

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра оптоинформатики

535(07)  
Ш957

А.А. Шульгинов, К.Н. Белов

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИКА. ЗАДАНИЯ ДЛЯ МАГИСТРАНТОВ**

Учебное пособие

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2022

УДК 535.8(076.5)  
Ш957

*Одобрено  
учебно-методической комиссией  
Института естественных и точных наук*

*Рецензенты:  
д.ф.-м.н. А.Е. Майер, к.т.н. М.Г. Иванов*

**Шульгинов, А.А.**  
Ш957      Техническая оптика. Задания для магистрантов: учебное пособие / А.А. Шульгинов, К.Н. Белов; – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – 58 с.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся в магистратуре, по направлению подготовки 03.04.01 – «Прикладные математика и физика». Оно содержит план лекций и практических занятий. Для каждого практического занятия имеется список основных понятий, которые студент должен усвоить перед выполнением задания и список вопросов по данной теме, а также задачи, которые планируется рассмотреть на занятии и задания для самостоятельного решения.

УДК 535.8(076.5)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>4</b>
<b>ТЕМА 1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....</b>	<b>5</b>
<b>ТЕМА 2. ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ .....</b>	<b>7</b>
<b>ТЕМА 3. МАТРИЧНЫЕ МЕТОД РАСЧЁТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>9</b>
<b>ТЕМА 4. РЕАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ .....</b>	<b>11</b>
<b>ТЕМА 5. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>13</b>
<b>ТЕМА 6. ЛУПЫ И МИКРОСКОПЫ .....</b>	<b>15</b>
<b>ТЕМА 7. ИСТОЧНИКИ И ПРИЁМНИКИ СВЕТА .....</b>	<b>17</b>
<b>ТЕМА 8. ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИИ .....</b>	<b>20</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>21</b>
<b>Приложение 1. Оптические приборы .....</b>	<b>21</b>
<b>Приложение 2. Приёмники оптического излучения .....</b>	<b>29</b>
<b>Приложение 3. Источники света.....</b>	<b>37</b>
<b>Приложение 4. Колориметрия.....</b>	<b>49</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ СПИСОК .....</b>	<b>57</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Техническая оптика – это современный раздел оптики, целью которой является разработка теории, конструирование и практическое применение оптических приборов. Сегодня трудно себе представить, что ещё примерно 100 лет назад эта наука была столь малоразвита, что расчёт и конструирование оптических приборов производились подбором оптических элементов на удачу. В России в 1914 года было создано «Российское Акционерное Общество Оптического и Механического Производства» и началась история первой российской компании, производящей оптико-механические и оптико-электронные приборы. Первым директором завода был Александр Львович Гершун [1]. Как в последствии охарактеризовал его академик Алексей Николаевич Крылов, «это единственный человек в России, который в то время мог помочь оптическому делу встать на ноги». На первом этапе своей деятельности завод выпускал приборы для проверки прицельных линий пушек, прицелы, стереотрубы, перископы для артиллерии. В последствии было создано ещё несколько предприятий, производящих оптику, которые в 1965 году вошли в состав ЛОМО (Ленинградское оптико-механическое объединение) [2]. В 1918 году был создан Государственный оптический институт, который носит имя С.И. Вавилова. В кратчайшие сроки группа ученых ГОИ под руководством академика Д.С. Рождественского создала физико-химические основы сложного процесса оптического стекловарения. Это позволило СССР уже к началу 1927 года полностью освободиться от закупок оптического стекла за рубежом [3]. В 1935 году в Подмосковном городе Лыткарино был основан завод оптического стекла [4]. В 1939 году уже была выпущена первая партия прожекторных зеркал диаметром 1,5 м для зенитных установок противовоздушной обороны. Наиболее известен этот завод созданием 6-метрового зеркала для Большого Телескопа Азимутального (БТА), установленного в Специальной астрофизической обсерватории около посёлка Нижний Архыз в Карачаево-Черкесии. Производство этого зеркала заняло 10 лет с 1964 по 1974 год.

Данное учебное пособие предназначено для студентов магистратуры, обучающихся по специальности «прикладные математика и физика» специализации «волоконная и лазерная оптика» в качестве ознакомительного курса с основами технической оптики. В настоящее время имеется достаточное количество книг, содержащих подробную информацию об оптических приборах и методах проектирования [4–10]. Однако, возникла необходимость написать это пособие, которое предназначено для решения задач. Оно содержит план лекций и практических занятий. Для каждого практического занятия имеется список основных понятий, которые студент должен усвоить перед выполнением задания и список вопросов по данной теме, а также примеры решения задач и задания для самостоятельного решения. Для успешного усвоения этого курса студент сначала должен изучить геометрическую и волновую оптику в рамках курса общей физики [11, 12].

# ТЕМА 1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

## ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Связь технической оптики и физической оптики.
2. Законы геометрической оптики.
3. Принцип Ферма. Оптический путь луча.
4. Оптические материалы и их характеристики: показатель преломления, число Аббе.
5. Функциональные оптические элементы.
6. Центрированные оптические системы.
7. Правило знаков (ГОСТ 7427-76).
8. Основные параметры толстой линзы.
9. Нулевой луч оптической системы.
10. Главные точки и главные плоскости линзы.
11. Узловые точки линзы.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** луч, геометрическая оптика, оптический путь, оптическая среда, кардинальные точки и плоскости толстой линзы, фокусное расстояние и оптическая сила толстой линзы.

### Контрольные вопросы

1. Сформулировать основные законы геометрической оптики.
2. Как определить оптический путь луча в оптически неоднородной среде?
3. Сформулировать правило знаков в соответствии с ГОСТ 7427-76.
4. Перечислите кардинальные точки толстой линзы. Показать их на рисунке на примере двояковыпуклой и двояковогнутой линзы.
5. Что такое эффективное фокусное расстояние толстой линзы?
6. Что такое нулевой луч?

## Задачи для практического занятия

**Задача 1.** При каком значении угла падения  $\theta_1$  луч, отражённый от поверхности воды, будет перпендикулярен преломленному лучу?

**Задача 2.** Определить преломляющий угол у стеклянной призмы, если угол наименьшего отклонения равен преломляющему углу.

**Задача 3.** Найти положение главных и фокальных плоскостей стеклянный линз (в воздухе) следующих форм:

- а) Обе поверхности линзы выпуклые ( $R_1 = 13$  см). Толщина линзы 3,5 см.
- б) Передняя поверхность линзы вогнутая ( $R_1 = 6,5$  см), задняя выпуклая ( $R_2 = 13$  см). Толщина линзы 3,5 см.

### ЗАДАНИЕ 1

1. Доказать, что гомоцентрический пучок, отражённый от плоского зеркала, останется гомоцентрическим с центром, который лежит симметрично относительно плоскости зеркала.

2. Два плоских зеркала образуют угол  $\beta$ . При каком угле  $\beta$  луч, отражённый от этих зеркал, изменит направление на  $90^\circ$ ?

3. Определить относительный показатель преломления двух оптических сред, если  $\sin \theta_{\text{пр}}/\sin \theta_1 = \eta = 1,33$ , где  $\theta_{\text{пр}}$  – предельный угол падения луча, а  $\theta_1$  – угол падения, при котором преломленный луч перпендикулярен отражённому (луч идёт из оптически более плотной среды).

4. Найти пределы, в которых может меняться угол отклонения луча при прохождении стеклянной призмы с преломляющим углом  $\theta = 30^\circ$ .

5. Найти и показать на рисунке положение главных и фокальных плоскостей стеклянный линз (в воздухе) следующих форм:

- а) Передняя поверхность линзы выпуклая ( $R = 13$  см). Толщина линзы 3,5 см.
- б) Передняя поверхность линзы выпуклая ( $R_1 = 6,5$  см), задняя вогнутая ( $R_2 = 13$  см). Толщина линзы 3,5 см.
- в) Линза имеет форму шара с радиусом 3,5 см.

## ТЕМА 2. ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Определение гомоцентричности пучка.
2. Построение изображения предмета, получаемое положительной и отрицательной линзой.
3. Определение понятий: линейное, угловое и продольное увеличение.
4. Вывод формулы Ньютона и Гаусса для линзы.
5. Вывод формулы для линейного увеличения.
6. Вывод формулы для углового увеличения.
7. Вывод формулы для продольного увеличения.
8. Инвариант Лагранжа-Гельмгольца.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** Параксиальная или гауссова оптика, гомоцентрический пучок, пространство предметов, пространство оптических изображений, действительное и мнимое оптические изображения, центрированная оптическая система; линейное, продольное и угловое увеличение оптической системы, приведённое фокусное расстояние линзы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое оптическое изображение предмета?
  2. Что называют действительными и мнимыми оптическими изображениями?
  3. Какое оптическое изображение называется стигматическим?
  4. Дайте определение центрированной оптической системы.
  5. Написать формулы для линейного, углового и продольного увеличения линзы.
  6. Какова связь между линейным, угловым и продольным увеличением?
  7. Что такое переднее и заднее фокусное расстояние линзы?
  8. Как связана формула Гаусса с формулой тонкой линзы?
  9. Какой смысл имеет знак линейного увеличения?
  10. Что такое инвариант Лагранжа-Гельмгольца? Какой смысл он имеет?
- Сформулируйте теорему Лагранжа-Гельмгольца.

## Задачи для практического занятия

**Задача 1.** Найти построением ход луча 2 за собирающей и рассеивающей тонкими линзами, если известны положение линзы, ее оптической оси и ход луча 1. Среды по обе стороны от линзы одинаковы.

**Задача 2.** Линза с фокусным расстоянием 15 см даёт резкое изображение предмета при двух положениях, расстояние между которыми 50 см. Найти расстояние от предмета до экрана.

**Задача 3.** На каком расстоянии от собирающей линзы надо поместить предмет, чтобы расстояние между предметом и его действительным изображением было минимальным. Фокусное расстояние линзы равно  $F$ .

**Задача 4.** Точечный источник света находится на главной оптической оси собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F = 15$  см. Диаметр линзы  $D = 6$  см. На каком расстоянии от линзы должен быть расположен источник света, чтобы лучи, прошедшие через линзу, образовали на экране световое пятно диаметром  $d = 4$  см? расстояние от линзы до экрана  $L = 100$  см.

## ЗАДАНИЕ 2

1. Между предметом и экраном поместили тонкую собирающую линзу. Перемещением линзы нашли два положения, при которых на экране образуется чёткое изображения предмета. Найти поперечный размер предмета, если при одном положении линзы размер изображения  $h_1 = 2$  мм, а при другом  $h_2 = 4,5$  мм.

2. Построить изображение светящейся сферы радиусом  $R = 0,1f$ , находящейся на расстоянии:

2.1.  $s = 2f$ ,

2.2.  $s = 1,2f$ ,

2.3.  $s = 0,5f$

от передней главной плоскости **положительной** линзы. Охарактеризовать его. Определить линейное, угловое и продольное увеличение в этих случаях.

3. Построить изображение той же сферы, находящейся на расстоянии:

3.1.  $s = 2f$ ,

3.2.  $s = 1,2f$ ,

3.3.  $s = 0,5f$

от передней главной плоскости **отрицательной** линзы. Охарактеризовать его. Определить линейное, угловое и продольное увеличение в этих случаях.



## ТЕМА 3. МАТРИЧНЫЕ МЕТОД РАСЧЁТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Понятие о лучевом векторе: высота луча и направляющий косинус.
2. Матрица Гаусса и её свойства.
3. Матрица переноса луча.
4. Матрица преломления луча на плоской поверхности.
5. Матрица преобразования лучевого вектора на сферической поверхности.
6. Оптическая сила сферической поверхности.
7. Определение фокусного расстояния тонкой линзы матричным методом.
8. Определение фокусного расстояния толстой линзы.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** лучевой вектор, высота луча, направляющий косинус, матрица Гаусса, трансляционная матрица, матрица сферической поверхности, оптическая сила линзы.

### Контрольные вопросы

1. Что такое лучевой вектор?
2. Для каких лучей может быть применён матричный метод?
3. Какой смысл имеет матрица Гаусса?
4. Что такое оптическая сила сферической поверхности?
5. Записать трансляционную матрицу и матрицу сферической поверхности.
6. Как изменяется лучевой вектор при преломлении луча на плоской поверхности?

### Задачи для практического занятия

**Задача 1.** Оба конца стеклянного цилиндрического стержня длиной 2,8 имеют форму выпуклой сферической поверхности радиусом 2,4 см. Предмет в виде стрелки длиной 2 см помещён на оси стержня в воздухе на расстоянии 8 см от левого конца стержня. Требуется найти положение и размер изображения.

**Задача 2.** Положительная линза с фокусным расстоянием  $f_1 = 8$  см установлена на расстоянии 6 см слева от отрицательной линзы с фокусным расстоянием

$f_1 = -12$  см. Слева от положительной линзы на расстоянии 24 см от неё помещён предмет высотой 3 см на оси системы. Определить положение изображения и его размер.

**Задача 3.** Стеклянная линза ( $n_{ст} = 1,5$ ) толщиной 3 см вдоль оси имеет выпуклую входную поверхность с радиусом кривизны 5 см и вогнутую выходную поверхность с радиусом кривизны 2 см. Первая поверхность расположена слева и граничит с воздухом, а вторая – справа от неё и граничит с жидкостью, показатель преломления которой  $n = 1,4$ . Найти положение фокусов, главных и узловых точек, а также вычислить фокусные расстояния системы.

### ЗАДАНИЕ 3

1. Луч падает на стекло с показателем преломления  $n_1$  и толщиной  $d_1$  под небольшим углом  $\alpha$ . К нему приставлено другое стекло с показателем преломления  $n_2$  и толщиной  $d_2$ . Составить матрицу преобразования луча при прохождении его через пластину. Определить вертикальное смещение луча матричным методом.

2. Луч падает под небольшим углом  $\alpha$  на тонкую линзу с показателем преломления  $n$ , радиусы кривизны  $R_1$  и  $R_2$ . Составить матрицу преобразования луча. На какой угол  $\Delta\alpha$  отклонится луч?

3. Линза имеет следующие характеристики:  $n$  – показатель преломления,  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны,  $d$  – толщина линзы. С помощью матричного метода определить её параметры:

- Длину переднего фокального отрезка  $s_F$ ;
- Расстояние от первой главной точки до вершины  $h_1$ ;
- Фокусное расстояние  $f$ .

## ТЕМА 4. РЕАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Отличия реальной оптической системы от идеальной.
2. Диафрагмы: апертурная, виньетирующая и полевая.
3. Относительное отверстие и светосила оптической системы.
4. Виды aberrаций: хроматическая и монохроматическая.
5. Хроматизм положения.
6. Хроматизм увеличения.
7. Сферическая aberrация.
8. Кома.
9. Дисторсия подушкообразная и бочкообразная.
10. Кривизна изображения.
11. Астигматизм.
12. Причины появления aberrаций и методы их устранения.
13. Примеры aberrаций изображений.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** aberrация, сферическая aberrация, кома, искривление поверхности изображения, астигматизм, дисторсия, хроматическая aberrация, ахроматизация, число Аббе.

### Контрольные вопросы

1. Чем отличается реальная оптическая система от идеальной?
2. Перечислить виды aberrаций оптической системы и охарактеризовать их.
3. Какова причина возникновения aberrаций?
4. Какие есть главные факторы, влияющие на появление aberrаций?
5. Какие существуют методы уменьшения aberrаций?

6. Можно ли полностью устранить сферическую или хроматическую aberrации? Почему?
7. Как можно частично ахроматизовать оптическую систему?
8. Что характеризует число Аббе?

### Задачи для практического занятия

**Задача 1.** Коэффициент преломления стекла для крайних красных лучей спектра равен  $n_1 = 1,510$ , а для крайних фиолетовых  $n_2 = 1,531$ . Определить расстояние между фокусами для красных и фиолетовых лучей двояковыпуклой тонкой линзы с радиусами преломляющих поверхностей по 15 см.

**Задача 2.** Определить условие ахроматизации сложной линзы, составленной из двух склеенных линз, если их фокусные расстояния равны  $f_1$  и  $f_2$ , а числа Аббе –  $v_1$  и  $v_2$ .

### ЗАДАНИЕ 4

1. Тонкая линза сделана из стекла, имеющее число Аббе  $v_e$  и фокусное расстояние  $f_D$ . Определить размытие фокуса  $\Delta f_{FC}$  вследствие хроматической aberrации положения.

2. Источник света находится на расстоянии  $-s$  от тонкой положительной линзы с параметрами, указанными в предыдущей задаче. Определить размытие изображения вследствие хроматической aberrации положения. Нарисовать ход лучей.

3. Нарисовать ход лучей при возникновении сферической aberrации, хроматической aberrации увеличения, комы.

4. Плосковыпуклая линза ( $n = 1,5$ ,  $D = 2$  см,  $R = 5$  см) повернута плоской поверхностью к нормально падающему на неё световому потоку. Определить продольное увеличение фокуса линзы за счёт сферической aberrации. Как изменится эта величина, если эту линзу развернуть сферической поверхностью к потоку?

5. Рассчитать ахроматический объектив с фокусным расстоянием  $f = 50$  см, склеенный из двух линз. Передняя линза изготовлена из крона К 1 ( $v_1 = 65,1$ ,  $n_D = 1,4982$ ), а задняя - из флинта Ф 8 ( $v_2 = 65,1$ ,  $n_D = 1,4982$ ). Задняя линза – выпукло-вогнутая, обращена выпуклой поверхностью наружу, радиус кривизны этой поверхности равен 100 см.

