ-24 с регулируемым источником питания. Тест-объектами 2 в работе являются: миры ГОИ, щель и край лезвия бритвы, которые помещаются в фокальную плоскость коллиматорного объектива 3. Микроскоп 5 переносит изображение на экран 6.

Во второй части работы используются микрофотометр МФ-2 и обработанная фотопластинка, укрепленная на столике прибора. На фотопластинке зарегистрированы тест-объект «край». Оптическая схема и внешний вид микрофотометра МФ-2 представлены на рис. 3.2 и 3.3.

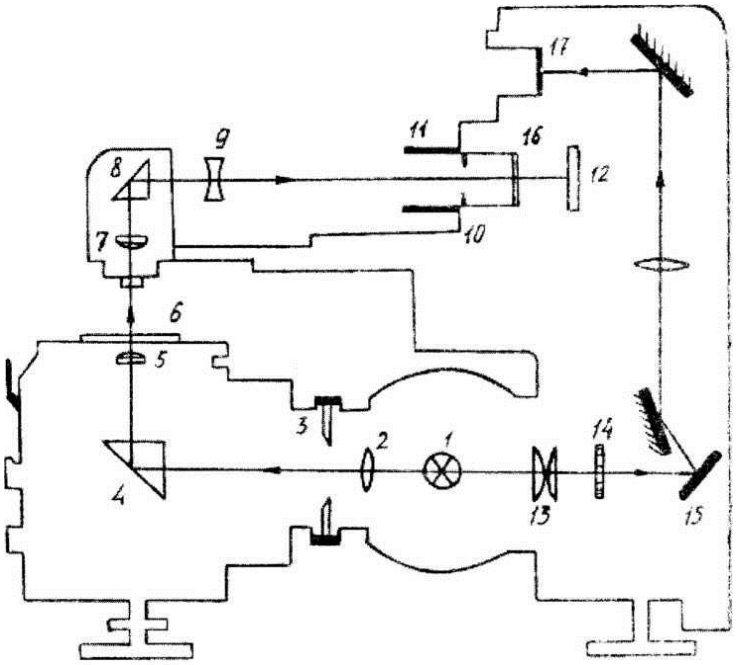

Рисунок 3.2 – Оптическая схема микрофотометра МФ-2

Свет от лампы 1 (см. рис. 3.2) проходит конденсор 2, обеспечивающий равномерное освещение щели с зелеными фильтрами 3. Изображение этой щели, уменьшенное с помощью объектива 5, проектируется в плоскость фотопластинки 6. Равномерно освещенный участок фотопластинки проектируется на экран микрофотометра 16 с помощью объектива 7.

Для более компактного расположения деталей оптическая ось дважды изменяет свое направление на 90° при помощи поворотных призм 4 и 8. Конструктивно экран 16 совмещен с двумя диафрагмами 10 и 11, позволяющими ограничить световой пучок по высоте и ширине в соответствии с размерами исследуемого участка фотопластинки, изображение которого получается на экране. Для изменения освещенности экрана используется линза 9.

Фотоэлемент 12 регистрирует световой поток, прошедший через участок фотопластинки. Ток фотоэлемента поворачивает рамку гальванометра вместе с зеркалом 15. Зеркало 15 отбрасывает при этом изображение шкалы 14, нанесенной на стеклянной пластинке вблизи конденсора 13, на отсчетный матовый экран 17. Для точного отсчета показаний на экране 17 нанесен указатель.

Таким образом, с помощью микрофотометра можно регистрировать и сравнивать световые потоки.

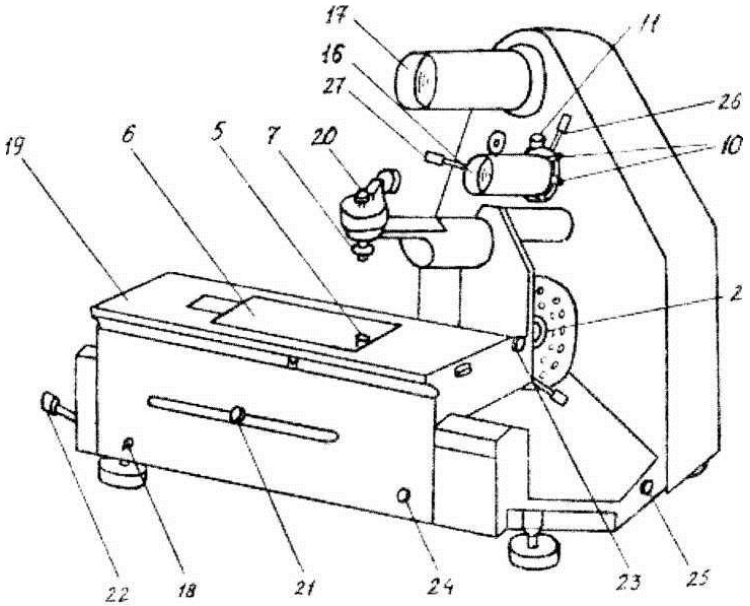

Рисунок 3.3 – Внешний вид микрофотометра МФ-2

Включение прибора осуществляется с помощью тумблера на блоке питания. Блок питания работает от сети переменного тока напряжения 220 В и обеспечивает стабильную работу осветительной лампы 1. Устойчивость работы лампы может быть проверена по отсутствию колебаний шкалы на экране 17, при открытом затворе фотоэлемента. Положение затвора устанавливается тумблером 18 (см. рис. 3.3.).

Измеряемая фотопластинка помещается на горизонтальный столик 19 прибора, и объективом 7 с помощью винта 20 производится фокусировка изображения участка спектрограммы на экране 16.

Столик фотометра устанавливается так, чтобы изображение фотометрируемого края было параллельно щели фотоэлемента, а изображение линий на спектрограмме оставалось резким при перемещении столика микрофотометра 19 (грубое перемещение вдоль спектра производится от руки, предварительно отпустив винт 21, плавно - винтом 22; поперечное перемещение столика производится винтом 23).

Высота щели фотоэлемента устанавливается с помощью шторок диафрагмы 10.

Целью работы является исследование электронно-оптических фоку-сирующих систем (ЭООФС), состоящих из двух и трех электродов.

Предметом геометрической электронной оптики являются вопросы фокусировки электронных потоков и получения электронных линз. При рассмотрении геометрической электронной оптики предполагается, что электриче-ское поле, определяющее характер движения заряженных частиц, является чисто внешним, т.е. создается электродами с заданными потенциалами, а действие собственного электрического поля электронных потоков не учитывается.

Оставаясь в рамках геометрической оптики, можно говорить о *фокуси-ровке*, как о сведении электронного потока в точку для получения качествен-ных электронных изображений, используя для этого аналогию между электронной и световой оптикой. Электронно-оптический закон преломления описывается уравнением:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\sqrt{U_2}}{\sqrt{U_1}}, \qquad (4.1)$$

где α – угол, образуемый падающим лучом, β – угол, образуемый преломлен-ным лучом, при прохождении из области потенциала U_1 в область потенци-ала U_2. Рассматривая поверхности равного потенциала, как преломляющие поверхности оптической среды можно, используя законы световой оптики, найти траектории электронов в электрических полях.

В электронной оптике электронной линзой называется приосевая область неоднородного осесимметричного электрического поля.

В инженерной практике электронной линзой часто называют систему электродов, создающих осесимметричные поля.