## ТЕМА 5. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Оптические системы, их классификация: проектор, микроскоп, фотоаппарат, телескоп.
2. Пространство предметов и пространство изображений. Близкий и удалённый предмет. Близкое и удалённое изображение.
3. Ход лучей в телескопической системе. Входной и выходной зрачок.
4. Характеристики телескопических систем: видимое увеличение, поле зрения, диаметр входного зрачка, разрешающая способность, полезное увеличение.
5. Типы телескопов: рефракторы и рефлекторы.
6. Телескоп Кеплера и Галилея. Их достоинства и недостатки.
7. Современные телескопы.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** телескопические системы, объектив и окуляр телескопа, видимое увеличение, поле зрения, диаметр входного зрачка, разрешающая способность, полезное увеличение.

### Контрольные вопросы

1. Какая оптическая система называется телескопической?
2. Какие оптические элементы используются в качестве объектива телескопа? Перечислите их достоинства и недостатки?
3. Какие оптические элементы используются в качестве окуляра телескопа?
4. Какой формы должно быть вогнутое зеркало, чтобы оно сводило параллельный пучок света в фокус, включая непараксиальные лучи?

## Задачи для практического занятия

**Задача 1.** Фокусное расстояние объектива одного из рефракторов в Пулковке равно 14,1 м. Каково увеличение этого рефрактора при пользовании окуляром с фокусным расстоянием 2,5 см?

**Задача 2.** Галилеева труба 10-кратного увеличения при установке на бесконечность имеет длину 45 см. Найти:

- а) фокусные расстояния объектива и окуляра трубы;
- б) на какое расстояние надо передвинуть окуляр трубы, чтобы ясно видеть предметы на расстоянии 50 м.

**Задача 3.** Найти увеличение зрительной трубы кеплеровского типа, установленной на бесконечность, если  $D$  – диаметр оправы её объектива, а  $d$  – диаметр изображения этой оправы, образуемого окуляром трубы.

## ЗАДАНИЕ 5

1. Чему равна оптическая сила астрономического телескопа – рефлектора, если радиус кривизны его зеркала составляет 4,8 м, а фокусное расстояние окуляра равно 2,6 см?

2. 50-кратный астрономический телескоп настроен для глаза, аккомодированного на бесконечность. Расстояние между объективом и окуляром равно 84 см. Чему равно фокусное расстояние каждой линзы?

3. Какой минимальный диаметр объектива телескопа должен быть, чтобы увидеть фотосферу звезды Бетельгейзе ( $\alpha$  Ориона). Её максимальный угловой диаметр, видимый с Земли 0,055".

4. Расстояние между палочками сетчатки глаза составляет 5 мкм, а фокусное расстояние нормального глаза 17,2 мм. Определить угловое разрешение глаза. Какое минимальное расстояние между полосами глаз способен различать на расстоянии наилучшего зрения (25 см)?

5. Фокусное расстояние объектива телескопа Кеплера 700 мм, апертура объектива 76 мм, а фокусное расстояние окуляра – 9,21 мм. Определить видимое увеличение телескопа  $\Gamma_T$ , разрешающую способность объектива  $\epsilon_{об}$  и полезное увеличение  $\Gamma_T^*$ . Возможно ли увидеть отдельные компоненты двойной звезды Кастор ( $\alpha$  Близнецов), если угловое расстояние между ними составляет 4"?

## ТЕМА 6. ЛУПЫ И МИКРОСКОПЫ

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Ход лучей в микроскопе и лупе.
2. Видимое увеличение микроскопа и лупы.
3. Числовая апертура. Иммерсионные микроскопы.
4. Угловое разрешение.
5. Диаметр выходного зрачка микроскопа.
6. Типы микроскопов: биологические, люминесцентные, УФ, ИК, поляризационные.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** лупа, кратность увеличения лупы, расстояние нормального зрения, разрешающая способность глаза, микроскоп, числовая апертура микроскопа, видимое увеличение, угловое разрешение микроскопа.

### Контрольные вопросы

1. Что такое расстояние нормального зрения и чему оно равно?
2. Чему равна разрешающая способность глаза?
3. Как связаны увеличение оптического прибора с угловыми размерами предмета?
4. Какое максимальное видимое увеличение может дать лупа? От чего оно зависит?
5. Какие оптические элементы входят в состав микроскопа?
6. Какое максимальное увеличение может дать микроскоп? Как его можно увеличить? Чем оно ограничено?
7. Что такое числовая апертура микроскопа? Какой смысл она имеет?
8. Какие существуют методы увеличения числовой апертуры?

9. В чём особенность различных микроскопов: биологических, люминесцентных, поляризационных и других?

### Задачи для практического занятия

**Задача 1.** Лупа с 3-кратным увеличением для нормального глаза фокусируется на изображении вблизи расстояния наилучшего зрения. Чему равно фокусное расстояние лупы?

**Задача 2.** Наблюдатель нормальным глазом рассматривает объект шириной 2,5 мм сквозь линзу с фокусным расстоянием 8,5 см. Определить угловое увеличение объекта, ширину изображения и расстояние от линзы до объекта.

**Задача 3.** Микроскоп состоит из объектива с фокусным расстоянием 2 мм и окуляра с фокусным расстоянием 40 мм. Расстояние между фокусами объектива и окуляра равно 18 см. Найти увеличение, даваемое микроскопом.

**Задача 4.** Оптические силы объектива и окуляра микроскопа равны 100 и 20 дптр. Увеличение микроскопа равно 50. Каково будет увеличение этого микроскопа, если расстояние между объективом и окуляром увеличить на 2,0 см?

### ЗАДАНИЕ 6

1. Лупа имеет фокусное расстояние  $f = 1$  см. Нарисовать ход лучей при наблюдении предмета, помещённого перед лупой. Определить её угловое разрешение при наблюдении глазом.

2. Линза с фокусным расстоянием 6 см используется в качестве простой лупы. Где должен находиться объект для получения максимального увеличения в случае нормального глаза?

3. Микроскоп имеет числовую апертуру  $\sin\alpha = 0,12$ , где  $\alpha$  – угол полураствора конуса лучей, падающих на оправу объектива. Полагая диаметр зрачка глаза  $d_0 = 4,0$  мм, определить увеличение микроскопа, при котором диаметр светового пучка, выходящего из микроскопа, равен диаметру зрачка глаза.

4. В микроскопе главное фокусное расстояние объектива  $f_{об} = 5,4$  мм, а окуляра  $f_{ок} = 2$  см. Предмет находится от объектива на расстоянии  $a_1 = 5,6$  мм. Определить линейное увеличение микроскопа для нормального глаза и длину микроскопа (расстояние между объективом и окуляром), полагая, что глаз аккомодирован на расстояние наилучшего зрения  $d = 25$  см. Показать ход лучей в микроскопе.



## ТЕМА 7. ИСТОЧНИКИ И ПРИЁМНИКИ СВЕТА

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Основные типы источников света.
2. Характеристики источников: светоотдача, спектральная плотность излучения, коэффициент цветопередачи.
3. Лампы накаливания.
4. Газоразрядные лампы.
5. Светодиоды и лазеры.
6. Основные типы приёмников света.
7. Характеристики приёмников света: чувствительность, спектральная характеристика, быстродействие.
8. Вакуумный фотоэлемент.
9. Фоторезистор и фотодиод.
10. ПЗС-матрица.
11. Фотопластинка.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** проекторы и прожекторы, светоотдача источника света, спектральная плотность излучения, коэффициент цветопередачи, чувствительность приёмника света, спектральная характеристика приёмника, быстродействие.

### Контрольные вопросы

1. Что называется светоотдачей источника света?
2. Что характеризует цветовая температура источника?
3. Сформулируйте основные законы теплового излучения.
4. Чем обусловлена низкая светоотдача ламп накаливания?
5. Каковы преимущества и недостатки газоразрядных ламп? Где они используются?
6. Какой спектр излучения дают светодиоды и лазеры?
7. Чем отличаются светильники от прожекторов?
8. Что такое кривая силы света?
9. Что называется приёмником оптического излучения?
10. Каковы основные характеристики фотоприёмников?
11. Какой фотоприёмник называется идеальным?
12. Какие фотоэлектрические приёмники обладают наибольшей чувствительностью и почему?
13. Что такое красная граница фотоэффекта? Как она влияет на селективность приёмника излучения?

14. Что такое квантовый выход фотоэлектрического и фотохимического преобразования?

15. Для чего в фотоматериал добавляют сенсibilизатор?

### Задачи для практического занятия

**Задача 1.** В центре квадратной комнаты площадью  $16 \text{ м}^2$  висит лампа. Считая лампу точечным источником света, найти, на какой высоте от пола должна находиться лампа, чтобы освещенность в углах комнаты была наибольшей.

**Задача 2.** Предмет при фотографировании освещается электрической лампой, расположенной от него на расстоянии  $2 \text{ м}$ . Во сколько раз надо увеличить экспозицию, если эту же лампу отодвинуть на расстояние  $3 \text{ м}$  от предмета?

**Задача 3.** Электромагнитное излучение с длиной волны  $\lambda = 0,30 \text{ мкм}$  падает на фотоэлемент, находящийся в режиме насыщения. Соответствующая спектральная чувствительность фотоэлемента  $J = 4,8 \text{ мА/Вт}$ . Найти квантовый выход фотоэлектронов  $\eta$ , т.е. число фотоэлектронов на каждый падающий фотон.

**Задача 4.** Однородный пучок монохроматического света с длиной волны  $\lambda = 0,45 \text{ мкм}$  и интенсивностью  $I = 8 \text{ Вт/м}^2$  падает по нормали на поверхность катода вакуумного фотодиода, который имеет площадь  $S = 1 \text{ см}^2$ . Определите ток насыщения, текущий через фотодиод, если число фотоэлектронов, приходящихся на один падающий фотон (квантовый выход фотоэффекта) составляет в среднем  $\eta = 0,1$ .

### ЗАДАНИЕ 7

1. Нарисовать ход лучей в проекторе. Какой световой поток должна давать лампа проектора, чтобы осветить экран  $1,5 \times 2 \text{ м}$ ? Освещенность должна быть не менее  $E = 100 \text{ лк}$ . Потери светового потока в проекторе составляют  $30\%$ .

2. Определить среднюю освещенность облучаемой части непрозрачной сферы, если на нее падает:

а) параллельный световой поток, создающий в точке нормального падения освещенность  $E_0$ ;

б) свет от точечного изотропного источника, находящегося на расстоянии  $l = 100 \text{ см}$  от центра сферы; радиус сферы  $R = 60 \text{ см}$  и сила света  $I = 36 \text{ кд}$ .

3. Большой чертёж фотографируют сначала целиком, затем отдельные его детали в натуральную величину. Во сколько раз надо увеличить экспозицию при фотографировании деталей?

4. В фокусе собирающей линзы с фокусным расстоянием  $f = 10 \text{ см}$  находится точечный источник света. На расстоянии  $L = 1 \text{ м}$  от линзы помещён экран, перпендикулярный к оптической оси линзы. Во сколько раз освещенность в центре светового пятна, получающегося на экране, больше, чем освещенность в том же

месте экрана, создаваемого источником при отсутствии линзы? Потерями света в воздухе и в линзе пренебречь.

5. Изображение Солнца получено на экране при помощи объектива. Определить его светосилу  $(D/f)^2$ , если известно, что освещённость изображения Солнца лучами, прошедшими через объектив, в 100 раз больше освещённости экрана прямыми солнечными лучами. Угловой размер Солнца  $\varphi = 30'$ .

6. Фотоаппаратом, объектив которого имеет фокусное расстояние  $f = 50$  мм, а размер кадра  $24 \times 35$  мм, фотографируют чертёж размером  $480 \times 600$  мм. С какого расстояния нужно произвести фотосъёмку, чтобы получить максимальный размер изображения? Какая часть кадра (по площади) будет при этом занята изображением?

7. Катод вакуумного фотодиода освещается равномерно монохроматическим светом с  $\lambda = 450$  нм. Площадь катода  $S = 1,00$  см<sup>2</sup>, освещённость  $E = 100$  лк (такая освещённость в белом свете нужна для того, чтобы можно было читать без напряжения). Определить ток насыщения  $I_{нас}$ , текущий через диод. При указанной длине волны световому потоку в 1 лм соответствует поток энергии в 0,040 Вт. Квантовый выход фотоэффекта  $\eta$  (т.е. число фотоэлектронов, приходящееся на один падающий фотон) принять равным 0,050.

## ТЕМА 8. ОСНОВЫ КОЛОРИМЕТРИИ

### ПЛАН ЛЕКЦИИ

1. Спектроскопы, спектрометры, спектрографы.
2. Разрешающая способность спектральных приборов.
3. Пирометрия.
4. Понятие о цвете.
5. Основные характеристики цвета: яркость, цветовой тон, насыщенность.
6. Субтрактивные и аддитивные методы воспроизведения цвета.
7. Законы аддитивного воспроизведения цвета.
8. Цветовые модели RGB, CMYK.
9. Цветовой локус.
10. Методы цветовых измерений.
11. Цветовая температура.

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ

**Основные понятия:** цветовое пространство, цветность, цветовой локус, основные цвета, цветовая температура.

### Контрольные вопросы

1. Что такое цвет?
2. Какие существуют способы воспроизведения цвета?
3. Сформулируйте законы аддитивного воспроизведения цвета.
4. Какие основные цвета используют в полиграфии и в проекторах (дисплеях) для воспроизведения цвета?
5. Что такое цветовое пространство?
6. Чем обусловлено цветовое восприятие человеческого глаза?
7. С какой особенностью человеческого восприятия света связана поговорка: «В темноте все кошки серые»?

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1. Оптические приборы

Эта тема посвящена описанию принципов работы различных оптических приборов, которые используются в полиграфии и светотехнике, а также и в других областях техники. Все оптические приборы можно разделить на две группы:

1) приборы, при помощи которых получают оптические изображения на экране. К ним относятся проекционные аппараты, фотоаппараты, киноаппараты, фильмоскопы.

2) Приборы, которые действуют только совместно с человеческими глазами и не образуют изображений на экране. К ним относятся лупы, микроскопы, бинокли и телескопы. Такие приборы называются визуальными.

### 1.1. Лупы и окуляры

Линза является основным конструктивным элементом многих оптических приборов. Собирающая или положительная линза часто используется для увеличения изображения предмета. Короткофокусная положительная линза называется лупа (рис. 1.1) [13]. Основным параметром лупы является фокусное расстояние  $f$ , или обратная величина, называемая оптической силой  $D = 1/f$ . Если фокусное расстояние  $f$

брать в метрах, то оптическая сила  $D$  получится в диоптриях (дптр). Использовать лупу для увеличения можно двояко, помещая её близко к глазу или вдаль от него. Рассмотрим принцип действия лупы при помещении вблизи глаза. Ход лучей, которые дают прямое увеличенное мнимое изображение, показан на рис. 1.2.

Другой важной величиной, характеризующей лупу, является увеличение. Она определяется по формуле:

$$\Gamma = \frac{250}{f, \text{ мм}} \quad (1.1)$$

Эта формула применима для луп с фокусным расстоянием менее 150 мм, а для луп с большим фокусным расстоянием эта величина увеличивается на единицу.



Рис. 1.1. Лупа, помещённая вдаль от глаза

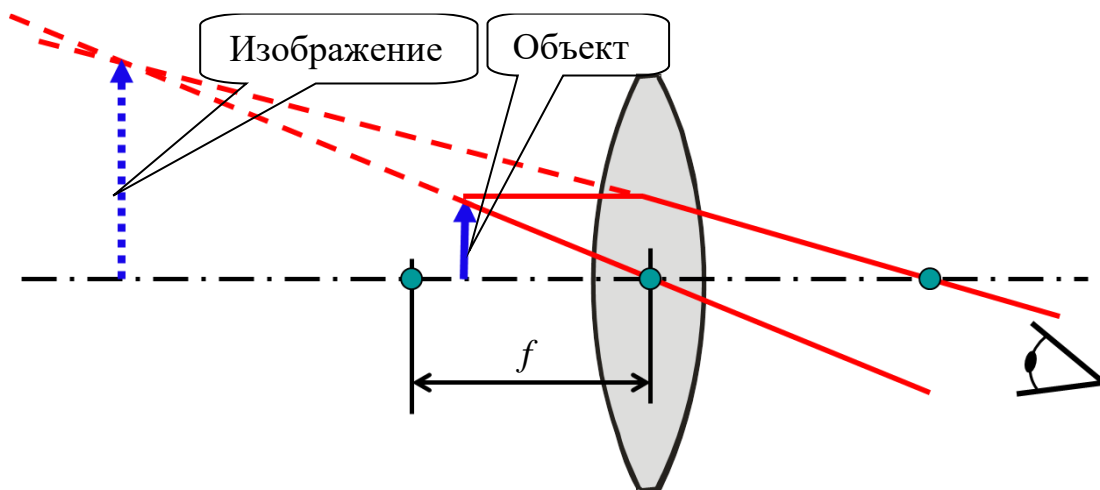


Рис. 1.2. Получение мнимого изображения с помощью лупы

Лупы большого увеличения, используемые для чтения, просмотра рисунков, фотоотпечатков и т.д., обычно имеют  $\Gamma < 40$ . Использование луп позволяет рассмотреть такие фрагменты наблюдаемого объекта, которые невозможно увидеть невооруженным глазом. Чем большее увеличение необходимо получить, тем меньшее фокусное расстояние должно быть у лупы. При уменьшении фокусного расстояния линзы необходимо уменьшать её диаметр. Поэтому трудно добиться увеличения более сорока с помощью одной линзы. Голландский натуралист Антони ван Левенгук (1632–1723) первым изготовил лупу, с помощью которой ему удалось обнаружить одноклеточные живые организмы. Его приборы имели 150–300-кратное увеличение, а диаметр линз был около 1 мм. Во сколько раз происходит увеличение объекта, во столько раз падает его яркость. Для компенсации потери яркости объекта наблюдения при использовании луп рекомендуется использовать мощные источники света.

Окуляр представляет собой более сложную увеличительную систему, состоящую обычно из двух линз, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном половине суммы их фокусных расстояний. Обычно окуляр используется не как самостоятельный оптический прибор, а является частью микроскопа, телескопа, дальномера или бинокля. Он предназначен для рассматривания действительного промежуточного изображения, формируемого объективом или главным зеркалом прибора. Основным параметром, характеризующим окуляр, также, как и для лупы, является увеличение. Оно также рассчитывается по формуле (1.1).

## 1.2. Телескопы и микроскопы

Лупа, как правило, не может увеличивать изображение объекта более чем в 40 раз. У телескопа и микроскопа увеличение может достигать 1500–2000. Оба эти приборы состоят из объектива и окуляра. В качестве объектива используется

положительная линза (у телескопов-рефракторов) или вогнутое зеркало (у телескопов-рефлекторов). Главное отличие микроскопа и телескопа состоит в параметрах объектива. В телескопах используется длиннофокусная линза большого диаметра, а в микроскопах – наоборот – короткофокусная линза малого диаметра.

На рис. 1.3 показан ход лучей в микроскопе, где  $f_1$  и  $f_2$  – фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно. Объект исследования располагается перед фокальной плоскостью объектива. Он даёт действительное перевёрнутое увеличенное изображение, которое должно находиться за фокальной плоскостью окуляра. В свою очередь, окуляр действует также как лупа (рис. 1.1), которая даёт увеличенное мнимое изображение. Таким образом, микроскоп производит перевёрнутое увеличенное изображение, формируемое на сетчатке глаза. Увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива на увеличение окуляра. Многие микроскопы оснащены сменными окулярами для получения различного увеличения. Так же как для лупы объект необходимо подсвечивать, т.к. его яркость, видимая глазом, обратно пропорциональна квадрату увеличению микроскопа. С помощью этого прибора невозможно различать детали размером менее длины волны света, т.е.  $\sim 500$  нм. Это связано с его волновой природой. Детали размером менее длины волны создают дифракционную картину, которая практически не зависит от характеристик этих деталей. С помощью оптических микроскопов можно рассмотреть клетки живых организмов, но нельзя увидеть вирусы размером  $\sim 100$  нм, и, конечно, атомы размером  $\sim 0,1$  нм.

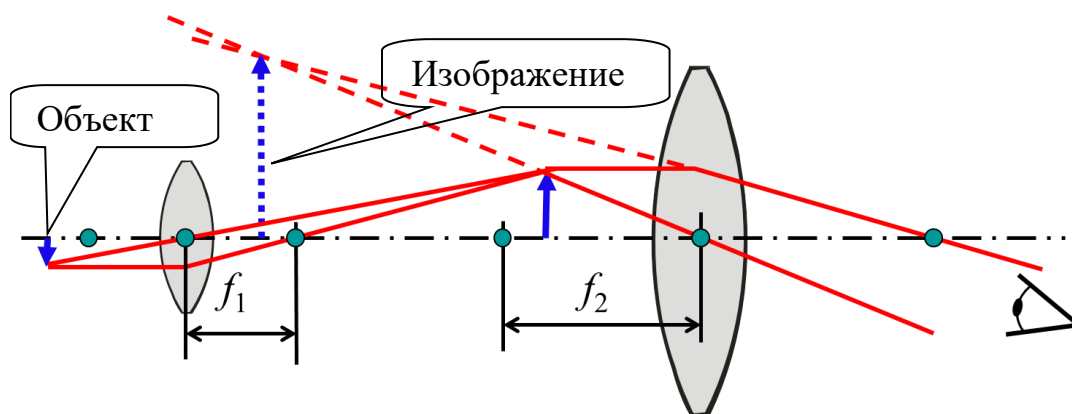


Рис. 1.3. Ход лучей в микроскопе

Аналогичным образом устроен телескоп-рефрактор Кеплера, дальномер и любая оптическая трубка (рис. 1.4). Увеличение телескопа равно отношению фокусного расстояния объектива  $f_{об}$  к фокусному расстоянию окуляра  $f_{ок}$ . С помощью такой схемы удаётся получить увеличение не более 100.

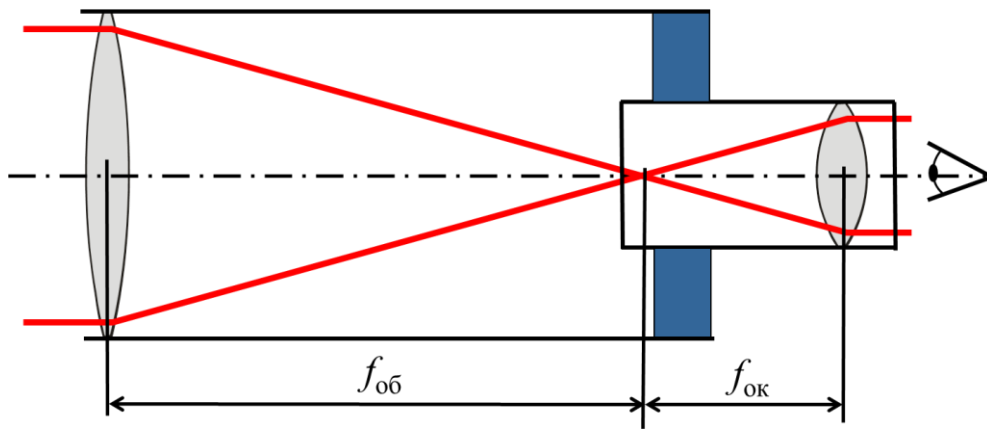


Рис. 1.4. Оптическая схема телескопа

Если объект удалён на большое расстояние, которое можно считать бесконечным, то он даёт параллельный пучок света. Этот пучок фокусируется в фокальной плоскости объектива, но его изображение – это дифракционное пятно, которое наблюдает человек через окуляр (рис. 1.5, а). Поэтому, звезда, «видимая» через телескоп, представляет собой дифракционную картину, причём, чем больше диаметр объектива, тем меньший диаметр имеют дифракционные пятна и чётче видна картина. Если объект протяжённый, как например, звезда-сверхгигант Бетельгейзе, то дифракционные пятна, сливаются и образуют размытое изображение звезды (рис. 1.5, б).

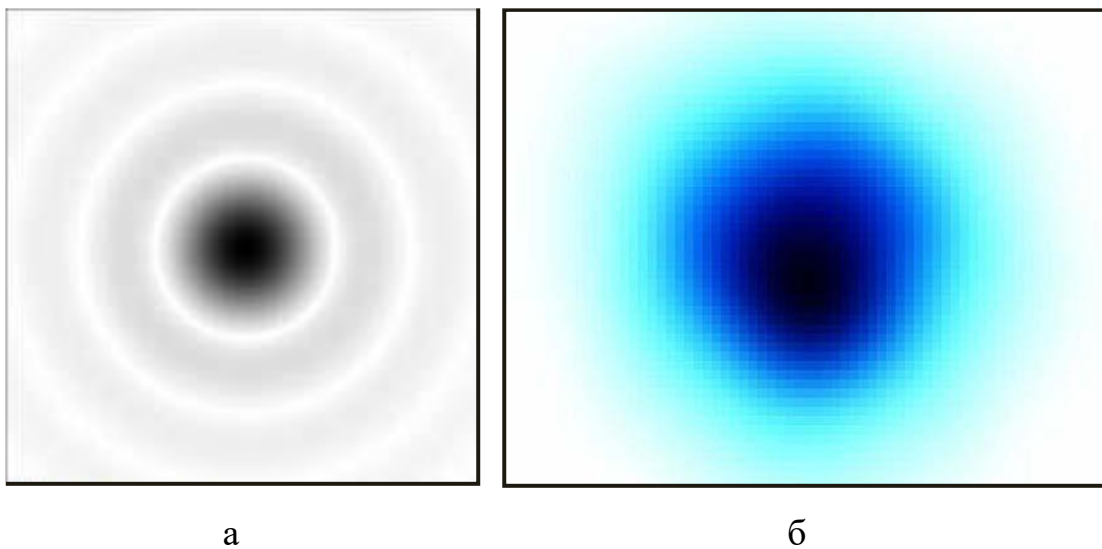


Рис. 1.5. Фотография компактного объекта (карликовая звезда) (а), фотография протяжённого объекта (звезда Бетельгейзе) (б)



### 1.3. Проекторы

Для получения изображения на экране используются проекторы. К приборам этого класса относятся также диапроекторы, кинопроекторы, кодоскопы или графопроекторы – оптические приборы, предназначенные для проекции прозрачных оригиналов с изображением на большой экран. Все проекторы имеют источник света большой яркости (рис. 1.6). Обычно, это мощная лампа накаливания 1 с отражателем 2. С помощью системы конденсорных линз 3 пучок света, исходящий от него, расширяется и попадает на плёнку с изображением 4. Объектив 5, который проецирует изображение на экран, устанавливается так, чтобы оно находилось перед фокальной плоскостью. Тогда изображение на экране будет увеличенным действительным и перевернутым. Чем больше увеличение даёт проектор, тем меньше будет яркость изображения на экране. Плёнка в проекторе находится в области очень сильной интенсивности излучения, поэтому, например, в кинопроекторах плёнка не должна останавливаться, когда включена лампа из-за опасности возгорания. В современных проекторах в качестве предмета для изображения используются жидкокристаллические матрицы для трёх цветов – красного, зелёного и синего. Они управляются компьютером, который посылает сигнал в формате RGB (Red-Green-Blue). Излучения разных каналов смешиваются на экране, давая полноцветное изображение. Экран, на который попадает изображение, должен обладать высоким альбедо и создавать диффузное рассеяние в соответствии с законом Ламберта.

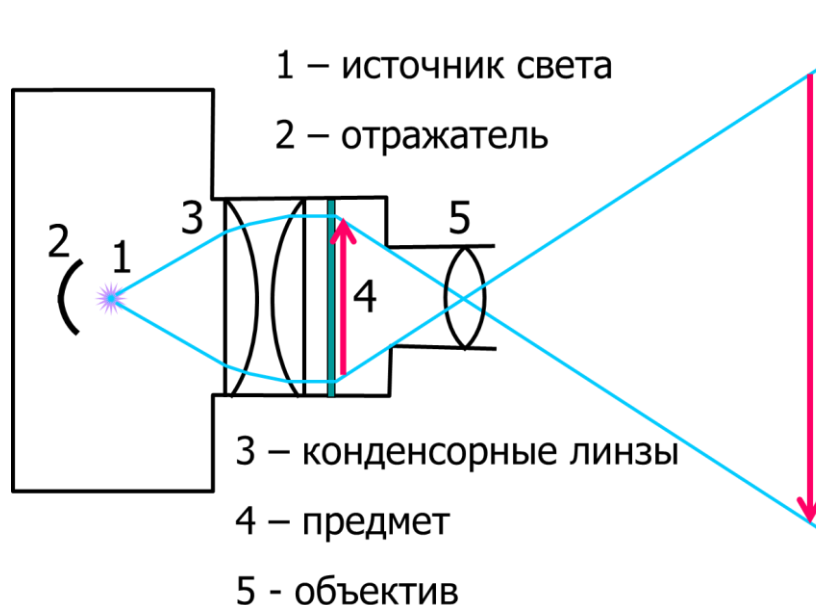


Рис. 1.6. Ход лучей в проекторе

Современная киноиндустрия использует особую технологию для получения стереоизображения с помощью проектора – RealD. В этой технологии используется свет с различной поляризацией для правого и левого глаза. Проектор попеременно проецирует кадры для каждого глаза, причем эти кадры проецируются в циркулярном поляризованном свете – по часовой стрелке для правого глаза, против часовой – для левого (рис. 1.7). Каждое из стёкол очков пропускает свет только одной поляризации, обеспечивая видимость каждым глазом только своей части стереопары вне зависимости от наклона головы зрителя. В 3D кинотеатрах каждый кадр стереопары проецируется трижды, что по сравнению с обычной частотой проекции – 24 кадра в секунду – даёт утроение частоты 72 кадров в секунду, предотвращая мерцание. В результате получается изображение, очень комфортное для восприятия. Основной проблемой поляризационных 3D систем, используемых в кино, является потеря яркости изображения. Поляризационный фильтр, находящийся перед проектором, поглощает половину исходящего света, что и является причиной итоговой потери яркости на экране. Кроме того, технология предъявляет высокие требования к экрану. Прежде всего, экран не должен изменять поляризацию падающего на него света, в противном случае происходит разрушение стереоэффекта. Чтобы этого избежать, в RealD используются дорогостоящие экраны с серебряным покрытием. Это является одним из главных недостатков технологии. Кроме того, посеребрённые экраны из-за направленного характера отражения значительно ухудшают восприятие «плоских» фильмов, что в некоторых случаях вынуждает кинокомпании запрещать показы фильмов 2D в кинотеатрах с такими экранами.

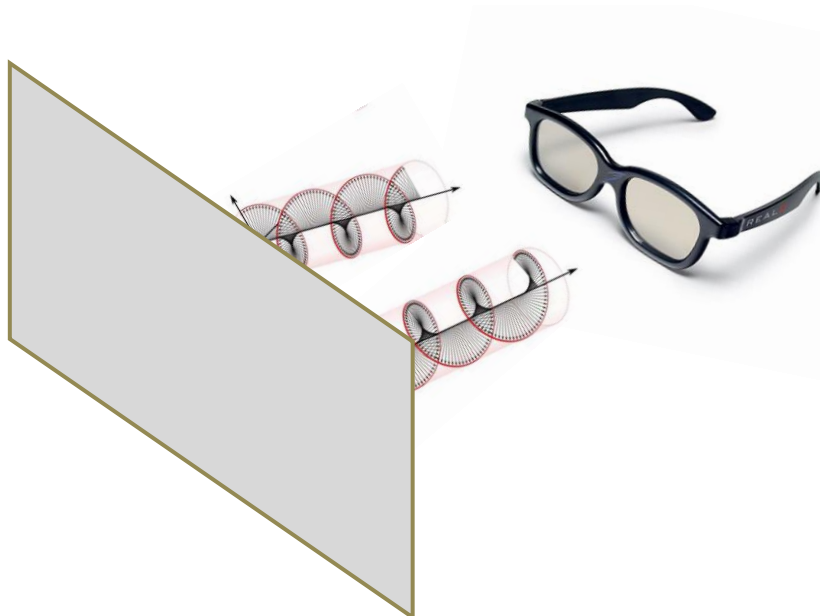


Рис. 1.7. Принцип получения стереоизображения

## 1.4. Фотографическая оптика

Простейшим фотоаппаратом является камера-обскура (лат. camera- obscura «тёмная комната»). Она представляет собой светонепроницаемый ящик с отверстием в одной из стенок и фотопластинкой на противоположной стенке. Лучи света проходят сквозь отверстие диаметром  $D$  приблизительно 0,5–5 мм и создают перевернутое изображение на экране (рис. 1.8). Камера-обскура не обеспечивает высокой резкости изображения. До определенного предела резкость изображения может быть повышена путем уменьшения диаметра отверстия, но при слишком сильном уменьшении начинают сказываться эффекты дифракции и изображение становится ещё более расплывчатым. Кроме того, уменьшается освещённость фотопластинки, что требует увеличения экспозиции.

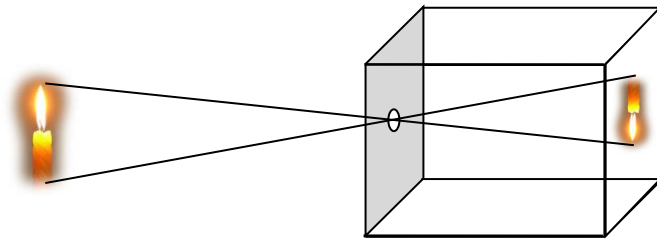


Рис. 1.8. Получение изображения объекта с помощью камеры-обскуры

Современная фотографическая техника использует сложные объективы с фокусным расстоянием  $f$  от 2,5 до 75 мм, состоящие из 5–6 линз. Рассмотрим принцип действия фотоаппарата, который оснащён простейшим объективом – единственной короткофокусной положительной линзой (рис. 1.9). Главной характеристикой объектива является его светосила – отношение диаметра объектива при полностью раскрытой диафрагме  $D$  к его фокусному расстоянию  $f$  –  $D/f$ .