По аналогии со световой оптикой электронные линзы характеризуются положением четырех кардинальных элементов – двух главных фокусов (F_1, F_2) и двух главных плоскостей (h_1, h_2).

Описание установки

Электрическая схема установки для исследования ЭОФС приведена на рисунке 4.1. Схема питается от сети переменного напряжения 220 В с частотой 50 Гц. Лампа тлеющего разряда HL1 индицирует работу схемы при включении ключа S1. Предохранитель FU1 на рабочий ток (0,25 А) предотвращает выход из строя элементов схемы при перегрузках в сети и коротком замыкании в цепи. Напряжение, подаваемое на электроды, помещенные в ванну, выбирается невысоким (1...30 В) из соображений техники безопасности и отсутствия заметного нагрева электролита, так как местный значительный перегрев может привести к изменению проводимости. Разделяющий и, одновременно, понижающий трансформатор Т1 изменяет напряжение от 220 В до 13 В.

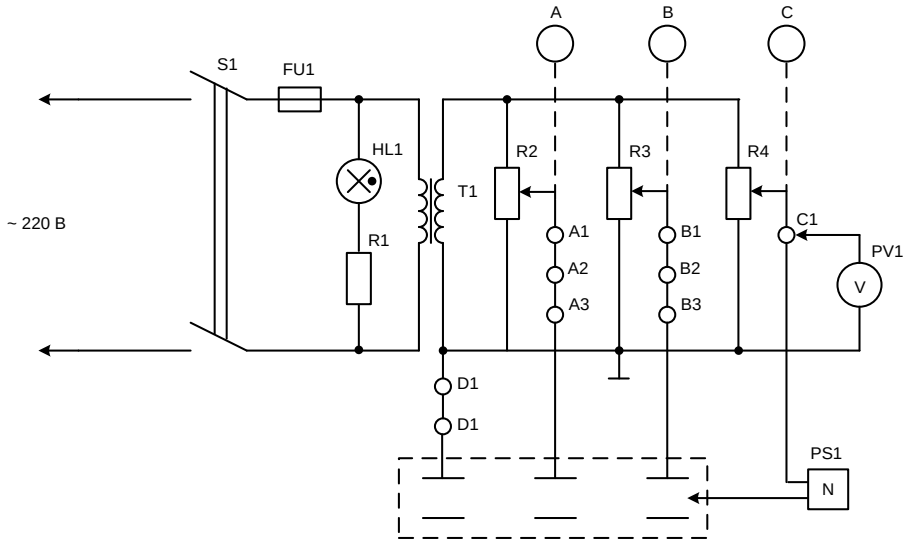

Рисунок 4.1 - Электрическая схема экспериментальной установки

С помощью потенциометров R2, R3 можно регулировать напряжение на электродах от 0 В до 13 В. Потенциометр R4 служит для изменения напряжения на щупе осциллографа PS4 С1-18.

Вольтметр PV1 ВМ-7-16 необходим, чтобы установить напряжение на электродах, задать потенциал в межэлектродном пространстве и последовательно исследовать картину поля. Установленный с помощью Р5 потенциал пространства подается на дифференциальный вход осциллографа. Щупом, подключенным ко второй клемме дифференциального входа, находят нужные точки в межэлектродном пространстве по нулевому сигналу на экране осциллографа.

Электрическая схема позволяет исследовать ЭОФС *с помощью электролитической ванны*. В качестве электролита можно использовать обычную водопроводную воду, так как её удельная проводимость достаточно мала. В ванну устанавливаются модели электродов, которые моделируют ЭОФС при подаче на них напряжения.

Описание установки

Пирометр (бесконтактный инфракрасный термометр) ADATemPro 300 предназначен для дистанционного бесконтактного измерения температуры по тепловому (инфракрасному) излучению обследуемого объекта. Встроенный лазерный прицел, подсветка дисплея, форма пистолетного типа, удобная комбинация кнопок улучшают эргономику этого прибора.

ADATemPro 300 позволяет измерять температуру поверхности объектов, которую трудно или опасно измерить контактным способом (например, движущиеся механизмы, находящиеся под током, труднодоступные, стерильные объекты). Для обеспечения продолжительной, надёжной работы прибора обязательно ознакомьтесь с руководством по эксплуатации.

Пирометр измеряет температуру поверхности объектов. Прибор воспринимает излучаемую, отражённую и проходящую тепловую энергию, которая собирается и фокусируется на инфракрасном датчике. Электронная система прибора передаёт информацию на устройство, рассчитывающее температуру, и отображает её на экране. Для увеличения точности измерения пирометр оснащён лазерным целеуказателем, луч которого должен падать перпендикулярно на интересующую поверхность.

Рисунок 3.1 - Устройство инфракрасного пирометра

1 - лазерный указатель; 2 - инфракрасный датчик; 3 - ЖК дисплей; 4 - клавиша ИЗМЕРЕНИЕ; 5 - батарейный отсек; 6 - кнопка выбора единиц измерения C/F; 7 - кнопка вкл/выкл лазерного целеуказателя; 8 - кнопка вкл/выкл подсветки дисплея.

3. Перечень лабораторных работ и методические рекомендации по выполнению рабочего задания

Лабораторный практикум включает 6 лабораторных работ (по 4 часа).

Рабочее задание на лабораторный практикум:

Лабораторная работа № 1. Исследование параметров электронно-оптических преобразователей

Лабораторная работа № 2. Исследование характеристик прибора с электронно-оптическим преобразователем

Лабораторная работа № 3. Исследование объективно измеряемых характеристик системы визуализации, определяющих качество изображения

Лабораторная работа № 4. Исследование электронно-оптических фокусирующих систем

Лабораторная работа № 5. Исследование оптико-электронных систем измерения температуры (пирометров)

Защита лабораторных работ.

3. Контрольные вопросы

1. Классификация и основные типы ЭОП.
2. Достоинства и недостатки ЭОП с мультищелочными катодами.
3. Достоинства и недостатки ЭОП с кислородо-серебряно-цезиевыми фотокатодами.
4. Методика измерения основных параметров ЭОП и факторы ее определяющие.
5. Разрешающая способность ЭОП и факторы ее определяющие.
6. Катодолюминесцентные экраны ЭОП и их характеристики.
7. Методы усиления яркости изображения в ЭОП.
8. Методика и результаты градуировки гальванометра.
9. Погрешность измерений на установке.
10. Основные составляющие прибора ночного видения.
11. Схема работы прибора ночного видения.
12. Основные параметры прибора ночного видения.
13. От чего зависит разрешающая способность приборов ночного видения?
14. Как контролируется разрешающая способность приборов?
15. Чем определяется увеличение прибора?
16. Как измерить поле зрения прибора?
17. Требования к оптике прибора ночного видения.
18. Критерии качества оптико-электронных систем.
19. Методика измерения переходных характеристик.
20. Оценка разрешающей способности электронно-оптических преобразователей.
21. Юстировка элементов оптико-электронной измерительной системы лабораторной установки.
22. Требования к выбору объектива микроскопа.
23. Требования к фотографической эмульсии, используемой для измерения переходной кривой.
24. Методика определения передаточной характеристики ЭОП.
25. Общие принципы управления электронными пучками.
26. Сходство и различие между световой и электронной оптикой.
27. Электронно-оптический инвариант.
28. Классификация электростатических линз.
29. Методы моделирования ЭОФС.
30. Методы обработки результатов.

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске

Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Смоленск – 2021 г.