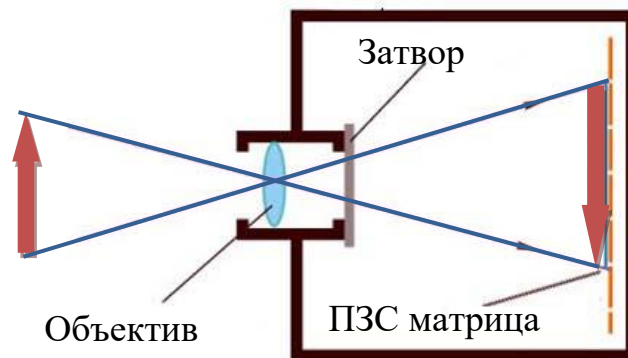


Рис. 1.9. Оптическая схема фотоаппарата

Качество фотографии зависит, в первую очередь, от светосилы объектива, поскольку освещённость регистрирующего устройства – ПЗС матрицы – пропорциональна квадрату светосилы объектива. Самый светосильный объектив в мире был сделан в 1966 году для NASA, который использовали в целях съёмки тёмной стороны Луны. Называется он Carl Zeiss Planar с фокусным расстоянием 50 мм. Светосила  $D/f$  у него равна 1:0,7. Таких объективов было выпущено всего десять. Лучшие объективы, используемые в фотографии, имеют светосилу 1:2,8; 1:1,8; 1:1,4. Казалось бы, можно легко достичь более высоких показателей светосилы путём увеличения диаметра объектива, но это приводит к появлению различных искажений изображения. Одно из таких искажений называется сферической аберрацией (рис. 1.10). Помимо этого, возникают и другие виды искажений: хроматическая аберрация, кома, дисторсия. Причина

всех видов aberrаций одна – невозможность свести лучи в фокальной плоскости, если линза имеет большой диаметр. Чтобы минимизировать влияние этих эффектов, применяют диафрагмы, что искусственно уменьшает светосилу объектива. Также используют различные добавочные линзы для исправления искажений. Это приводит к увеличению коэффициента отражения света в объективе, т.к. от каждой поверхности линзы отражается 4–5% интенсивности света, что также приводит к уменьшению светосилы. Эту проблему удалось частично решить путём применения просветляющих покрытий. В начале 20 века линзы для объективов подбирали наугад. Лишь в середине века с появлением мощных компьютеров и развитием методов технической оптики удалось начать точно конструировать мощные объективы.

В настоящее время для регистрации изображения используются светочувствительные ПЗС-матрицы (ПЗС – прибор с зарядовой связью). Изображение оцифровывается и, затем, обрабатывается с помощью микропроцессора с целью улучшения качества изображения и минимизации оптических aberrаций. Сохранение фотографий происходит в магнитном носителе фотоаппарата, обычно в ММС-карте. Этот метод регистрации и сохранения изображений значительно расширил применение фотографической техники. Однако традиционный метод фотографии с применением фотоплёнок и фотопластинок продолжает существовать, поскольку он даёт более достоверные сведения об объекте. Электронная фотография, хранящаяся в компьютерном файле, может быть подвергнута обработке с помощью графических программ. В тех случаях, где требуется высокая достоверность фотографии, применяют традиционные методы с использованием фотоплёнок и фотопластинок, например, в научных исследованиях, а также для получения голограмм.

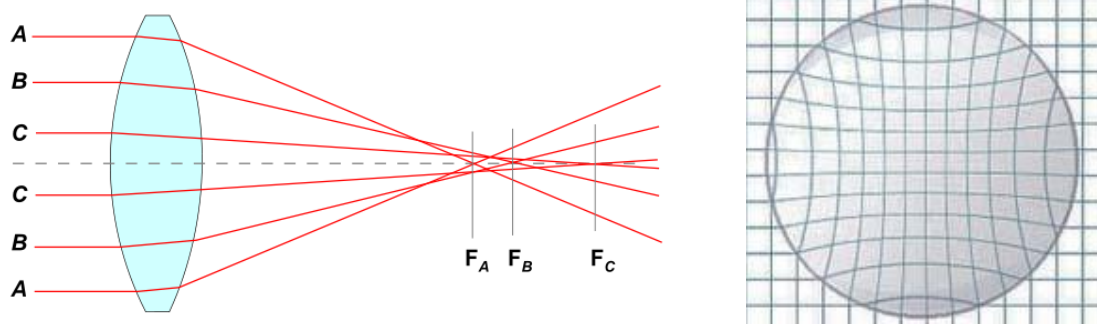


Рис. 1.10. Различная сходимость лучей – причина сферической aberrации

## Приложение 2. Приёмники оптического излучения

### 2.1. Основные характеристики приёмников излучения

В светотехнике приёмниками излучения или фотоприёмниками называют тела, устройства, в которых происходит преобразование энергии оптического излучения в другие виды энергии: механическую, тепловую, химическую, электрическую. Приёмники оптического излучения можно разделить на фотобиологические, фотофизические и фотохимические.

По типу действия приёмники излучения делятся на приёмники, реагирующие на действия излучения:

1. тепловое (термоэлементы, болометры);
2. фотоэлектрическое (фотоэлементы, фотоумножители, фотодиоды, ПЗС-матрицы);
3. фотографическое (фотографические слои).

Отдельный класс составляют приёмники живой природы: глаз и кожа человека, листья растений и т.д.

Преобразование электромагнитного излучения в другие виды энергии характеризуется изменением состояния самого тела (приёмника оптического излучения) и называется реакция приёмника. Реакцию приёмника излучения можно оценить эффективной энергией излучения. Эффективная энергия излучения – это энергия излучения, поглощенная телом и преобразованная в другие виды энергии. К примеру, количественным описанием эффективной энергии является мощность, электрический ток, протекающий в выходной цепи приёмника. Для всех приёмников излучения выполняется закон сохранения энергии:

$$W_e = W_{\text{эф}} + \Delta W, \quad (2.1)$$

где  $W_{\text{эф}}$  – эффективная энергия;  $\Delta W$  – потеря энергии при преобразовании;  $W_e$  – энергия, падающая на приёмник.

Важной характеристикой фотоприёмников является чувствительность. Чувствительность разделяют на общую (интегральную) и спектральную. Также к важнейшим свойствам приёмника относят: вид реакции приёмника на падающее излучение; линейность или нелинейность реакции приёмника; диапазон реакции приёмника.

Чувствительностью фотоприёмника называют величину, которая характеризует его способность, реагировать на действие излучения. К примеру, пусть имеется два фотоприёмника и на каждом воздействует одно и то же количество излучения. Большей чувствительностью обладает тот приёмник, чья реакция больше. Таким образом, можно заключить, что чувствительность фотоприёмника определяется отношением эффективной энергии  $W_{\text{эф}}$  к падающей на приёмник энергии излучения  $W_e$ :

$$S = cW_{\text{эф}}/W_e, \quad (2.2)$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности, который зависит от единиц измерения  $W_{\text{эф}}$ .

Поскольку мощности излучения и его эффективность зависят от длины волны, то для фотоприёмников находится такая величина как спектральная чувствительность, т.е. чувствительность фотоприёмника к однородным излучениям.

$$S(\lambda) = cW_{\text{эф}}(\lambda)/W_e(\lambda), \quad (2.3)$$

где  $S(\lambda)$  - монохроматическая спектральная чувствительность.

В зависимости от того, влияет длина волны излучения на реакцию приёмника или нет, все фотоприёмники можно разделить на селективные (избирательные) и неселективные (неизбирательные). Для неселективных приёмников спектральная чувствительность не зависит от длины волны. Для селективных приёмников спектральная чувствительность зависит от длины волны. Как правило, на практике вместо спектральной чувствительности используется относительная спектральная чувствительность фотоприёмника. Относительная спектральная чувствительность фотоприёмника – это отношение спектральной чувствительности приёмника для выбранной длины волны к максимальному значению спектральной чувствительности этого же приёмника.

Интегральная чувствительность фотоприёмника определяется для сложного излучения, падающего на фотоприёмник. Как правило, интегральная чувствительность определяется по конкретным методикам и характеризует способность фотоприёмников реагировать на излучения разных спектральных составов. В отличие от спектральной чувствительности приёмника, которая зависит только от его свойств, интегральная чувствительность приёмника зависит как от свойств самого приёмника, так и от источника излучения.

Порогом чувствительности называют минимальный сигнал приёмника, который может быть использован и усилен. Минимальная энергия, которая может упасть на приёмник это энергия одного кванта. Если приёмник способен зарегистрировать энергию одного кванта, то такой приёмник можно считать идеальным. Человеческий глаз после длительной адаптации в темноте способен обнаружить однородное излучение с  $\lambda = 550$  нм и энергией в несколько квантов. Поэтому глаз можно считать почти идеальным фотоприёмником.

## 2.2. Глаз – фотобиологический приёмник излучения

Основным приёмником излучения является человеческий глаз. То, как мы воспринимаем окружающий мир, зависит: от строения глаза, от особенностей связи глаза с мозгом, т.е. от нашего психофизического состояния. Рассмотрим строение человеческого глаза.

Глаз (рис. 2.1) – это шарообразное тело, заполненное прозрачным для видимого излучения веществом – стекловидное тело. Стекловидное тело заключено в плотную оболочку – склеру, которая выполняет защитную функцию глаза.

Склера непрозрачна, за исключением передней открытой части глаза, где она переходит в прозрачную «линзу» – роговицу. За ней находится изменяемая диафрагма – зрачок, диаметр которого изменяется рефлекторно в зависимости от интенсивности падающего света от 2 до 8 мм.

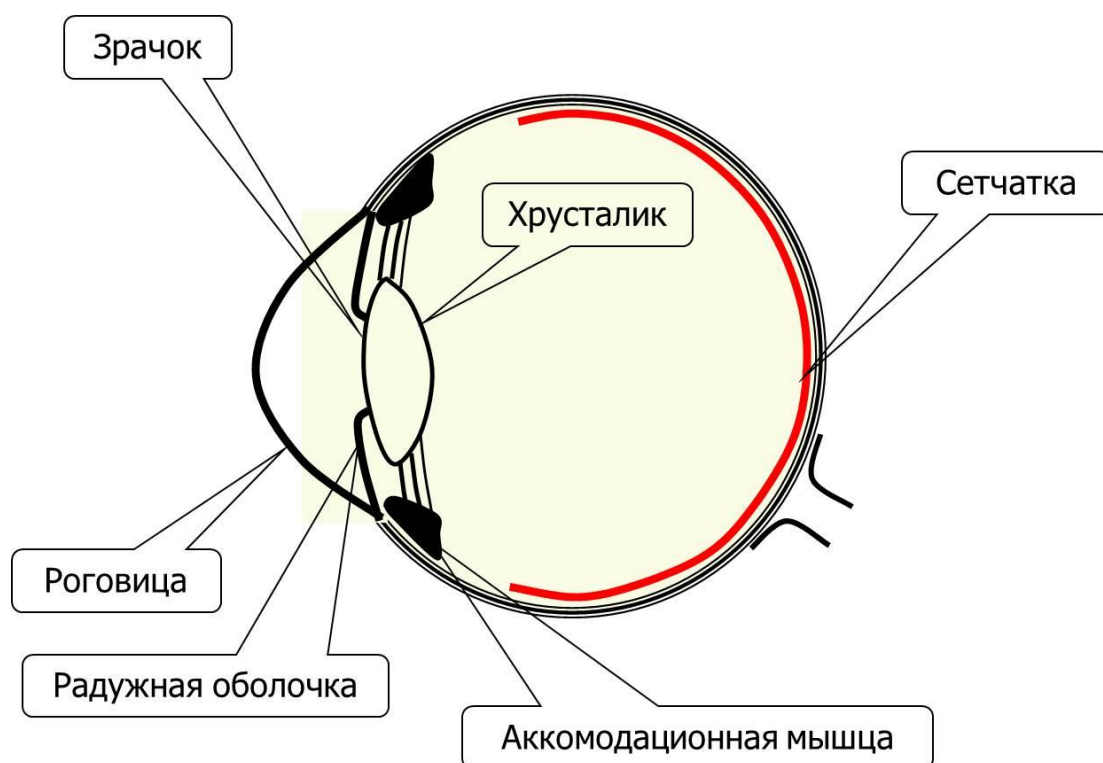


Рис. 2.1. Строение человеческого глаза

Внутри глаза, непосредственно за зрачком, расположено прозрачное упругое тело, имеющее форму двояковыпуклой линзы и называемое хрусталиком. Он имеет неравномерный показатель преломления, с минимум по краям и максимальным значением в центре. Хрусталик представляет собой слоистую гибкую структуру, которая заключена в тонкую прозрачную оболочку, охваченную кольцеобразной мышцей, под действием которой он может изменять свою кривизну, в результате чего свет от объекта, расположенного на различных расстояниях всегда фокусируется на поверхности сетчатки. Такое изменение кривизны хрусталика называется аккомодацией. Нарушение этого естественного процесса приводит к близорукости или дальнозоркости. У глаза, имеющего нормальную рефракцию, фокусное расстояние оптической системы может изменяться от 19,5 до 23 мм, а расстояние наилучшего зрения – 25 см.

Сетчатка имеет сложное строение и состоит из восьми слоев. Один из этих слоев отвечает за восприятие света. Этот слой состоит из мельчайших светочувствительных клеток: палочек (около 130 млн.) и колбочек (около 7 млн.). Строение этих клеток и их работа во многом объясняют механизм зрительного восприятия света, а также механизм цветного зрения. Внутри клеток находится четыре вида фотопигментов: один – в палочках и три – в колбочках. Вещество палочек

– родопсин. Максимальное поглощение света родопсином соответствует излучению с длиной волны 512 нм. Пигмент палочек светочувствителен в диапазоне 380...760 нм даже при малом освещении (рис. 2.2 (2)). Что касается колбочек, то они менее чувствительны к свету, чем палочки, и реагируют на свет лишь при достаточном освещении (рис. 2.2 (1)) [32]. Поэтому, в темноте человек не способен различать цвета, а воспринимает только чёрно-белое изображение. Колбочки содержат вещество – иодопсин. Колбочки могут быть трех видов: сине-, зелено- и красночувствительные. При совместной работе они воспринимают в том же диапазоне, что и палочки, но максимальная чувствительность колбочек приходится на длину волны 555 нм. Поэтому при слабом освещении человеческий глаз становится более чувствительным к сине-фиолетовой области спектра. Когда колбочки возбуждаются примерно одинаково, возникает ощущение ахроматических цветов, или, по-другому, – светлоты. В остальных случаях ощущение светлоты возникает одновременно с ощущением цветности. Каждая клетка или их небольшая группа соединена с другими нервными волокнами. Окончания этих волокон находятся в зрительных участках головного мозга. Все волокна при выходе из глаза собираются в единый пучок – зрительный нерв, который соединяет глаз с мозгом. Место сетчатки, в котором находится сам зрительный нерв, не содержит светочувствительных клеток, т.е. оно не чувствительно к световым излучениям и называется слепым пятном.

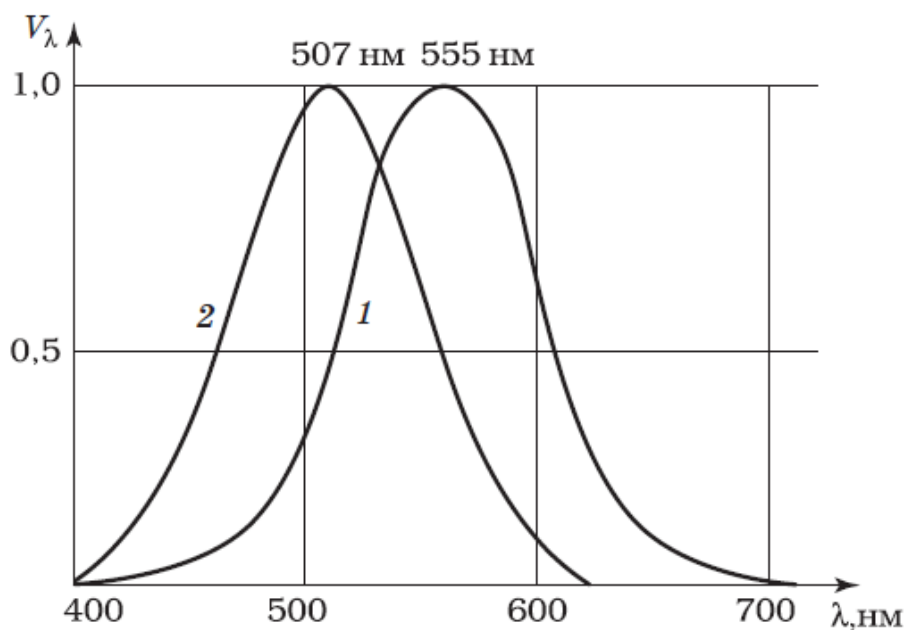


Рис. 2.2. Кривые относительной спектральной световой эффективности:  
 1 – для глаза, адаптированного к дневным яркостям;  
 2 – для глаза, адаптированного к ночным яркостям.

Одно из самых важных образований сетчатки – её центральная ямка. Это участок сетчатки наиболее, приспособленный для рассмотрения мелких деталей и цвета. Максимальный угловой размер рассматриваемой детали равен примерно



60". Центральная ямка защищена жёлтым фильтром – макулой (жёлтое пятно), который предохраняет ямку от воздействия ультрафиолетовых лучей. Колбочки, в основном, расположены в центре сетчатки – в так называемом «жёлтом пятне».

### 2.3. Фотофизические приёмники излучения

Как правило, принцип действия фотофизического приёмника излучения основывается на внутреннем или внешнем фотоэффекте.

Рассмотрим фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Такие фотоэлементы можно разделить на вакуумные и газополные. Вакуумный фотоэлемент состоит из стеклянного герметичного баллона (рис. 2.3) в котором создается низкий вакуум, а на внутренней стенке нанесён фотоэлектрический чувствительный слой. Этот слой выполняет функцию фотокатода (3), и определяет спектральные свойства фотоэлемента. Другой электрод (1) –анод имеет гораздо меньшие размеры, может быть выполнен в различных вариантах: сетка, кольцо, рамка и играет роль коллектора электронов, т.е. он их собирает. При включении такого фотоэлемента в цепь (рис. 2.3) гальванометр (2) будет показывать силу тока при освещении фотоэлемента. Световые характеристики вакуумных фотоэлементов отличаются линейностью в достаточно широких пределах освещенности фотокатода.

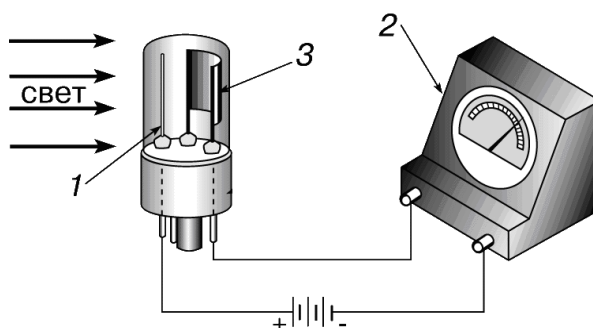


Рис. 2.3. Вакуумный фотоэлемент

Газополные фотоэлементы наполняются инертным газом. Это позволяет с одной стороны увеличить интегральную чувствительность, с другой стороны появляется инерционность. То есть, в отличие от вакуумного фотоэлемента, который реагирует на переменный световой поток с частотой до нескольких десятков кГц, то газополный фотоэлемент имеет предельную частоту 3 кГц. Инертность газополных элементов зависит от рода наполняющего газа и его давления.

Вакуумные фотоэлементы обладают невысокой чувствительностью к свету. Более высокой чувствительностью обладают фотоэлектронные умножители (ФЭУ). ФЭУ – это электровакуумный прибор, в котором поток электронов, эмитируемый фотокатодом под действием оптического излучения, усиливается в умножительной системе в результате процесса вторичной электронной эмиссии. На рис. 2.4 изображен внешний вид ФЭУ. Принцип работы продемонстрирован на рис. 2.5. Фотоэлектроны, эмитируемые с фотокатода под действием электрического поля, ускоряются и попадают на первый промежуточный электрод Э<sub>1</sub> (промежуточные электроды называют диодами и имеют изогнутую форму), вызывая эмиссию вторичных электронов. Вторичная эмиссия в несколько раз превышает первоначальный поток электронов. Вторичные электроны попадают на

следующий электрод  $\mathcal{E}_2$ , процесс повторяется и т.д. С последнего динода электроны собираются анодом. Для фокусировки и ускорения электронов на анод и диноды подаётся высокое напряжение (600 – 3000 В). ФЭУ могут быть чувствительны даже на отдельные фотоны.



Рис. 2.4. Внешний вид ФЭУ

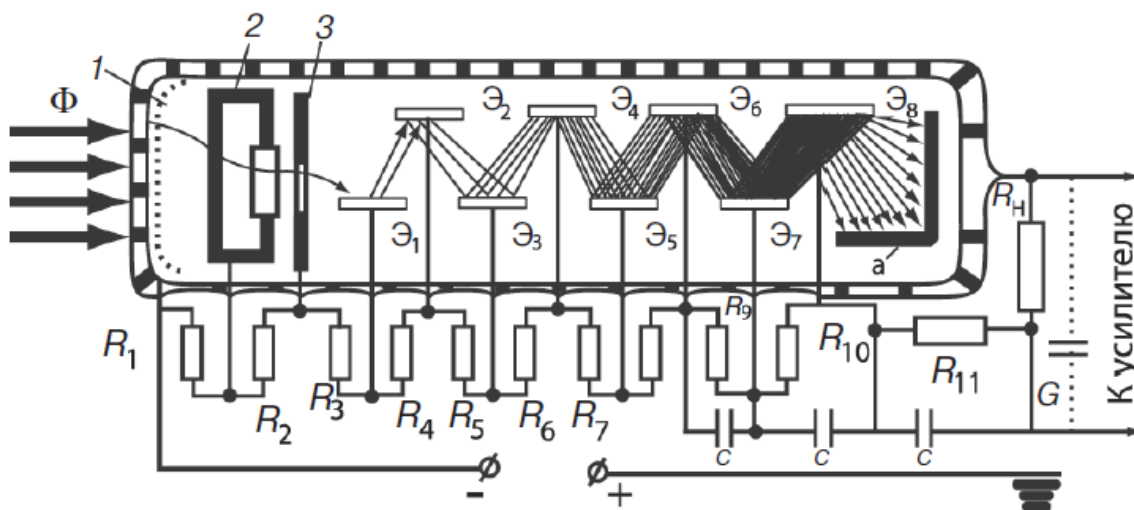


Рис. 2.5. Строение фотоэлектрического умножителя:

1 – металлическая сетка за входным окном; 2 – полупроводниковый катод, нанесенный на полый металлический цилиндр; 3 – анод;  $\mathcal{E}$  – вторичные катоды (эммитеры), усиливающие сигнал;  $R$  – резисторы, регулирующие напряжение на эммитерах;  $C$  – конденсаторы

Рассмотрим теперь фотоэлементы с внутренним фотоэффектом. В 1876 г. Адамсом и Дэйем было открыто явление возникновения электродвижущей силы при освещении палочки селена. На тот момент явление фотоэффекта не было

открыто, поэтому это открытие Адамса и Дзэуяма нашло свое применение спустя многие годы. Был изобретен селеновый фотоэлемент. Селеновые фотоэлементы получили широкое применение благодаря своей спектральной характеристики, которая хорошо соответствует кривой видности светлоадаптированного глаза (рис. 2.2 (1)).

В настоящее время широко применяются фотоприёмники с зарядовой связью (ПЗС). ПЗС – приборы с зарядовой связью – служат для преобразования оптического излучения в электрические сигналы и передачи информации от одного элемента электронной схемы к другому. ПЗС представляют собой линейку или матрицу последовательно расположенных МДП- структур. МДП-структура – это структура «металл–диэлектрик–полупроводник». Величина зазора между соседними МДП-структурами составляет около 1–2 мкм. ПЗС линейки или матрицы используются в сканерах, фотоаппаратах, видеокамерах, в спектрофотометрах. На рис. 2.6 показан принцип работы ПЗС. Под действием света в элементе накапливается электрический потенциал, уровень которого пропорционален экспозиции. Затем фиксируется потенциал каждой точки матрицы. Для этого потенциалы последовательно перемещаются из строк матрицы в запоминающее устройство в виде периодического колебания потенциалов по уровню. До экспонирования происходит сброс всех ранее образовавшихся зарядов, все элементы приводятся в одинаковое состояние. Как правило, для этого используется определенный сигнал (напряжение) подающийся на электроды.

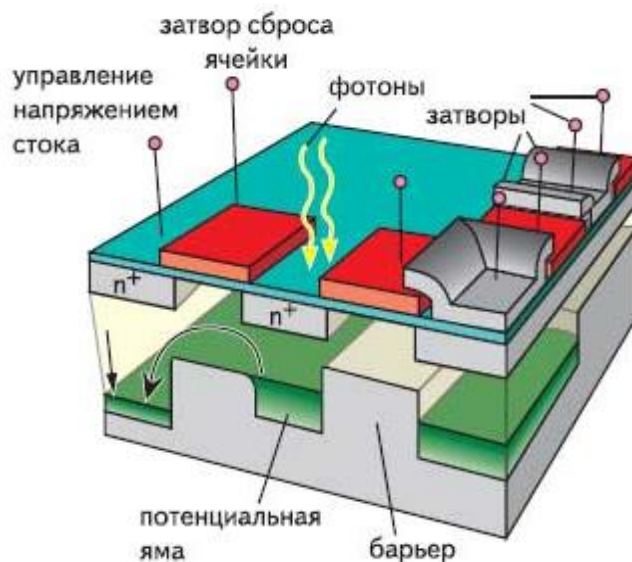


Рис. 2.6. Принцип работы ПЗС-матрицы

Все перечисленные фотоэлектрические преобразователи являются селективными, т.е. их чувствительность зависит от длины волны падающего излучения. Для каждого из них существует красная граница фотоэффекта – максимальная длина волны, на которой ещё возможен фотоэффект. У вакуумного фотоэлемента и ФЭУ красная граница находится, как правило, в желто-оранжевой области спектра. Поэтому эти приборы не чувствительны к красным и инфракрасным излучениям. В то же время, полупроводниковые фотоэлементы и ПЗС-матрицы имеют красную границу фотоэффекта, лежащую в инфракрасной области (2 - 3 мкм). Поэтому, цифровые фотоаппараты и видеокамеры, в которых в качестве чувствительных фотоэлементов используются ПЗС-матрицы, способны регистрировать излучения, невидимые для человеческого глаза.

## 2.4. Фотохимические приёмники излучения

Когда под действием излучения происходит изменение химических свойств вещества, говорят о фотохимических процессах. К фотохимическим приёмникам излучения относятся все виды фотослоёв, которые используются в фотографии. Фотографические процессы могут быть разделены на две группы: процессы на галогенсеребряных материалах и процессы на фотопроводящих материалах (электрофотографии). Фотографический процесс состоит из двух основных стадий. Первая стадия – образование скрытого изображения под действием излучения в процессе экспонирования. Вторая стадия – визуализация скрытого изображения путём проявления и его закрепления для повышения стойкости к внешним воздействиям. Под действием света после проявления и фиксирования в светочувствительном слое создаётся стойкое фотографическое почернение. Мерой величины поглощённой энергии служит оптическая плотность проявленного фотослоя. В зависимости от назначения галогенсеребряные слои имеют широкий диапазон чувствительности и разрешающей способности [15, 16].

Одной из основных количественных характеристик преобразования излучения является квантовый выход. Для фотохимической реакции он определяется отношением числа молекул, вступивших в реакцию к числу поглощенных фотонов. Масса фотохимически прореагировавшего вещества пропорциональна поглощенной световой энергии (закон Бунзена-Роско):

$$m = k\Phi t, \quad (2.4)$$

где  $\Phi$  – световой поток или поток энергии излучения;  $t$  – время облучения;  $k$  – коэффициент пропорциональности, который зависит от природы фотохимической реакции.

Светочувствительные материалы можно разделить по типу получаемого изображения:

1. материалы, предназначенные для получения видимого изображения. В них под действием излучения и проявления образуются новые химические соединения, имеющие окраску, отличную от фона, на который свет не действовал или, наоборот, действовал. В результате получается цветное или чёрно-белое изображение. В этой группе наиболее распространены галогенсеребряные материалы.

2. Материалы, предназначенные для получения равномерного по толщине пленочного изображения, в пробелах которого светочувствительный материал вымывается до подложки в процессе проявления. В полиграфии такие слои называют копировальными. В процессе записи изображения могут использоваться два вида реакций: деструкция слоя под действием излучения (позитивные слои) или полимеризация, т.е. сшивание молекул (негативные слои).

3. Материалы, предназначенные для многократного получения изображений. В них под действием излучения происходят фотофизические изменения, имеющие обратимый характер. Это позволяет попеременно записывать и стирать изображение. В качестве примера рассмотрим электрофотографический про-

цесс, где светочувствительным материалом является фоторецептор. Он же одновременно – физический приёмник с внутренним фотоэффектом и светочувствительным материалом.

Фотоматериалы также, как и фотоэлектрические приёмники, обладают селективными свойствами. Большинство фотоматериалов чувствительно также и излучениям инфракрасной области. Чтобы изображение, полученное на фотоматериале, соответствовало человеческому восприятию, в него добавляют специальное вещество – сенсibiliзатор, который изменяет спектральную чувствительность фотоматериала.

## Приложение 3. Источники света

### 3.1. Основные характеристики источников излучения

Источник света – это излучатель электромагнитной энергии в видимой области спектра. Они имеют большое значение для производства, искусства, современного быта, и используются в качестве осветительных приборов, входят в состав исследовательского оборудования, бытовых приборов, копировальной техники и др. То какими мы видим те или иные предметы во многом определяется источником света. Так, белый цвет в зависимости от источника света может казаться светло-жёлтым или синевато-белым.

Самым распространенным источником света, является солнечный свет. Спектральное распределение энергии солнечного света зависит от большого числа факторов: широты места, времени суток, сезона, высоты и атмосферных условий и др. Источники света можно разделять по габаритам, назначению, физическому принципу действия и др. Обычно выделяют две большие группы источников света:

1. тепловые источники света и
2. люминесцентные.

В тепловых источниках света свет возникает при нагревании тел до высокой температуры. В люминесцентных источниках, свет возникает в результате преобразования различных видов энергии в оптическое излучение, независимо от теплового состояния излучающего тела.

По времени воздействия источники света могут быть импульсные и непрерывные. Импульсные источники света предназначены для получения многократных световых импульсов, отличительной особенностью: которых является большая мощность (до 10 кВт), и маленькая длительность излучения, вплоть до микросекундной длительности.

Основные характеристики источников излучения:

1. Спектральная плотность потока излучения  $\Phi_{e\lambda}$ . Для обеспечения хорошей и полной цветопередачи, источник света должен воспроизводить свет всех длин волн, которые типичны для истинных цветов предмета.
2. Световой поток, излучаемый источником света  $\Phi$ .

3. Световая отдача  $\eta$  – отношение потока излучённого света к потребляемой мощности ( $\eta = \Phi/P$ ). Световая отдача является одним из основных параметров, характеризующих экономичность источника излучения.

4. Цветовая температура  $T_{цв}$  (для тепловых источников) и коррелированная цветовая температура  $T_{кцв}$  (для люминесцентных источников) – характеризуют цветность излучения источника [17]. Это температура абсолютно чёрного тела, при которой оно испускает излучение с той же цветностью, что и рассматриваемое излучение.

### 3.2. Законы теплового излучения

Тепловое излучение возникает в результате изменения энергии атомов и молекул, входящих в состав излучающего тела, причём средняя энергия атомов и молекул, уровень их возбуждения зависит от температуры нагретого тела: чем больше температура, тем больше энергия излучающих частиц, поэтому тепловое излучение часто называют температурным [18]. При этом в излучающем теле не происходит никаких изменений, кроме изменений теплового состояния, а количество излучаемой энергии изменяется соответственно количеству подводимого тепла.

Законы теплового излучения, т.е. зависимость излучаемой энергии от температуры и ее распределение в спектре наиболее хорошо изучены для абсолютно черного тела (АЧТ). Это тело, которое обладает способностью поглощать весь падающий на него лучистый поток. Абсолютно чёрных тел в природе нет, однако, такие тела, как сажа, черный бархат и другие в видимой части спектра близки к АЧТ. Наиболее совершенной моделью АЧТ может служить небольшое отверстие в замкнутой полости (рис. 3.1). Излучение, проникшее внутрь полости, претерпевает многократное отражение от стенок полости, при каждом таком отражении часть излучения переходит во внутреннюю энергию полости, интенсивность излучения уменьшается и на выходе из полости интенсивность практически равна нулю. При нагревании такого полого шара (рис. 3.1) из его отверстия будет выходить излучение, имеющее сплошной спектр, т.е. в состав его излучения входят длины волн от 0 до  $\infty$ . Излучение Солнца близко к излучению АЧТ (при температуре 6000 К).

Соотношение между плотностями излучения двух тел и их коэффициентами поглощения лучистого потока установлены Кирхгофом. Согласно этому закону отношение спектральной плотности энергетической светимости тела  $M_{e\lambda}$  к его поглощательной способности  $\alpha_\lambda$  не зависит от природы тела, а зависит только от его температуры  $T$  и длины волны излучения  $\lambda$ :

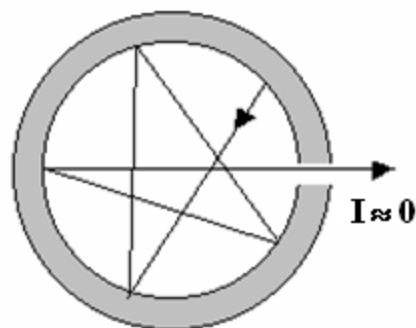


Рис. 3.1. Модель АЧТ

$$\frac{M_{e\lambda 1}}{\alpha_{\lambda 1}} = \frac{M_{e\lambda 2}}{\alpha_{\lambda 2}} = \dots = \frac{M_{e\lambda n}}{\alpha_{\lambda n}} = f(\lambda, T), \quad (3.1)$$

где  $f(\lambda, T)$  – спектральная плотность энергетической светимости АЧТ. Эта функция была получена Максом Планком на основе гипотезы о квантовой природе света и имеет вид:

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (3.2)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $k$  – постоянная Больцмана. На рис. 3.2 приведено спектральная плотность энергетической светимости АЧТ, для различных температур.