1. Цели и задачи, объем практических занятий по дисциплине

Цель практических занятий по дисциплине «Оптико-электронные приборы и системы» – закрепление лекционного материала дисциплины, обучение студентов практической стороне компетенций, закрепленных за дисциплиной.

Для достижения поставленной цели на практических занятиях решаются следующие задачи:

- расчёты моделей оптико-электронных систем и их важнейших элементов;
- синтез математических моделей, соответствующих разработанным структурным и функциональным.

Объем практических занятий - в соответствии с рабочей программой дисциплины «Оптико-электронные приборы и системы».

2. Задания на практические занятия по дисциплине

Цель практических занятий по дисциплине – закрепление лекционного материала дисциплины, обучение студентов практической стороне компетенций, закрепленных за дисциплиной.

Задания на практические занятия по дисциплине

1. Определить чувствительность приёмника, если площадь его поверхности $2\cdot10^{-2}$ см^2, а удельная обнаружительная способность D^*=1,3·10^{5}см Гц$^{1/2}$Вт$^{-1}$. Среднеквадратическое значение шумового тока в полосе частот 250Гц составляет $1{,}2\cdot10^{-6}$А.
2. Для фазового анализатора изображения с числом периодов растра m=3 определить смещение по оси x, если разность фаз текущего и опорного значений сигнала 20º, а проекция радиус-вектора центра изображения 5 см.
3. Определить радиус диска Эри в фокальной плоскости объектива оптической системы. Диафрагменное число - 4, а длина волны излучения 0,69 мкм.
4. Во сколько раз освещённость в плоскости освещаемого объекта становится больше при применении конденсора, если его коэффициент пропускания – 81%. Площадь входного зрачка конденсора 3,5 см^2, проекция излучающей площадки источника на плоскость перпендикулярную оптической оси 0,55 см^2.
5. Какой длины необходимо выбрать магнитооптическую ячейку Фарадея, чтобы угол поворота плоскости поляризации составлял 0,05'. Постоянная Верде при 293К и длине волны 589,3 нм составляет $0{,}042*10^{-6}$ угл мин/А. Напряженность магнитного поля 10^7 А/см.
6. Каков оптимальный диаметр чувствительной поверхности фотоприёмника, помещённого в фокальную плоскость объектива приёмной ОС, если относительное отверстие объектива 1:4, диаметр 10 мм, а его угловое поле 20°.
7. Для расстояния 3,5 км определить пороговую разность яркостей $\Delta L_п$ двух соседних элементов пространства объектов, если пороговая освещённость равна 10^{-3} лк , угловое поле 0,092 ср. Экспоненциальный показатель ослабления среды $5\cdot10^{-2}$ 1/км для λ=1,06мкм.
8. Определить угловой размер строки, если диаметр вращающейся призмы D=11 см, а линейный размер грани Δ=5,5 см. Коэффициент использования зеркала η=0,8. Определить также число рабочих граней призмы.
9. Определить коэффициент преобразования анализатора, если поток излучения изменяется от 500 Вт до 45 Вт на расстоянии от 1,5 см до 3,0 м.

10. Определить коэффициент пропускания жгута оптических волокон, если суммарная полезная площадь торцов 15 мм^2, общая площадь входного торца жгута 35 мм^2, коэффициент пропускания жгута 85%, коэффициент отражения на торцах волокна 4,0%, входной апертурный угол 40°.
11. На какой угол необходимо повернуть микрометрический винт компенсатора, чтобы компенсировать угловое рассогласование 0,55°. Фокусное расстояние объектива – 25 мм, шаг винта – 1,5 мм.
12. Какой уровень освещённости рассеянного излучения способна обеспечить бленда, если её коэффициент ослабления 1000, а освещённость от боковой помехи на входном окне - 2,5Млк.
13. Определить поток излучения, попавшего на приёмник, если зеркальная ОС с контррефлектором приняла поток 30 Вт. Диаметр входного зрачка ОС 25 мм, диаметр "слепого пятна" 2,5 мм. Коэффициент пропускания ОС – 70%.
14. Определить угол обзора, если диаметр входного зрачка 3 см, диаметр вращения призмы 4,6 см. Оптимальный угол установки 32°. Призма трёхгранная.
15. Определить отношение сигнала к шуму для последовательного сканирования, если линейка приёмников состоит из 20 элементов, напряжения сигнала и шума соответственно. $U_с$= 5 мВ, $U_ш$=0,3 мВ. Во сколько раз это отношение больше, чем с одним приёмником?
16. Чему равна площадь входного зрачка конденсора с коэффициентом пропускания 79%, если при его применении освещённость в плоскости объекта увеличивается в 3,5 раза. Площадь проекции излучающей площадки источника на плоскость перпендикулярную оптической оси 0,45 см^2.
17. Определить максимальную относительную погрешность в измерении расстояния для фазового дальномера, если погрешность измерения фазы составляет от 2% до 11% для расстояний не более 1,2 км. Частота модуляции 260 кГц.
18. Определить число элементов разложения в одной строке, если исследуется прямоугольное поле обзора размерами $2\Omega_x \times 2\Omega_y$=15×30см Коэффициенты, учитывающие перекрытие строк и элементов разложения вдоль осей x и y составляют $k_{пх}$=1,1 и $k_{пу}$=0,85. Число строк N=150.
19. Определить освещённость от боковой помехи на входном окне бленды, если освещённость рассеянного излучения составляет 30Млк, а коэффициент ослабления при максимальном угле засветки 30º составляет 2500.
20. Каков шаг микрометрического винта компенсатора, если при повороте на угол 60º компенсируется рассогласование 0,35º. Фокусное расстояние объектива 60 мм.
21. Определить поток излучения, попавшего на приёмник, если зеркальная ОС с контррефлектором приняла поток 35 Вт. Диаметр входного зрачка ОС 18,5 мм, диаметр "слепого пятна" 1,3 мм. Коэффициент пропускания ОС – 65%.
22. Определить смещение изображения в четырёхэлементном квадрантном двухкоординатном анализаторе, если $Ф_1$= 3 Вт, $Ф_2$= 5 Вт, $Ф_3$= 1 Вт, $Ф_4$= 2 Вт.

3. Технология проведения практических занятий

Для студенческой группы на занятии выдается задание, общая формулировка которого приведена в разделе 2 настоящих методических указаний.

Алгоритм проведения практических занятий по дисциплине предполагается следующий:

- после выдачи задания в первые 30 мин. занятия студенты анализируют исходные данные, записывают математические выражения (при необходимости) и составляют структурную схему системы электропривода или ее составляющей;
- один из студентов группы вызывается «к доске» и демонстрирует группе вариант решения задания со своими числовыми данными;
- организуется интерактивное обсуждение результатов с разграничением функциональных обязанностей студентов при выполнении задания по моделированию – анализ исходных данных, проработка схемы построения модели, выбор технологии моделирования, расчет параметров регуляторов и контуров регулирования, возможная оптимизация. В итоге, совместными усилиями формируется и корректируется функциональная схема системы электропривода или ее составляющей;
- в последние 30 мин. занятия каждый студент предъявляет преподавателю вариант математической модели, соответствующей разработанным структурной и функциональной схемам.

4. Примерные вопросы, выносимые на экзамен по дисциплине, по темам практических занятий

1. Прохождение сигналов через оптические среды.
2. Прохождение излучения через оптические системы
3. Параметры элементов оптической системы ОЭП
4. Оптические фильтры
5. Анализаторы изображения
6. Сканирующие системы
7. Модуляция и демодуляция сигналов
8. Параметры, определяющие работу ОЭС

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Смоленске

Методические рекомендации к курсовой работе по дисциплине

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Смоленск – 2021 г.

1. Цели и задачи, объем курсовой работы по дисциплине

Цель курсовой работы по дисциплине «Оптико-электронные приборы и системы» – закрепление соответствующего лекционного материала дисциплины.

Тема курсовой работы «Расчет оптического газоанализатора».

Для достижения поставленной цели при выполнении курсовой работы студентами решаются следующие задачи:

- обоснование и выбор схемы газоанализатора;
- выбор или расчёт источника излучения.
- выбор или расчёт элементов оптической системы.
- выбор приёмника излучения и корректировка его спектральной чувствительности.
- расчёт погрешности прибора.
- описание конструкции первичного измерительного преобразователя, выбор усилителя для предусилителя сигнала.

На выполнение курсовой работы предполагается 0.5 з.е., 18 часов (из числа часов, выделяемых в учебном плане на самостоятельную работу студентов) в 6 семестре программы «Оптотехника».

2. Задание на расчетно-графическую работу по дисциплине

1. Выбор и обоснование структурной и функциональной схем газоанализатора.
2. Выбор или расчёт источника излучения.
3. Выбор или расчёт элементов оптической системы.
4. Выбор приёмника излучения и корректировка его спектральной чувствительности.
5. Расчёт погрешности прибора.
6. Описание конструкции первичного измерительного преобразователя, выбор усилителя для предусилителя сигнала.

3. Указания по выполнению индивидуальных заданий

1.1. Выбор и обоснование структурной и функциональной схем газоанализатора

При выборе структурной и функциональной схем необходимо учесть, какой метод измерений будет реализован (нулевой, дифференциальный и др.), какова схема работы газоанализатора (однолучевая или двухлучевая), будет ли задействована опорная длина волны в спектре поглощения газа и др. Выбор той или иной измерительной схемы газоанализатора определяется в каждом конкретном случае требованиями к прибору в части его метрологических, эксплуатационных и экономических характеристик.

Необходимо проанализировать их работу и соотнести со своим индивидуальным заданием, после чего внести изменения и дополнения в схему. В расчётно-пояснительной записке следует привести обе схемы, кратко описать основные узлы и элементы, а также их функциональное назначение. Необходимо указать достоинства и недостатки выбранной схемы.

Наиболее общая структурная схема оптического газоанализатора приведена на рис. 2.1.

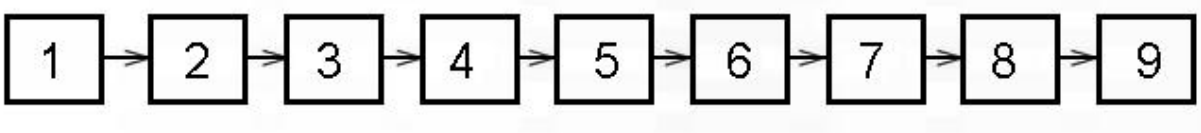

Рисунок 2.1 - Структурная схема газоанализатора: 1 - источник излучения; 2 -передающая оптическая система; 3 - система модуляции; 4 - кюветы с анализируемыми и опорными (или эталонны-

ми) компонентами; 5 - приемная оптическая система; 6 - приемник излучения; 7- предварительный усилитель; 8 - аналого-цифровой преобразователь; 9 - устройство визуализации

Излучение от источника 1 собирается и формируется оптической системой 2, разделяясь при необходимости на два луча, и попадает на модулятор 3. В состав передающей оптической системы могут входить зеркальные и линзовые компоненты, а также узкополосные светофильтры. Модулированное излучение проходит через кюветы 4 и с помощью приемной оптической системы 5 поступает на приемник излучения 6. Сигнал с приемника излучения усиливается предварительным усилителем 7 и попадает на преобразователь 8, откуда после обработки выводится на устройство визуализации 9, в качестве которого может выступать световой индикатор или цифровое табло. В каждом конкретном типе газоанализатора некоторые составляющие структурной схемы могут отсутствовать или заменяться другими.

Функциональная схема является более подробным описанием прибора и включает в себя конкретные компоненты, с помощью которых будет реализована схема.

1.2. Выбор и расчёт источника излучения

Источник излучения целесообразно выбирать с наибольшей долей излучения на рабочей и опорной длинах волн. Для ИК-области спектра такими источниками излучения могут быть штифт Нернста, силитовый излучатель глобар, либо другой тепловой источник [2,6]. В промышленности иногда используют нагретую нихромовую спираль, спектр излучения которой подобен спектру излучения серого тела. Целесообразно рассчитать спектр излучения спирали по формуле Планка:

$$m_e = \frac{\varepsilon\, c_1}{\lambda^5 (\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1)}, \qquad (2.1)$$

где c_1=3,74·10^{-16} Вт·м^2,
c_2=1,44·10^{-2} м·К,
ε – спектральный коэффициент излучения,
T – температура тела.

При этом необходимо выбирать такую температуру, чтобы максимум спектра излучения совпадал с рабочей длиной волны, что можно определить по закону смещения Вина:

$$\mathrm{T} \cdot \lambda_{\text{макс}} = 2898 \text{ мкм} \cdot \text{К}. \qquad (2.2)$$

Если источник излучения не рассчитывается, а выбирается, то необходимо представить его спектр излучения, основные справочные параметры и схему. При этом обязательны ссылки на справочную литературу.

Для некоторых длин волн можно подобрать лазер, излучающий на рабочей длине волны $\lambda_р$. В этом случае можно отказаться от светофильтра в передающей оптической системе или модулятора.

1.3. Выбор и расчёт элементов оптической системы

Оптическая система газонанализатора состоит из передающей и приёмной частей. Передающая часть оптической системы служит для сбора излучения от источника и формирования пучка лучей с требуемыми пространственными параметрами. В состав передающей оптической системы могут входить: зеркальные отражатели, линзовые и зеркально-линзовые конденсоры, светоделительные пластины и светофильтры. При двухлучевой схеме измерений должна быть осуществлена возможность разделения пучка излучения.

Зеркальные отражатели бывают различных видов: сферические, параболические, гиперболические и др. Наиболее распространены сферические и параболические.

Отражатели могут быть металлическими или стеклянными. Материал отражателей должен обладать высоким коэффициентом отражения, что обеспечивается применением эффективных покрытий. Покрытие

должно быть однородным и обладать высокой химической стойкостью. В качестве покрытия используют хром, алюминий, серебро и золото.

Конденсором называют оптическую систему, создающую действительное изображение источника на конечном расстоянии от неё. Если она создаёт изображение источника на бесконечности, то её называют коллиматором. Параметрами линзовых конденсоров являются: фокусное расстояние f', линейное увеличение β, относительное отверстие 1:*K*, угол охвата $2\sigma_A$ и угол сходимости $2\sigma'_A$. Простейший однолинзовый конденсор представлен на рис. 2.2.

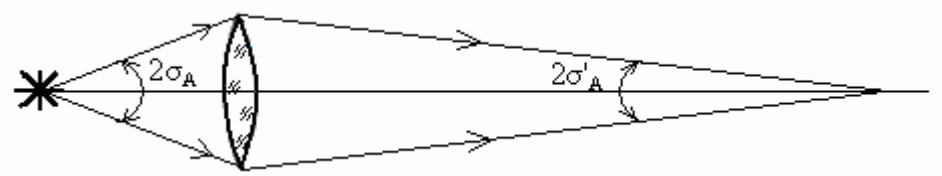

Рисунок 2.2 - Однолинзовый конденсор

Применяются также двухкомпонентные схемы, включающие конденсор и объектив (рис. 2.3).