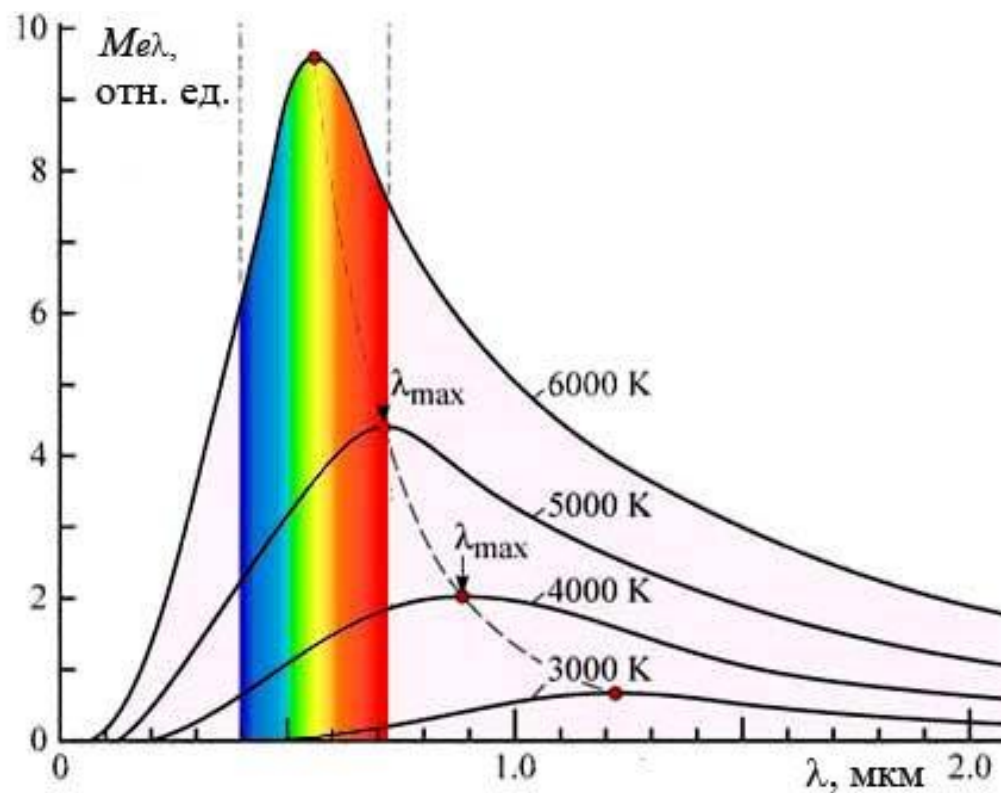


Рис. 3.2. Спектр излучения АЧТ

Из рисунка видно, что при увеличении температуры происходит увеличение энергетической светимости и изменение его спектрального состава. Также видно, что с увеличением температуры происходит смещение в сторону коротких длин волн. Немецкий физик Вильгельм Вин показал, что длина волны, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости АЧТ, обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T}, \quad (3.3)$$

где  $b_1 = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – постоянная Вина, а само уравнение носит название закон смещение Вина.

Австрийские ученые Йозеф Стефан экспериментально, а Людвиг Больцман теоретически установили закономерность, называемую законом Стефана-Больцмана: энергетическая светимость АЧТ  $M_e$  пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры.

$$M_e = \sigma T^4, \quad (3.4)$$

где  $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Видимый спектр излучения у АЧТ становится заметным при его нагревании до 800 К. При дальнейшем увеличении температуры АЧТ в его спектре появляются более короткие излучения – оранжевые, жёлтые, зелёные и т.д. Поверхность Солнца имеет температуру 6000 К, а максимум спектра его излучения находится в зелёной области (~500 нм), и это излучение наиболее комфортно для зрения человека.

### 3.3. Лампы накаливания

В основе использования электрической энергии для целей освещения лежит явление электрической дуги, открытое русским ученым В.В. Петровым в 1802 году. Дуга образовывалась между двумя угольными стержнями при прохождении по ним электрического тока. В 1872 году русский изобретатель А.Н. Лодыгин создал электрическую лампу накаливания, в которой в качестве тела накала служил угольный стержень, заключенный в стеклянный баллон, из которого бы выкачан воздух. В дальнейшем конструкция была усовершенствована Эдисоном и им была разработана технология производства. С целью повышения световой отдачи ламп накаливания в качестве тела накала использовалась металлизированная угольная нить. Уголь обладает недостатком, связанным с высокой скоростью его испарения, и поэтому имеет короткое время жизни при эксплуатации, затем появились лампы с осмиевой и танталовой нитями. Всё изменилось с появлением технологии по производству тонких проволок из вольфрама. Вольфрам является одним из самых тугоплавких металлов с температурой плавления 3660 К, при этом имеет низкую скорость испарения. Поэтому вольфрам и сейчас широко используется в качестве тела накала.

Лампа накаливания состоит из трех основных частей: стеклянной колбы, цоколя и тела накала (нить накала) рис. 3.3. Нить накала в лампах накаливания



Рис. 3.3. Лампа накаливания



изготавливается из вольфрамовой проволоки, чаще всего свитой в спираль. С целью уменьшения тепловых потерь применяется дважды спирализованная вольфрамовая нить.

Электрический ток, проходя через нить накала, нагревает её. Чем выше температура нити накала, тем больший световой поток она излучает. Под влиянием высокой температуры нить накала постепенно испаряется и распыляется, что приводит к ее перегоранию. В результате испарения вольфрамовой нити накала на колбе образуется чёрный налет.

На рис. 3.4 представлено спектральное распределение энергии излучения различных источников. Распределение энергии света от лампы накаливания очень схоже с распределением энергии в спектре АЧТ, поскольку они работают на принципе испускания света за счет тепловой энергии. Цветовая температура ламп накаливания лежит в диапазоне 2700 – 3200 К.

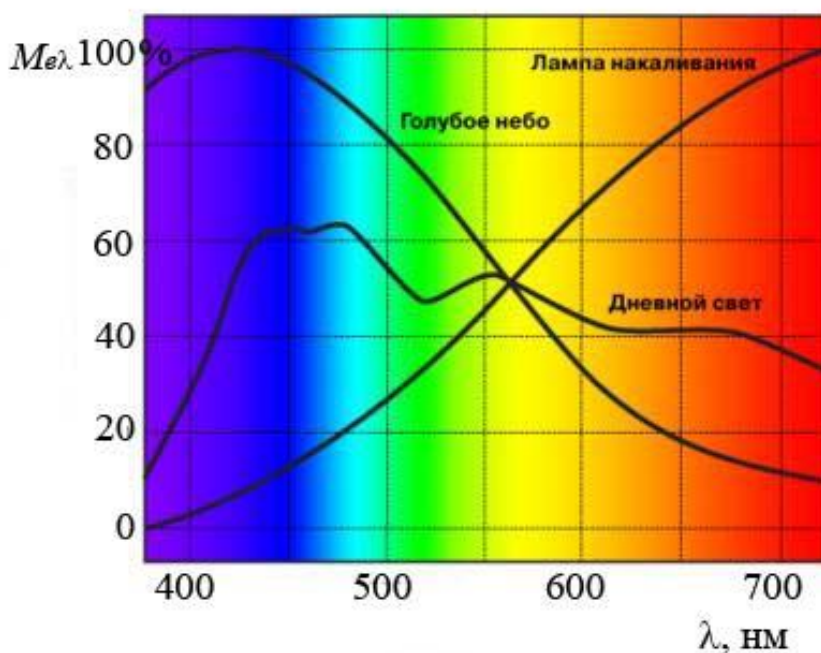


Рис. 3.4. Графики спектральной плотности энергетической светимости различных источников света в видимом диапазоне длин волн

Спектральное распределение энергии лампы накаливания в видимом диапазоне частично зависит от номинальной мощности. В этих лампах имеется значительное выделение энергии в красной области спектра, что придает поверхностям, освещаемым светом ламп накаливания, оранжево-жёлтый оттенок. Из-за низкого уровня интенсивности голубого света освещение лампами накаливания может затруднить различение близких оттенков голубого света. Благодаря большому содержанию жёлтого света при использовании этого источника можно увидеть светло-жёлтые линии на белом фоне.

Как видно из рис. 3.4, лампа накаливания «больше греет, чем светит». Большая часть энергии преобразуется в тепло, и лишь 2-3% потребляемой энергии

преобразуется в свет. Световая отдача ламп накаливания мощностью от 25 до 1000 Вт составляет примерно от 9 до 19 лм/Вт. При этом их средний срок службы составляет примерно 1000 ч.

Несмотря на свои недостатки (низкая светоотдача, малый срок службы), лампы накаливания продолжают использоваться в технике. В лабораториях иногда используют кварцевые лампы, которые представляют собой лампы накаливания с вольфрамовой нитью в кварцевой, а не в стеклянной колбе. Они обладают хорошими цветопередающими свойствами, т.к. работают при более высокой температуре по сравнению с обычными лампами накаливания, т.к. кварцевая оболочка может выдержать более высокую температуру, чем стекло. По этой причине можно изготавливать лампы маленького размера с окружающими их высокоэффективными светоотражающими приспособлениями. В некоторых типах ламп накаливания применяют галогеновый наполнитель, как правило, йод. Поэтому такая лампа называется галогенной (рис. 3.5). В результате работы лампы и газообразного йода в колбе, все улетевшие со спиральной нити вольфрама, возвращаются назад. За счёт этого увеличивается срок работы лампы, также увеличивается её светоотдача (около 25 лм/Вт) и цветовая температура. К концу срока работы, колба остается чистой и прозрачной, так как на ней не оседают атомы спирали. Галогенные лампы благодаря своей компактности высокой яркости нити используются для создания направленного освещения.



Рис. 3.5. Лампа галогенная

### 3.4. Газоразрядные лампы

В отличие от источников теплового излучения, которые обладают сплошным спектром излучения, газоразрядные (газосветные) лампы имеют линейчатый спектр, состоящий из отдельных линий или полос излучения. Каждый газ и пары каждого металла, при электрическом разряде в них, дают излучение своего характерного цвета. Например, неон дает излучение красного цвета, пары натрия – жёлтого цвета. Принцип действия газоразрядных ламп основан на свечении газов и паров металла при электрическом разряде. В этих источниках света летучий металл ртуть или натрий возбуждается электронами, которые ускоряются в пространстве между двумя электродами под действием приложенного к ним напряжения. Столкновения возбужденных газообразных атомов металла вызывают люминесценцию, которая дает много видимого света.

По составу газов или паров, в которых происходит разряд. Газоразрядные лампы делятся на лампы с разрядом: 1) в газах; 2) в парах металлов и 3) в парах металлов и их соединений. По рабочему давлению разрядные лампы делятся на: 1) лампы низкого давления – примерно от 0,1 до  $10^4$  Па; 2) высокого давления – от  $3 \cdot 10^4$  до  $10^6$  Па и 3) сверхвысокого давления – больше  $10^6$  Па; по виду разряда – на лампы: 1) дугового, 2) тлеющего и 3) импульсного разряда.

Области применения газоразрядных ламп определяются тем, что они имеют самую высокую световую отдачу и во много раз больший срок службы по сравнению с лампой накаливания. В связи с тем, что спектральное распределение света от электрических газоразрядных источников с атомами металла не является сплошным в видимом диапазоне, эти источники плохо передают цвет. В связи с этим использование таких источников света для освещения экспозиций нежелательно, обычно они применяются для освещения автострад и мест общественного пользования.

Впервые этот недостаток удалось преодолеть в ртутных люминесцентных лампах низкого давления. Люминесцентные лампы являются электрическими газоразрядными источниками, подобными ртутным и натриевым лампам. Однако их основное различие: внутреннюю часть стеклянной оболочки покрывает люминесцирующий материал (рис. 3.6).



Рис. 3.6. Виды люминесцентных ламп

Люминесценция представляет собой явление, посредством которого вещество может поглощать излучение одной длины волны и переизлучать в других, обычно более длинных волнах. Если, кроме видимого света на такое вещество падает ультрафиолетовое излучение, то некоторая его часть переизлучается в форме видимого света. Если излучение происходит непосредственно после пре-

кращения возбуждения, то явление носит название флуоресценции. Если излучение задерживается, и энергия излучается через определенный промежуток времени, явление называется фосфоресценцией.

Эксперименты с люминесценцией проводились Беккерелем еще в 1867 г., однако лишь только в 1930 г. появилась серийная люминесцентная лампа. Их появление ознаменовало собой новый, подлинно революционный этап в развитии разрядных источников света. Впервые были созданы разрядные лампы, дающие излучение с непрерывным спектром практически любого состава и обладающие при этом световой отдачей и сроком службы, в несколько раз превышающими световую отдачу и срок службы ламп накаливания. Световая отдача современных люминесцентных ламп достигает 85–104 лм/Вт, срок службы – до 60 тыс. ч. В настоящее время люминесцентные лампы – наиболее массовые разрядные источники света.

Люминесцентные лампы применяются главным образом в репродукционных фотоаппаратах, устройствах для просмотра изображений на оригиналах и фотоформах, в монтажных столах. Лампы с белым, близким к дневному, светом используют в репродукционных работах, связанных с цветными и чёрно-белыми оригиналами. Цветовая температура таких ламп 6500 К. На рис. 3.7 показан спектр излучения подобной люминесцентной лампы. Такие лампы излучают преимущественно в видимом диапазоне.

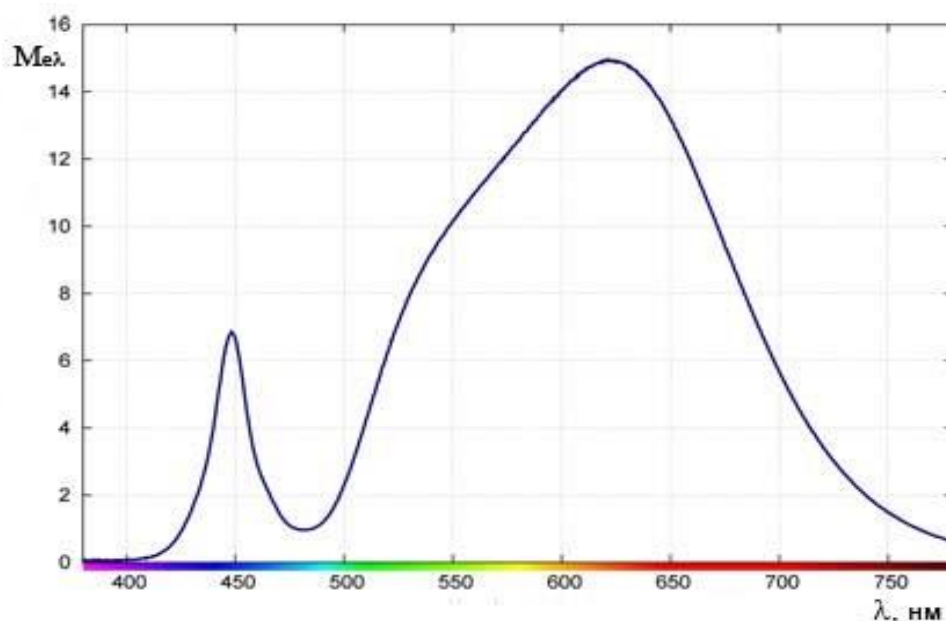


Рис. 3.7. Спектр излучения люминесцентной лампы

Для уличного освещения городов, дорог, промышленных объектов, как было сказано выше, используется натриевая газоразрядная лампа – электрический источник света, светящимся телом которого служит газовый разряд в парах натрия. Преобладающим в спектре таких ламп является резонансное излучение натрия. Такие лампы дают яркий оранжево-жёлтый свет. Натриевые лампы имеют очень высокую светоотдачу – до 100 лм/Вт. Данный тип ламп очень популярен среди

людей занимающихся выращиванием растений, так как излучаемый ими свет почти полностью восполняет потребности растения, поскольку эти лампы излучают достаточное количество красной части спектра.

Широкое применение в архитектурной подсветке, световой рекламе и дизайнерской интерьерной подсветке получили неоновые лампы. Это лампы холодного катода. Они получили такое название потому, что работают на электродах, в которых отсутствует нить накаливания, а выделение тепла в процессе работы незначительно. Именно поэтому лампы холодного катода являются энергосберегающими, поскольку часть энергии, уходящей в тепло, минимальна. Световая отдача зависит от цвета, у белого свечения она составляет 50–80 лм/Вт. Неоновые лампы обладают большим сроком службы до 80000 часов.

Недостатком газоразрядных ламп является некоторая сложность их включения в сеть, связанная с особенностями разряда. Для его зажигания требуется более высокое напряжение, чем для устойчивого горения. Для обеспечения устойчивого горения в цепь каждой лампы необходимо включать балласт, ограничивающий ток разряда требуемыми пределами. Другой недостаток разрядных ламп с парами веществ, наполняющих разрядную колбу, обусловлен зависимостью их характеристик от теплового режима, поскольку температура определяет давление паров рабочего вещества лампы. Номинальный режим устанавливается в них только спустя некоторое время после включения. Повторное зажигание ламп с разрядом в парах металла при высоком и сверхвысоком давлении без специальных приёмов возможно только по истечении некоторого времени после выключения.

### 3.5. Светодиоды и лазеры

Светодиодные и лазеры сравнительно «молодые» источники света. Светодиод является полупроводниковым источником света, в котором излучение возникает на полупроводниковом переходе в результате рекомбинации электронов и дырок [19]. Такие излучатели изготавливают из полупроводниковых материалов высокой частоты, добавляя незначительное количество примесей. Данные примеси создают избыток «дырок» (тип p) или электронов (тип n). На границе раздела материалов p и n типа образуется полупроводниковый p-n переход.

Если к такому переходу приложить небольшое напряжение в несколько вольт, к n материалу отрицательное, а к p положительное, то электроны и «дырки» начнут перемещаться навстречу друг другу. В зоне контакта при рекомбинации они будут испускать фотоны [19]. Спектр излучения линейчатый и зависит от материала и вводимой примеси.

В начале 60-х годов XX века несколько зарубежных компаний начали производство светодиодов с красным цветом излучения на основе полупроводниковых материалов III и V групп таблицы Менделеева – галлия, мышьяка, фосфора (Ga, As, P). Эти светодиоды имели световую отдачу 0,1–0,2 лм/Вт, световой поток не более 0,02 лм и стали очень широко использоваться в различной аппаратуре как индикаторные элементы. Позже появились светодиоды других цветов: зеленый,

желтый [20]. Подлинная революция в производстве светодиодов произошла в начале 90-х годов, когда, благодаря работам Ж.И. Алферова и других, были получены многопроходные двойные гетероструктуры (МДГС) – GaAlAs, AlInGaAs, AlInGaP. Световая отдача красных и зеленых светодиодов увеличилась в 100 раз и достигла значений 10–20 лм/Вт. В 1994 г. японской фирмой Nichia были созданы светодиоды на основе нитрида галлия (GaN) и его твердых растворов (InGaN, AlGaN) с синим цветом излучения (470 нм). К 2004 году световая отдача светодиодов на основе МДГС достигла значений 30–50 лм/Вт. [20]

Светодиодный источник света состоит из (рис. 3.8): излучающего элемента, роль которого играет полупроводниковый кристалл p-n перехода, линзы (рассеивателя), которая фокусирует свет от кристалла и защищает кристалл от влаги и коррозии, контактов для подключения к источнику питания (это могут быть стандартные цоколи E27, E14). Энергия, потребляемая светодиодом, частично преобразуется в свет, а частично в тепло, нагревая его. Для отвода тепла в устройство светодиодной лампы часто включают радиатор. В бытовых целях или в качестве источников света используются светодиоды белого свечения. Получают белое свечение тремя способами:

1. Путем аддитивного смешивания красного, зеленого и синего цветов. В этом случае получается наибольшая эффективность, но количество контактных выводов увеличивается в три раза, что усложняет конструкцию.

2. За счёт преобразования синего свечения светодиода с излучением люминофора (например, жёлто-зелёного или зелёно-красного).

3. За счёт смешения излучения от 3 люминофоров (красного, зелёного и синего). Светодиод в этом случае излучает в области ультрафиолета. В этом случае получается всего два контактных вывода, но большие потери на преобразование излучения в люминофорах.

Отличительной особенностью светодиодных ламп является: низкая потребляемая мощность, слабый нагрев, срок службы. Срок службы большинства современных светодиодов в номинальном режиме превышает 50000 часов. По этому параметру светодиоды превосходят все остальные типы источников света.

Лазеры представляют собой генераторы оптического излучения, обладающего уникальными свойствами: 1) высокой когерентностью в пространстве и во времени, 2) исключительно узкой направленностью (расходимость пучка может быть близкой к дифракционному пределу), 3) огромной концентрацией мощно-



Рис. 3.8. Устройство светодиодной лампы

сти (до  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме и до  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> в импульсе), 4) высокой степенью монохроматичности ( $\Delta\lambda = 10^{-9}$  нм при  $\lambda = 500$  нм, 5) способностью фокусироваться в исключительно малые объемы порядка  $\lambda^3$  [20].

Принцип действия лазеров основан на теории А. Эйнштейна о вынужденном излучении. В 1916 г. Эйнштейн показал, что если на атом, находящийся в возбужденном состоянии, действует внешнее излучение с частотой, удовлетворяющей условию перехода атома из возбужденного состояния в основное, то возникает вынужденный переход в основное состояние. При этом происходит излучение атомом фотона дополнительно к тому фотону, под действием которого произошел переход. А. Эйнштейн и П. Дирак показали, что вынужденное излучение строго когерентно с вынуждающим, т.е. оно имеет такую же частоту, фазу, поляризацию и направление излучения. Для обеспечения вынужденного излучения необходимо создать специальные условия, при которых в среде находилось бы достаточное количество возбужденных атомов. Такая среда называется активной. Излучение с частотой, соответствующей переходу атома из возбужденного в невозбужденное состояние, проходя через активную среду, вызывает лавину вынужденных фотонов, «летающих» строго в одном направлении, и вместо обычного ослабления получается усиление излучения в направлении падающего луча.

По типу активного вещества лазеры делятся на: газовые, твердотельные, жидкостные и полупроводниковые. Лазеры генерируют излучение высокой мощности, испускаемое с единичной площади в единичном телесном угле, т.е. являются источниками очень высокой яркости. Например, в лазере на стекле с неодимом с дифракционным ограничением расходимости пучка энергетическая яркость достигает  $10^{17}$  Вт/(см<sup>2</sup>·ср).

### 3.6. Прожекторы и светильники

Всякое устройство, заключающее в себе источник света и предназначенное для использования излучаемого им светового потока для освещения или световой сигнализации, называется световым прибором. Световые приборы делятся на **светильники** и **прожекторы**. Световой прибор, предназначенный для освещения рабочих поверхностей на сравнительно небольших расстояниях и концентрирующей световой поток источника света внутри значительного телесного угла, называется светильником. В прожекторах световой поток источника света концентрируется внутри относительно малых телесных углов. Прожекторы предназначены для освещения далеких предметов или для световой сигнализации на значительные расстояния [19]. Источники света обычно снабжаются оптическими устройствами, создающими необходимое светораспределение. Перераспределение светового потока источника света можно осуществить путем отражения его от зеркальных поверхностей, преломления лучей призмами и линзами, а также при помощи отражающих и преломляющих свет элементов. Например, чтобы создать остронаправленное излучение, используют параболический

отражатель (рис. 3.9), а в его фокус  $F$  помещают источник света очень высокой яркости – галогенную или ксеноновую лампу накаливания.

Распределение силы света в пространстве, излучаемой световым прибором, характеризуется кривой силы света. Это зависимость силы света  $I$  от угла направленности  $\alpha$ . Этот угол отсчитывается от направления оси симметрии светового поля. Каждая точка на кривой определяет в выбранном масштабе величину силы света в заданном направлении от условного источника, который испускает поток 1000 лм. КПД светильников – это отношение падающего светового потока на рабочую поверхность к полному световому потоку. У современных светильников она достигает величины  $\sim 0,8 - 0,85$ . Основные типы кривых силы света изображены на рис. 3.10 [21].

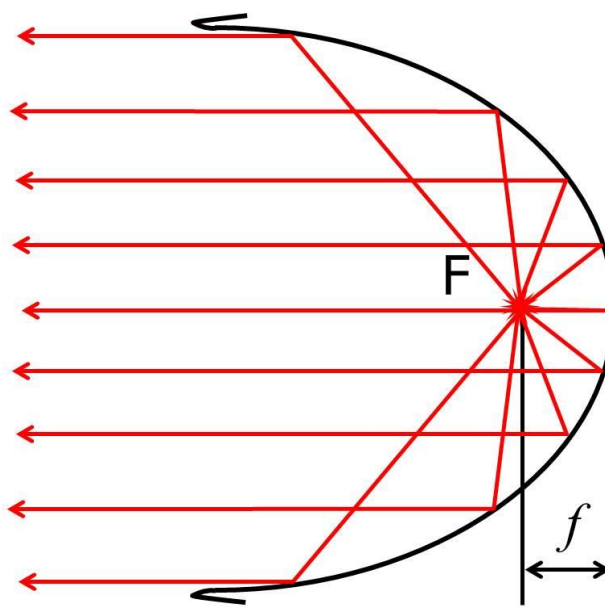


Рис. 3.9. Формирование светового поля с помощью параболического отражателя

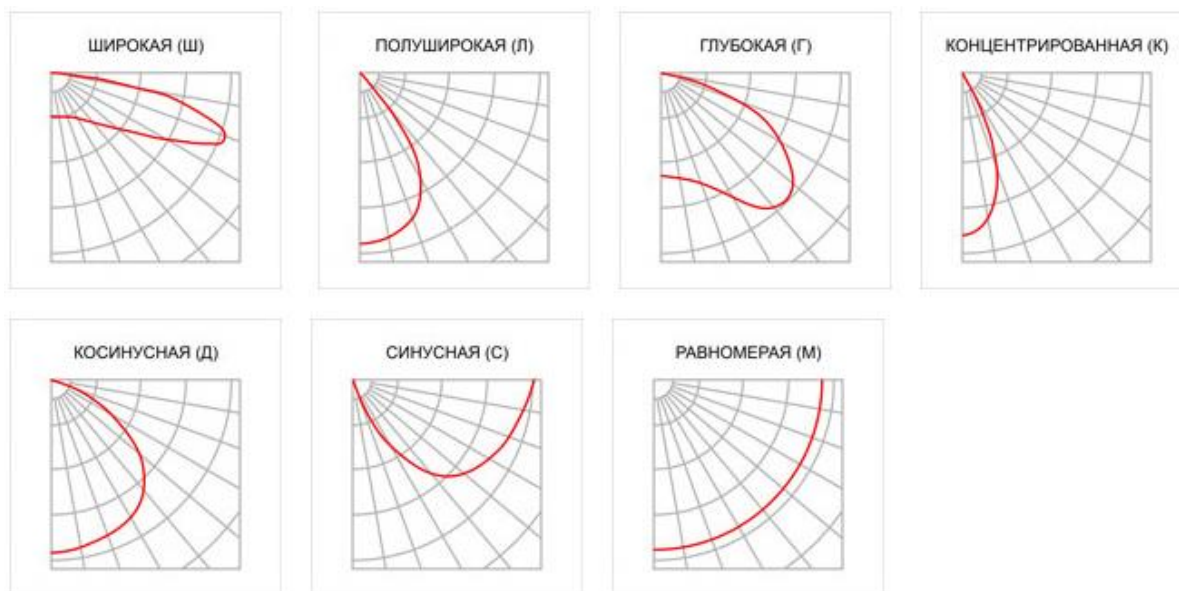


Рис. 3.10. Типовые кривые силы света



## Приложение 4. Колориметрия

### 4.1. Основные понятия колориметрии

Существуют две принципиально различные системы оценки и представления цвета. Первая – это колориметрическая система, в основе которой лежат основные излучения, смешивая которые, воспроизводят всё многообразие цветов. Некоторые колориметрические системы имеют международную стандартизацию. Вторая – это система спецификации цветов, где цвет имеет материальный носитель в виде окрашенной поверхности и расположенный в определенном порядке. Системы спецификации стандартизуются национальными службами стандартизации [22].

Колориметрия – наука о методах измерения и количественном выражении цвета [23]. Помимо измерения цвета колориметрия изучает также вопросы его систематизации и математического описания. Метрология колориметрии задает условия наблюдения и измерения координат цвета. Если координаты двух цветов совершенно одинаковы, то и цвета одинаковы. Однако колориметрия не может дать ответ, насколько точно должны совпадать координаты цвета, чтобы цвета не различались визуально. Цвет – ощущение, воспринимаемое мозгом, когда свет определенной яркости и конкретной длины волны попадает на сетчатку глаза [24].

Понятие цвета как сложного ощущения многообразно. Цвет оценивается количественно – **светлотой**, качественно – **цветностью**. Светлота – это психологическое восприятие яркости излучения, отражения или пропускания света веществом, материальной средой или поверхностью предмета [25]. Цвета, которые характеризуются только количественно, называются ахроматическими, т.е. не несущими окраски (белый, серый, чёрный). Остальные цвета называются хроматическими – они несут окраску и оцениваются как количественно, так и качественно. Цветность в свою очередь характеризуется цветовым тоном и насыщенностью [22]. Представление о светлоте и цветности можно показать на простом примере, возьмем поверхность одного цвета, часть поверхности поместим под прямой солнечный свет, а часть – в тень. Обе части ее имеют одинаковую цветность, но разную светлоту. Как говорилось ранее, для описания цветности используют два параметра: **насыщенность** и **цветовой тон**. Цветовой тон – это качественная субъективная характеристика цвета, которая познается через ощущения и определяется нами как – синий, зеленый, красный цвет и т.д. В колориметрии за основные цвета для измерительных целей приняты следующие монохроматические излучения (спектральные линии паров ртути):

- для красного (**R** - red)  $\lambda_R = 700$  нм,
- для зелёного (**G** - green)  $\lambda_G = 546,1$  нм,
- для синего (**B** - blue)  $\lambda_B = 435,8$  нм.

Насыщенность цвета – это вторая качественная субъективная характеристика цвета, которая определяется интенсивностью ощущения цветового тона. Насыщенность цвета ассоциируется в нашем сознании с количеством красящего вещества, например, с его концентрацией в краске, а также с его чистотой. Она характеризует степень «разбавления» и цветового тона белым цветом. Например, ярко-красная (насыщенная) краска может быть разбавлена белой краской (белилами, мелом), и насыщенность становится меньше.

#### 4.2. Субтрактивное и аддитивное воспроизведение цвета

Синтезом цвета называется получение необходимого цвета путем сложения других. Существует два основных типа сложения: аддитивное (сложение) и субтрактивное (вычитание). В первом случае при смешении излучений их действие складывается, а во втором, наоборот, каждая среда поглощает определенную часть излучений, вычитая их из общего пучка, направленного на смесь.

Аддитивный синтез используется в телевизорах, мониторах и проекционных системах. Субтрактивный синтез цвета применяется повсеместно там, где для получения цвета используются окрашенные среды. Особенно он важен при воспроизведении цветных оригиналов в полиграфии и цветной фотографии.

**Аддитивный синтез.** Хорошо известно, что смешение красного (**R**), зеленого (**G**) и синего (**B**) – RGB – позволяет получить другие цвета. Эти цвета называют основными или базовыми. Поэтому чтобы провести аддитивный синтез, необходимо иметь красный, зелёный, синий световые пучки. Они могут быть получены либо непосредственно от источника, испускающего такие пучки, либо от обычных тепловых источников света с установленными соответствующими фильтрами. При смешении двух основных цветов, а также при смешении двух основных с добавлением третьего основного результат осветляется. Так при смешении красного и зелёного получается жёлтый цвет, зелёного и синего – голубой. Синий и красный дают пурпурный. Если смешиваются одинаковые по количеству излучения всех трёх цветов, то в результате получается белый цвет (рис. 4.1).

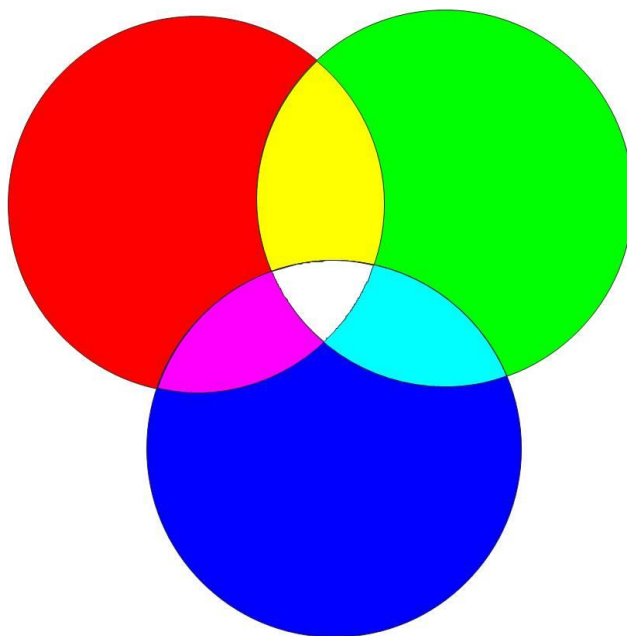


Рис. 4.1. Смешение базовых цветов RGB

Существует несколько способов аддитивного сложения цветов:

- 1) Одновременное смешение трёх окрашенных пучков света на белом экране;

2) Смещение излучений с использованием явления инерции нашего зрения, т.е. запаздыванием нашей зрительной системы относительно движущегося предмета (светового потока);

3) Метод пространственного смешения световых потоков. Пространственное смешение световых потоков достигается за счёт особенностей нашего зрения, в случае, когда расстояние между соседними источниками света меньше разрешающей способности нашего глаза [22].

Аналогично рассмотрим один из вариантов аддитивного синтеза цвета с использованием трёх проекторов и белого экрана (рис. 4.2). Основные цвета получаются с помощью синего, зелёного и красного светофильтров, т.е. вычитанием из белого света всех длин волн кроме длины волны каждого светофильтра, т.е. основные излучения в этой схеме получаются субтрактивно. Для дозирования основных излучений используются оптические клинья. На экране смешиваются световые пучки, пропускаемые светофильтрами и оптическими клиньями, в результате чего образуются заданные цвета. Мощности основных излучений, которые называются единичными, подбираются таким образом, чтобы с выведенными клиньями на экране получался белый цвет (ахроматический).

Рассмотрим законы аддитивного синтеза цвета, которые были сформулированы Г. Грасманом в 1853 г.

**Первый закон (закон трёхмерности):** любой цвет однозначно выражается тремя другими, если они линейно независимы. Линейная независимость заключается в том, что нельзя получить ни один из основных цветов смешением двух других.

**Второй закон (закон непрерывности):** при непрерывном изменении излучения цвет изменяется непрерывно. Из этого закона понятен основной принцип измерения цвета: не существует такого цвета, к которому невозможно подобрать бесконечно близкий.

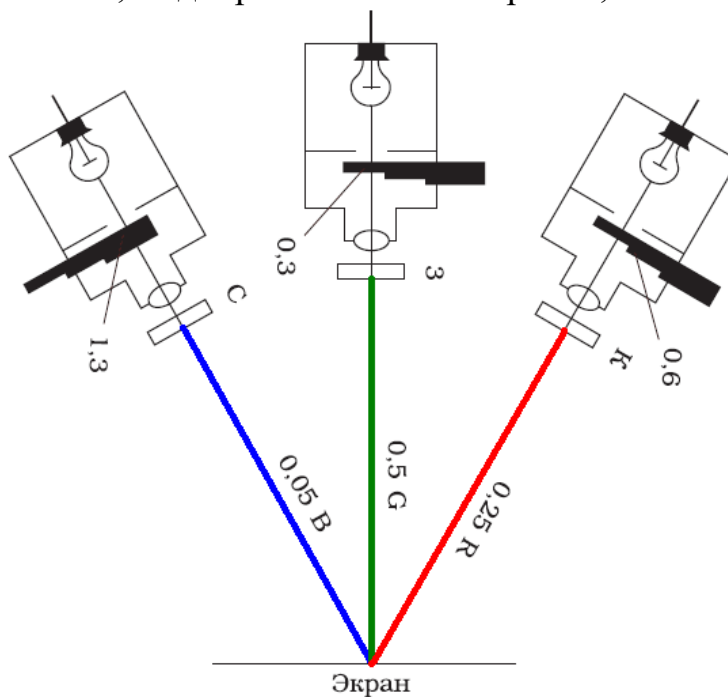


Рис. 4.2. Схема аддитивного синтеза цвета:  
 0,6; 0,3; 1,3 – плотности модулятора (оптического клина);  
 С; З; К – синий, зелёный и красный светофильтры;  
 0,25В; 0,5G и 0,05R – количества основных излучений, попавших на экран

**Третий закон (закон аддитивности):** цвет смеси излучений зависит только от их цветов, но не от спектрального состава. Это очень важный закон для теории цвета, признающий аддитивность «цветовых уравнений». А именно, если цвета нескольких излучений описаны цветовыми уравнениями, то цвет смеси излучений выражается суммой этих уравнений.