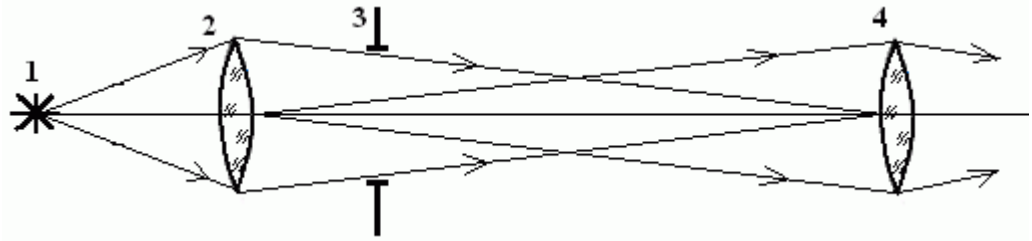

Рисунок 2.3 - Двухлинзовый конденсор

За конденсором 2 помещается полевая диафрагма 3, в плоскости которой можно поместить марку, сетку или другой оптический элемент. Конденсор 2 создаёт изображение источника излучения 1 во входном зрачке объектива 4.

Меньшие потери энергии обеспечиваются применением зеркальных и зеркально-линзовых конденсорных систем. Например, система, состоящая из вогнутого эллипсоидного зеркала, в первом фокусе которого помещён точечный источник света, а во второй – диафрагма, а также линзы с минимальной сферической аберрацией или линзы Френеля. Угол охвата таких систем может превышать 180°.

В качестве систем разделения пучка лучей могут использоваться: полупрозрачные стеклянные плоскопараллельные пластины, призмы с зеркалированными гранями, вращающиеся элементы и др [1].

Для обеспечения требуемого спектрального состава излучения применяются оптические светофильтры. Задачей выбора спектрального фильтра является получение максимально возможного соотношения сигнал/помеха при минимальных потерях полезного сигнала. Основной характеристикой светофильтра является спектральная – зависимость коэффициента пропускания от длины волны излучения, проходящего через фильтр (рис. 2.4). К параметрам фильтров предъявляют следующие требования:

1) высокая контрастность $\tau_{макс}/\tau_{мин}$,
2) большая граничная крутизна,
3) малые потери $\tau \geq 80\%$,
4) возможность получения заданных спектральных границ,
5) стабильность спектральной характеристики при заданных условиях,
6) эксплуатационные и технологические требования.

Спектральные фильтры бывают абсорбционными, интерференционными и поляризационными. В оптических газоанализаторах, в основном, применяются первые два типа. Абсорбционные фильтры, основанные на избирательном поглощении, выбираются по данным ГОСТ 9411 "Стекло оптическое цветное" и рассчитываются по закону Бугера:

$$\tau = (1-\rho)^2 \cdot 10^{-\mu l}, \qquad (2.3)$$

где μ – показатель ослабления материала фильтра,
l – толщина светофильтра,

ρ – коэффициент отражения по Френелю.

Интерференционные светофильтры работают на принципе многолучевой интерференции и обладают более узкой полосой пропускания Интерференционные фильтры могут иметь полосу пропускания от нескольких десятков нанометров до десятых долей нанометра. Они представляет собой две плоскопараллельные пластины диаметром 40…50 мм, между которыми расположены слои диэлектрика. К достоинствам таких фильтров следует отнести их высокое пропускание в рабочей зоне (60…90%) и большое сечение пучка, определяемое поперечными размерами пластины.

В настоящее время большое распространение получили диэлектрические узкополосные интерференционные фильтры, т. е. такие фильтры, в которых отсутствуют металлические полупрозрачные покрытия. Фильтр в этом случае представляет собой устройство - состоящее из нескольких диэлектрических прослоек, заключенных также между диэлектрическими пластинами-подложками. Каждая диэлектрическая прослойка представляет собой двухкомпонентную систему, состоящую из чередующихся непоглощающих слоев диэлектрика, обладающих высоким и низким показателями преломления.

Основными оптическими параметрами интерференционных фильтров являются: длина волны пропускания в максимуме $\lambda_{макс}$, ширина полосы пропускания фильтра δ_λ и относительная ширина пропускания $\delta_\lambda / \lambda_{макс}$.

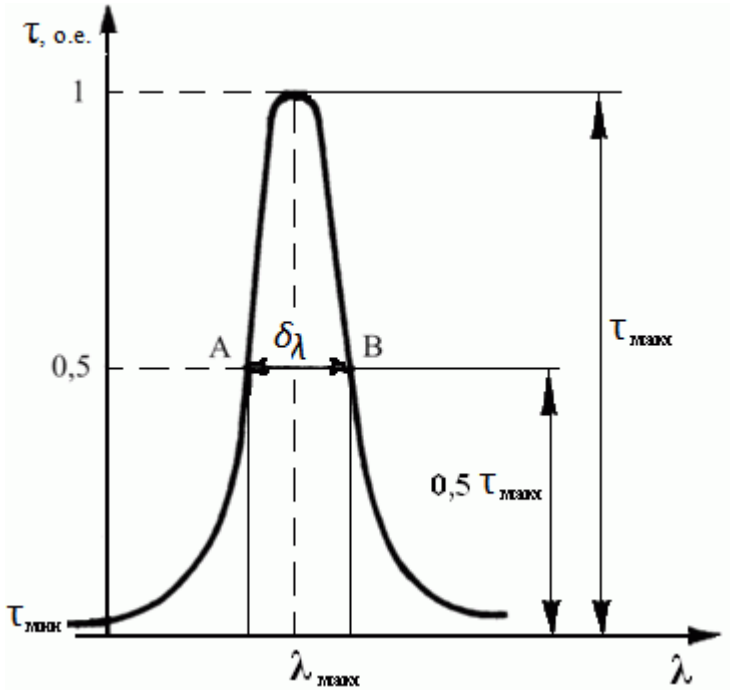

Рисунок 2.4 - Спектральная характеристика пропускания интерференционного светофильтра

Для многолучевых систем с двумя отражающими слоями можно рассчитать по следующей методике [4].

Определяют рабочую длину волны фильтра. Длина волны, соответствующая максимуму пропускания фильтра:

$$\lambda_{макс} = 2d \cdot n \cdot \cos r \,/(m - \frac{\psi}{\pi}), \qquad (2.4)$$

где n – показатель преломления, d – толщина слоя диэлектрика, r – угол падения излучения ($r=0$, если падение нормальное), m – порядок интерференции; ψ – скачок фазы при отражении на границе диэлектрик - покрытие.

В связи с тем, что в большинстве случаев интерференционный фильтр работает при нормальном падении светового потока, можно считать r=0.

За ширину полосы пропускания интерференционного фильтра принимается размер горизонтального отрезка *AB* (рис. 2.4), который получается на половине высоты интерференционного максимума. Эту величину обозначают δ_λ. Согласно геометрическому построению рисунка точка А соответствует длине волны $\lambda_{макс} - \delta_\lambda/2$. В этой точке пропускание $\tau_{отн}$=0,5. Спектральный коэффициент пропускания составит половину от максимального, если

$$F^2 sin\delta/2=1,$$

где *F*– фактор резкости.

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda^2_{макс}}{\pi \cdot d \cdot n \cdot F \cdot \cos r}, \quad (2.5)$$

$$F = \frac{2\sqrt{\rho\tau}}{(1-\rho\tau)}. \quad (2.6)$$

Обратим внимание на то, что рабочая длина волны фильтра может быть в небольших пределах изменена путем поворота фильтра вокруг вертикальной оси. Поясним это обстоятельство. Поворот фильтра означает изменение угла падения пучка на его поверхность.

Путем поворота можно сместить рабочую длину волны только в коротковолновую область спектра. Практически оказывается, что поворот светофильтра на 6° приводит к смещению максимума пропускания приблизительно на 10 нм, поворот на 10° дает смещение длины волны на ~20–22 нм.

Как уже отмечалось, наряду с интерференционными фильтрами, состоящими из металлических и диэлектрических слоев, большое распространение получили фильтры, имеющие только диэлектрические слои, - диэлектрические узкополосные интерференционные фильтры. Эти фильтры обладают значительно более высоким пропусканием, чем металлодиэлектрические фильтры и могут дать более узкую полосу пропускания, приближаясь по этой характеристике к монохроматорам. Одиночный диэлектрический интерференционный фильтр содержит два многослойных зеркала, разделенных одним слоем диэлектрика. Зеркала представляют собой двухкомпонентную систему, состоящую из непоглощающих слоев диэлектриков с высоким и низким показателями преломления. Эти слои чередуются попеременно.

Наиболее качественные характеристики может дать фильтр, содержащий несколько слоев. Диэлектрические зеркала имеют более высокий коэффициент отражения при меньших потерях на поглощение, чем металлодиэлектрические фильтры.

Среди фильтров, работающих на вышеописанном принципе, особое место принадлежит системам, которые обладают селективной спектральной кривой пропускания. К ним относятся и отрезающие интерференционные фильтры, обладающие очень высоким пропусканием на некотором участке спектра и большим отражением в прилегающей области спектра со стороны коротких или длинных волн. Такие системы используются для подавления мешающих порядков спектра дифракционной решетки и добавочных максимумов в самих диэлектрических интерференционных фильтрах [4].

Пример расчёта интерференционного светофильтра.

Длина волны максимума 2,52 мкм.

$$\lambda_{макс} = 2d \cdot n \cdot \cos r \,/(m - \frac{\psi}{\pi}),$$

где *n* – показатель преломления, *d* – толщина слоя диэлектрика, *r* – угол падения излучения (*r=0*, т.к. падение нормальное), *m* – порядок интерференции, ψ – сдвиг фаз (ψ =0,6). В качестве материала зеркал выбрали серебро. Выбрали в качестве диэлектрика MgF_2, *n*=1,37.

Для расчета светофильтра необходимо рассчитать ширину полосы половинного пропускания δ_λ и фактор резкости *F*, при котором она получается.

$$\delta_\lambda = \frac{\lambda^2_{макс}}{\pi \cdot d \cdot n \cdot F \cdot cos\, r},$$

$$F = \frac{2\sqrt{\rho\tau}}{(1-\rho\tau)}.$$

1. $d = \lambda_{макс}(m - \frac{\psi}{\pi})/(2 \cdot n \cdot \cos r) = 2{,}52 \cdot (1 - \frac{0{,}6}{3{,}14})/\,(2 \cdot 1{,}37 \cdot 1)$=0,744(мкм).
2. При $\rho = 0{,}7,\ \tau = 0{,}3\ \ F = 3{,}46.$
3. $\delta_\lambda = \frac{\lambda^2_{макс}}{\pi \cdot d \cdot n \cdot F \cdot cos\, r} = \frac{(2{,}52)^2}{3{,}14 \cdot 0{,}744 \cdot 1{,}37 \cdot 3{,}46 \cdot 1} = 0{,}57$ (мкм).

1.4. Выбор и расчет модулятора

Прием полезного сигнала и измерение его параметров во многих ОЭП затруднен без применения специальных мер, обеспечивающих отделение (фильтрацию) сигнала от помех, усиление его до необходимого уровня, предварительное выделение достаточно характерных признаков сигнала и т. д. К числу таких мер относится модуляция.

Модуляция оптического сигнала – потока излучения – служит обычно для решения двух основных задач: 1) для изменения параметров сигнала в соответствии с какими-либо свойствами или параметрами наблюдаемого объекта, например, дальности до излучателя или его углового положения; 2) для выделения полезного сигнала на фоне шумов и помех.

При активном методе работы ОЭП с помощью модуляции обычно решают обе эти задачи; при пассивном методе модуляция используется прежде всего для решения второй задачи, а в сочетании с анализом изображения, например, при сканировании углового поля прибора и для создания сигнала, связанного с каким-либо параметром наблюдаемого объекта.

В зависимости от вида модулируемого параметра непрерывную гармоническую модуляцию разделяют на амплитудную и угловую. В последнем случае меняется фаза или частота колебания.

Очень распространена в ОЭП амплитудная модуляция – процесс управления амплитудой потока излучения. Часто этот процесс сводится к созданию последовательности импульсов потока, форма которых зависит от геометрических соотношений между площадью сечения пучка и параметрами модулятора. Частоту этих импульсов обычно называют несущей, а отношение периода следования импульсов к их длительности – скважностью.

Характер модуляции сигналов в ОЭП зависит от свойств реальных модуляторов. Большинство оптических модуляторов управляет интенсивностью электромагнитного колебания оптической частоты, что отражается на выборе методов приема и обработки сигнала.

По способу модуляции оптического сигнала различают модуляцию, выполняемую непосредственно в источнике излучения (внутреннюю), и осуществляемую на пути сигнала от источника к приемнику (внешнюю). Кроме того, в некоторых ОЭП сигнал модулируется в электронном тракте. Выбор типа модулятора и способа модуляции зависит от требований к сигналу, поступающему в электронную систему, способу анализа изображений, а также к стабильности и сроку службы самого модулятора.

Для модуляторов, используемых во многих ОЭП, основными требованиями являются: высокое пропускание в рабочем спектральном диапазоне, высокая стабильность при изменении внешних условий (температуры окружающей среды, влажности, давления и т. п.), малые потери потока, максимальная глубина модуляции, широкий диапазон частот модуляции, а в ряде случаев, и возможность плавной или дискретной перестройки частоты. Очень важно, чтобы модулятор потреблял небольшую мощность, был прост и надежен в эксплуатации.

Можно указать на некоторые особенности модуляции, осуществляемой непосредственно в источнике излучения. Питая источник излучения (лампу, светодиод, лазер) переменным током, можно изменять амплитуду потока излучения во времени. Очевидно, что для получения больших частот модуляции необходимо использовать малоинерционный источник. Поэтому на практике, как правило, мощные некогерентные источники не находят применения вследствие большой инерционности сравнительно большого тела накала либо большой инерционности блока питания. Глубина модуляции для них невелика, особенно с учетом ее уменьшения по мере роста частоты модуляции.

Широко используются модуляторы, изменяющие параметры потока на пути от источника к приемнику. К их числу относятся хорошо известные механические модуляторы, основанные на периодическом прерывании потока растром или диафрагмой определенной формы. Такими растрами или диафрагмами являются диски или цилиндры с прорезями, заслонки, помещаемые на валы электро- или пневмодвигателей, на подвижные контакты реле и т. д. При их использовании получают частоты модуляции порядка сотен килогерц; это иногда сопряжено с трудностями, связанными, например, с необходимостью иметь двигатель с очень большой частотой вращения и высококачественную оптическую систему, формирующую пучок малого сечения в плоскости растра модулятора. Кроме того, трудно обеспечить стабильность высоких частот модуляции. Другими недостатками механических модуляторов являются сравнительно небольшой срок службы двигателей, реле и прочих электромеханических их элементов, значительные габаритные размеры и масса.

Несмотря на это, такие модуляторы получили широкое распространение благодаря своим достоинствам: конструктивной простоте, отсутствию искажений оптического спектра, возможности изменения или регулировки ряда параметров (например, изменением формы и размеров прозрачных и непрозрачных участков можно менять вид модуляции и частоту модулируемых импульсов).

Растровые модуляторы, располагаемые в плоскости изображений приемной оптической системы, часто одновременно выполняют функции пространственного фильтра и анализатора изображений, а это сказывается на выборе их конструктивных параметров, в первую очередь, рисунка растра.

Гораздо более высокие частоты модуляции можно получить с помощью модуляторов, основанных на электрооптических эффектах Керра и Поккельса, магнитооптическом эффекте Фарадея, акустооптическом эффекте и других физических явлениях [5, 8].

Для модуляции потока излучения лазера используются электро-, магнито- и акустооптические модуляторы.

Действие электрооптических модуляторов основано на изменении показателя преломления вещества или изменении поворота плоскости поляризации при приложении электрического поля (эффекты: Поккельса – линейный и Керра – квадратичный). Его физический смысл заключается в том, что электрическое поле поляризует электронную подсистему в веществе (кристалл, жидкость), в результате чего изменяются параметры осцилляторов, переизлучающих свет при падении на вещество электромагнитной волны, и, следовательно, изменяется скорость света в веществе.

Различают продольный и поперечный эффекты Поккельса. В случае продольного эффекта Поккельса напряжение прикладывается вдоль оптической оси кристалла. В случае поперечного эффекта – поперек.

Пример.

На рис. 2.5 представлена типичная конструкция модулятора, работающего на продольном эффекте Поккельса.

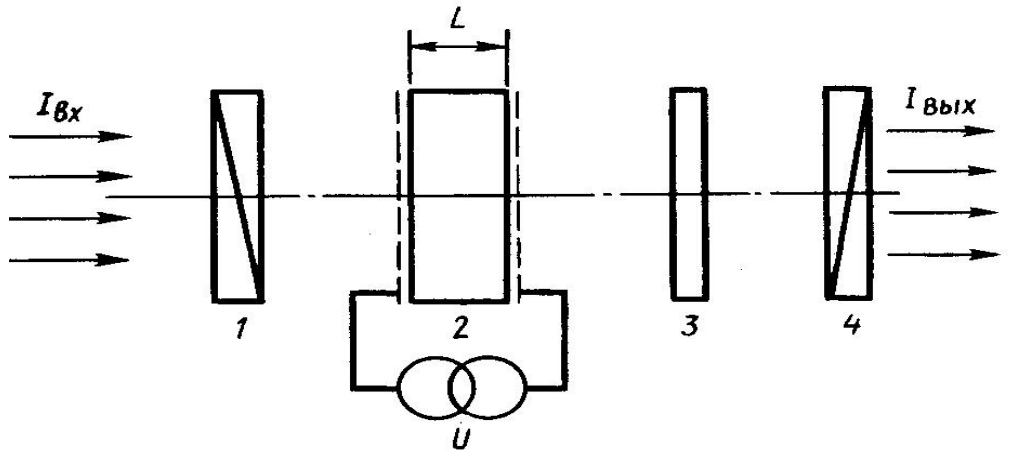

Рисунок 2.5 - Конструкция модулятора:

1 – входной поляризатор, 2 – электрооптический кристалл с полупрозрачными электродами, 3 – четвертьволновая пластинка, 4 – выходной поляризатор

Напряжение, при котором угол поворота плоскости поляризации равен 90°, определяется следующим образом:

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{2\, n_0^3\, r_{63}}, \qquad (2.7)$$

где n_o – показатель преломления кристалла для обыкновенной волны света; r_{63} – электрооптическая константа; λ – длина волны излучения.

Однако использование модуляторов на основе продольного эффекта Поккельса вызывает определенные трудности, так как необходимо обеспечить пропускание электродами модулятора излучения лазера.

В видимом диапазоне излучения это сделать достаточно трудно. В связи с этим гораздо удобнее и практичнее использовать поперечный эффект Поккельса (рис 2.6). Разность фаз между ортогонально поляризованными кристаллом компонентами света (обыкновенной и необыкновенной волнами) на выходе кристалла равна π при поданном на электроды полуволновом напряжении. Полуволновое напряжение для поперечного эффекта Поккельса определяется следующим образом:

$$U_{\frac{\lambda}{2}} = \frac{\lambda d}{2 r_{63} n_0^3 l}, \qquad (2.8)$$

где *l*- размер кристалла в направлении главной оптической оси *z*, *d* – ширина кристалла.

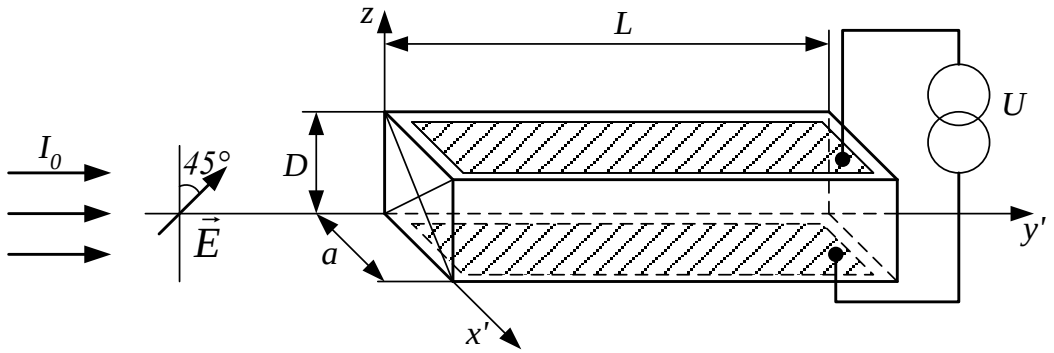

Рисунок 2.6 - Схема электрооптического модулятора с поперечным полем

Как видно из сравнения (2.7) и (2.8), напряжение для поперечного эффекта Поккельса меньше, чем для продольного.

В качестве материала модулятора выбираются кристаллы KDP, DKDP, ниобата лития и др., параметры которых удовлетворяют длине волны излучения. В рамках курсовой работы необходимо рассчитать электрооптический модулятор, чтобы полуволновое напряжение не превышало 1 кВ.

Квадратичный электрооптический эффект Керра выражен сравнительно слабо у большинства материалов, используемых для изготовления модуляторов. К тому же нелинейная зависимость от электрического поля вводит нежелательное искажение в модулированный сигнал. Таким образом, этот факт ограничивает использование эффекта Керра во многих случаях применения.

С техническими и спектральными характеристиками электрооптических модуляторов можно ознакомиться в справочной литературе [5,8].

Акустические волны также можно использовать для управления параметрами лазерного излучения. Акустооптический эффект заключается в изменении показателя преломления, которое вызывается механическими напряжениями (фотоупругий эффект), возникающими при прохождении упругих акустических волн по материалу. В результате этого имеет место периодическое изменение показателя преломления. Следует отметить два основных типа акустооптических модуляторов: конфигурации Брэгга и Рамана–Ната, отличающиеся друг от друга в основном длиной взаимодействия между оптическими и акустическими волнами.

1.5. Выбор материала кювет

Для обеспечения максимальной чувствительности используют многоходовую кювету с большой длиной оптического пути. Выбор материала кюветы обусловлен несколькими факторами, а именно:

- постоянством коэффициента пропускания для опорной и рабочей длины волны;
- износостойкостью материала;
- стоимостью материала и метода его нанесения.

В ИК области спектра хорошей прозрачностью обладают следующие материалы: NaCl, KCl, AgCl, CuCl, $PbCl_2$, KBr, CsBr, CsI, TlBr, MgO и др [6].

В расчётно-пояснительной записке следует привести график зависимости τ(λ) для выбранного материала.

1.6. Выбор приемника излучения

Приемник излучения выбирается с учётом его чувствительности на заданных длинах волн, габаритных размеров, срока службы и стоимости. В данной курсовой работе в качестве приёмников излучения выбираются фоторезисторы, фотодиоды, болометры или пироэлектрические приёмники излучения.

Фоторезисторы основаны на изменении проводимости при освещении. Если внутренний фотоэффект возникает в системах с *p-n* – переходом, то возникает фото-ЭДС. На этом основано действие фотодиодов.

Действие болометров основано на изменении электрического сопротивления полупроводника или металла при изменении температуры, вызванного воздействием падающего излучения.

Пироэлектрический приемник является пассивным приемником излучения. Пироэлектрические приемники способны работать в широком спектральном диапазоне излучения: от ультрафиолетового до волн длиной 0,3 мм. Наиболее часто в датчиках используется оптический диапазон 2-16 мкм [3].

В расчётно-пояснительной записке должен быть приведен спектр чувствительности приёмника излучения, его параметры и рисунок, содержащий габаритные размеры.

1.7. Выбор операционного усилителя для предварительного усилителя сигнала

Предварительные усилители должны удовлетворять следующим требованиям:
-обеспечить требуемый коэффициент усиления,
-обеспечить согласование по шумам,
-сформировать полосу усиления,

Предварительные усилители для фотоэлектрических приемников создаются на биполярных и полевых транзисторах, а также на микросхемах, например, операционных усилителях. Основным вопросом, который решается при создании предусилителей, является согласование его с приемником по сигналу и по шумам. При этом согласование с приемником обеспечивается различным образом при построении предварительного усилителя по схеме усилителя напряжения, либо усилителя тока (преобразователя тока в напряжение).

В любом случае целесообразно строить предварительный усилитель оптимизированный по сопротивлению генератора – схемы включения приёмника излучения. Рекомендуется при построении предварительного усилителя применить операционный усилитель, выбрав его по минимальному коэффициенту шума при работе со схемой включения приёмника излучения.

Для оптимальной схемы с фоторезистором сопротивление генератора равно половине темнового сопротивления фоторезистора; для фотодиодов и приборов с внешней фотоэмиссией оно равно сопротивлению нагрузочного резистора.

На рис. 2.7 приведена зависимость коэффициента шума от сопротивления генератора для некоторых операционных усилителей.

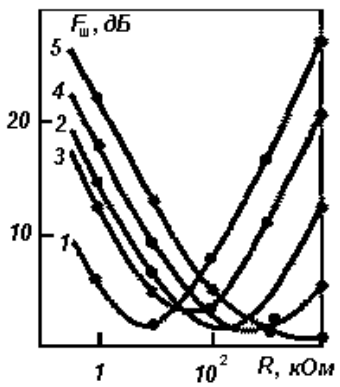

Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента шума от сопротивления источника сигнала на частоте 1 кГц для операционных усилителей: 1- 153УД1, 2 – 140УД7, 3 – 153УД2, 4 – 140УД6, 5 – 140УД8 и 544УД1

1.8. Расчет погрешности газоанализатора

Погрешность результата можно оценить следующим образом. Примем электрический сигнал, образующийся на выходе приёмника излучения, за функцию измерительного прибора (газоанализатора) F.

$$F = \Phi_{ИИ,\lambda} \cdot \tau_г \cdot S_{ПИ}, \quad (2.9)$$

где $\Phi_{ИИ,\lambda}$ –поток источника излучения на данной длине волны, $\tau_г$ – коэффициент пропускания газоанализатора на данной длине волны, $S_{ПИ}$ –чувствительность приёмника излучения.

$\Phi_{ИИ}$ является произведением следующих величин:

$$\Phi_{ИИ,\lambda} = r_\lambda \cdot A_{ИИ}, \quad (2.10)$$

где r_λ – спектральная плотность излучения источника, $A_{ИИ}$ – площадь поверхности источника излучения.

Выразим $\tau_г$ через параметры оптической системы газоанализатора:

$$\tau_г = \rho_{кз} \cdot \tau_ф \cdot \tau_{сд} \cdot \tau_о \cdot \tau_в \cdot \tau_м \cdot \rho_з \cdot \rho_{сд}, \quad (2.11)$$

где $\rho_{кз}$ – коэффициент отражения зеркал конденсорной системы, $\tau_ф$ – коэффициент пропускания светофильтра, $\tau_{сд}$ – коэффициент пропускания светоделителя, $\tau_о$ – коэффициент пропуская окон кюветы, $\tau_в$ – коэффициент пропускания исследуемого вещества, $\tau_м$ – коэффициент пропускания модулятора, $\rho_з$ – коэффициент отражения поворотного зеркала, $\rho_{сд}$ – коэффициент отражения светоделителя.

Запишем (2.9) с учётом (2.10) и (2.11):

$$F = r_\lambda \cdot A_{ПИ} \cdot \rho_{кз} \cdot \tau_ф \cdot \tau_{сд} \cdot \tau_о \cdot \tau_в \cdot \tau_м \cdot \rho_з \cdot \rho_{сд} \cdot S_{ПИ}. \quad (2.12)$$

Если считать, что величины r_λ, $A_{ИИ}$, $\rho_{кз}$, $\tau_о$, $\tau_в$, $\tau_м$, $\rho_з$, $S_{ПИ}$ известны точно, то можно обозначить произведение этих величин как C, где C = const.

Формула (2.12) примет вид:

$$F = C \cdot \tau_ф \cdot \tau_{сд} \cdot \rho_{сд}. \quad (2.13)$$

Относительная погрешность этого выражения определится как

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial \tau_ф}\Delta\tau_ф\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \tau_{сд}}\Delta\tau_{сд}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \rho_{сд}}\Delta\rho_{сд}\right)^2}}{C \cdot \tau_ф \cdot \tau_{сд} \cdot \rho_{сд}}. \quad (2.14)$$

Вычислив частные производные и упростив выражение (2.14), получим:

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\sqrt{\tau_{сд}^2 \Delta\tau_ф^2 + 2\tau_ф^2 \Delta\tau_{сд}^2}}{\tau_ф \cdot \tau_{сд}}. \quad (2.15)$$

В расчётно-пояснительной записке также необходимо привести основные источники погрешности и мероприятия по их минимизации.

3. Примеры вопросов к защите курсовой работы

1. Обосновать выбор структурной схемы газоанализатора.
2. Пояснить работу выбранной схемы.
3. Обосновать выбор и расчет излучателя.
4. Обосновать выбор и расчет приемника излучения.
5. Обосновать расчет схемы предварительного усилителя.
6. Оценить точность газоанализатора.