**Субтрактивный синтез цвета.** Отражаемые цвета – это цвета, которые сами не излучают, а используют белый свет освещения (несущий свет), вычитая из него определенные цвета, т.е. субтрактивные цвета.

С помощью субтрактивного синтеза можно получить новый цвет путём смешения окрашенных сред. Так же как в аддитивном синтезе, для получения заданного цвета необходимо регулировать основные излучения. Главным инструментом такого регулирования служат краски трёхцветного субтрактивного синтеза цвета. **C** (cyan), **M** (magenta), **Y** (yellow) (синий, пурпурный и жёлтый) – основные краски субтрактивного синтеза. На рис. 4.3. изображена схема управления основными излучениями с помощью субтрактивного синтеза.

При печати с использованием печатных красок этих цветов они поглощают красную, зелёную и синюю зоны спектра белого света. Таким образом, большая часть видимого цветового спектра может быть воспроизведена на оттиске.

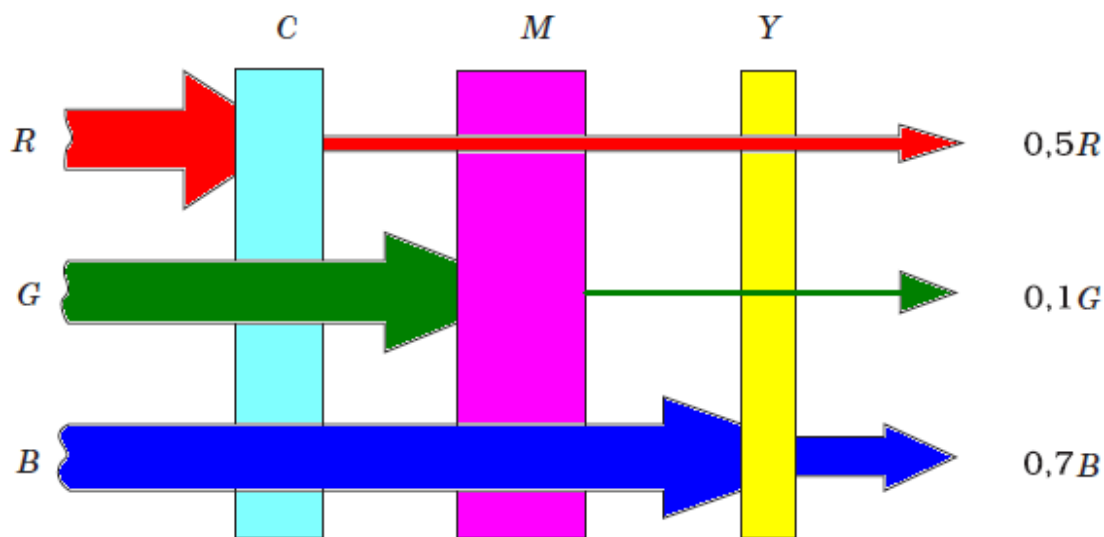


Рис. 4.3. Схема управления основными излучениями при субтрактивном синтезе цвета

При смешениях двух субтрактивных прозрачных красок результирующий цвет затемняется, а при смешении всех трёх должен получиться чёрный цвет. Проблема заключается в чистоте цвета реальных красок. Данная модель описывает реальные полиграфические краски, которые далеко не так идеальны, как цветные излучения. Они имеют примеси, поэтому не могут полностью перекрыть весь видимый цветовой диапазон спектра, а это приводит к тому, что смешение трёх базовых печатных красок, которое должно давать чёрный цвет, даёт тёмно-коричневый, а не истинно чёрный цвет. Для компенсации этого недостатка в число основных триадных полиграфических красок вводят чёрную краску **К** (black). Такая цветовая система называется **СМУК** (рис. 4.4).

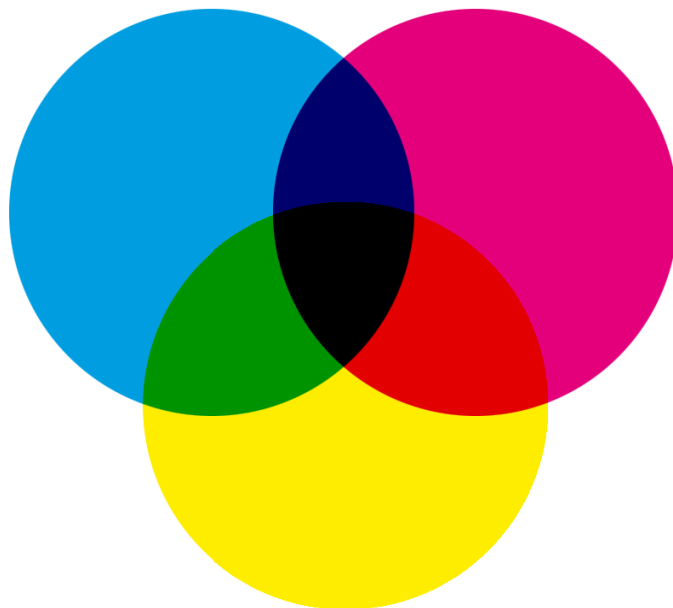


Рис. 4.4. Смешение базовых цветов СМУК

### 4.3. Диаграмма цветности

Анализируя способы синтеза цвета в предыдущем параграфе, можно заключить, что цвет можно представить в виде цветового уравнения. Запишем соответствующее уравнение:

$$Ц = R\vec{R} + G\vec{G} + B\vec{B}. \quad (4.1)$$

где  $Ц$  – это цвет,  $R, G, B$  – координаты цвета (яркость соответствующих компонент),  $\vec{R}, \vec{G}, \vec{B}$  – основные цвета колориметрической системы, в данном случае RGB. Введём понятия координат цветности:

$$r = \frac{R}{m}; g = \frac{G}{m}; b = \frac{B}{m}. \quad (4.2)$$

где  $m = R + G + B$  сумма координат цвета (суммарная яркость). Тогда можно записать нормированное уравнение цветности. Оно дает представление о цвете вне зависимости от его яркости.

$$Ц = r\vec{R} + g\vec{G} + b\vec{B}. \quad (4.3)$$

Согласно третьему закону аддитивного синтеза «цвета нескольких излучений описаны уравнениями, то цвет смеси излучений выражается суммой этих урав-

нений». Таким образом, с помощью цветовых уравнений легко находить результирующий цвет от двух и более излучений различного цвета (различных длин волн). Для этого необходимо покомпонентно сложить уравнения от каждого излучения:

$$C = (R_1 + \dots + R_n) \vec{R} + (G_1 + \dots + G_n) \vec{G} + (B_1 + \dots + B_n) \vec{B}. \quad (4.4)$$

При выполнении расчётов, часто оказываются полезными удельные координаты  $\bar{r}$ ,  $\bar{g}$ ,  $\bar{b}$ , которые получаются путём нормировки подобно (4.2).

Применительно к цвету устоявшимся понятием является трёхмерное представление о цветовом пространстве и его строении. В колориметрии цвет оценивается по его координатам. Эти координаты получают с учётом цветовой температуры источника света, его цветовых стимулов, т.е. в соответствии с математической моделью нашего зрения. Координаты цвета могут быть абсолютными, учитывающими мощность реального источника света, или относительными, т.е. отнесенными к 100%, безразмерными. В полиграфии применяются относительные величины.

Согласно [22], аддитивные колориметрические системы бывают трёх типов: 1) основные реальные, типа **RGB**; 2) основные нереальные, типа **XYZ** или **UVW**; 3) системы восприятия типа **LAB**. Эти системы не имеют основных, так как являются производными от колориметрических систем второго типа **XYZ**. Цветовое пространство международных колориметрических систем, выраженное в относительных величинах, имеет некие признаки, лежащие в основе их построения. Перечислим некоторые из них [22].

1. Так как цвет выражается тремя независимыми переменными (векторами основных излучений, или цветовыми стимулами), то цвет считается трёхмерным.

2. Цветовое тело всех реальных цветов (это часть цветового пространства) строится вокруг ахроматической оси, где чёрный цвет – внизу, белый – вверху. Причём для самосветящихся объектов светлота (brightness) меняется от невидимой, до слепящей. Для несамосветящихся объектов светлота (lightness) меняется от минимальной (чёрный цвет) до максимальной (белый цвет).

3. Последовательность цветов определяется спектром. Интервал между красным и фиолетовым цветами занимает пурпурный цвет. Геометрически это замкнутая фигура.

4. Чем дальше от ахроматической оси находится цвет, тем он более насыщен. Ахроматические цвета не имеют цветности и насыщенности, они характеризуются только светлотой.

5. Цвета одного цветового тона находятся на полуплоскостях, проходящих через ахроматическую ось (справа или слева), и называются вертикальными сечениями цветового тела.

6. Цветовой тон в вертикальном сечении цветового тела не изменяется, меняется цвет за счет изменения насыщенности в направлении от ахроматической оси

до спектрального цвета. Кроме этого, цвет также меняется из-за изменения светлоты в направлении снизу-вверх, параллельно ахроматической оси.

Рассмотрим цветовое пространство. Цветовое пространство – это форма геометрического представления различных цветов. Чтобы упорядочить цвета и иметь возможность выполнения над ними различных математических операций в цветовом пространстве необходимо ввести систему цветовых координат. Началом координат служит точка, соответствующая черному цвету. В этой точке свет отсутствует, воспринимаемый колбочками, а значит, и цвет. Система цветовых координат полностью определяется заданием координатных осей и выбранным на них масштабом. Основное ограничение при выборе основных излучений является обязательная линейная независимость цветов. В остальном выбор основных излучений, направления осей, масштаба на осях произволен [22].

Координаты цвета кривых сложения необходимо пересчитать в координаты цветности. Затем, нанеся координаты цветности кривых сложения на единичную плоскость, получим фигуру, называемую **локусом** (от лат. **locus** – место) (рис. 4.5). Для определения качественных характеристик цвета пользуются диаграммой цветности **rg**, изображённой на сетке прямоугольных.

Данная диаграмма характеризуется следующими колориметрическими свойствами:

- 1) белая точка **E** имеет координаты (0,33; 0,33);
- 2) насыщенность цветов возрастает от белой точки к локусу;
- 3) на прямой линии, соединяющей белую точку с локусом, находятся координаты цветов постоянного цветового тона;
- 4) локус является границей самых насыщенных (спектральных) цветов.

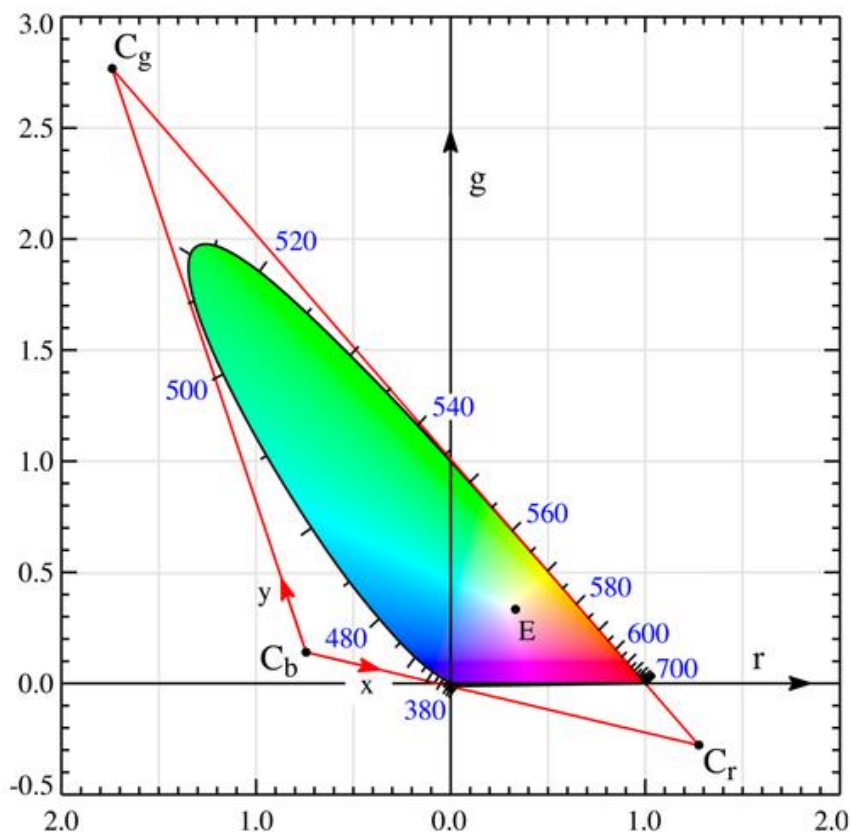


Рис. 4.5 Диаграмма цветности **rg**

#### 4.4. Колориметрические системы СИЕ

Для многих отраслей производства, в том числе для полиграфии и компьютерных технологий, необходимы объективные методы описания и обработки цвета. В 1931 г. международная комиссия по стандартизации, известная как Международная осветительная комиссия (Commission International de l'Eclerage), сокращенно называемая СИЕ, предложила систему колориметрии, которая и применяется с тех пор с небольшими изменениями до наших дней. Выбор основных цветов этой системы осуществляется исходя из следующих требований:

- 1) выбранные основные должны легко воспроизводиться;
- 2) каждый из выбранных основных должен возбуждать по возможности лишь одну группу цветоощущающих рецепторов.

Поскольку на тот момент наиболее воспроизводимыми считались излучения газоразрядных ламп, а с помощью светофильтров можно легко выделялись монохроматические излучения, то в первой колориметрической системе в качестве основных были выбраны цвета излучений ртутной лампы. Цвета этих излучений соответствовали цветам R (red), G (green), B (blue), а колориметрическая система соответственно получила название **CIE RGB**.

Экспериментально было установлено, что цвет будет белым при соотношении яркостей основных излучений  $R:G:B = 1:4,59:0,06$  и энергетических яркостей соответствующих монохроматических основных  $R:G:B=1:0,0191:0,0139$ . Соотношения основных излучений называют яркостными коэффициентами, как правило, их обозначают  $L_R = 1$ ;  $L_G = 4,59$ ;  $L_B = 0,06$ . Они показывают, какая часть общей яркости приходится на основные излучения  $R$ ,  $G$ ,  $B$ .

Для перехода от энергетических единиц к световым за единицы количества основных излучений **R**, **G**, **B** принимают не яркостные коэффициенты, а яркостные единицы:  $B_R$ ,  $B_G$ ,  $B_B$ . Эти величины больше яркостных коэффициентов в 680 раз [22]:

$$\begin{aligned} B_R &= 680 L_R = 680 \text{ кд/м}^2; \\ B_G &= 680 L_G = 3121 \text{ кд/м}^2; \\ B_B &= 680 L_B = 41 \text{ кд/м}^2. \end{aligned} \tag{4.5}$$

Так как яркость пропорциональна световому потоку, то можно считать, что при соотношении световых потоков  $\Phi_R:\Phi_G:\Phi_B = 1:4,59:0,06$  будет также получено излучение белого цвета. Например, чтобы получить белый цвет нужно смешать свет от трёх источников основных излучений со световыми потоками:  $\Phi_R = 680$  лм,  $\Phi_G = 3121$  лм,  $\Phi_B = 41$  лм.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ СПИСОК

1. Гершун, А.А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. Сборник статей / А.А. Гершун. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 400 с.
2. АО «Ленинградское оптико-механическое объединение»  
<https://www.lomo.ru>
3. НПО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»  
<http://goi.ru>
4. АО «Лыткаринский завод оптического стекла» <http://lzos.ru/>
5. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
6. Русинов, М.М. Техническая оптика: учебное пособие для вузов / М.М. Русинов. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 488 с.
7. Прикладная оптика: учебное пособие / Под ред. Н.П. Заказнова – СПб: Изд-во «Лань», 2009. – 320 с.
8. Агапов, Н.А. Прикладная оптика: учебное пособие / Н.А. Агапов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 333 с.
9. Бахолдин, А.В. Теория и методы проектирования оптических систем. Учебное пособие / А.В. Бахолдин, Г.Э. Романова, Г.И. Цуканова. Под редакцией А.А. Шехонина – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2011. – 104 с.
10. Федосов, И.В. Геометрическая оптика / И.В. Федосов. – Саратов: Сателлит, 2008. – 92 с.
11. Ландсберг, Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов / Г.С. Ландсберг. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 848 с.
12. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т. 4. Оптика: учеб. пособие для физ. специальностей вузов в 5 т. / Д.В. Сивухин. – М.; Долгопрудный: ФИЗМАТЛИТ: Изд-во МФТИ, 2002. – 791 с.
13. ГОСТ 25706-83. Лупы. Типы, основные параметры. Общие технические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 4 с.
14. ГОСТ 8.332-2013. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
15. ГОСТ 10691.0-84. Материалы фотографические чёрно-белые на прозрачной подложке. Метод сенситометрического испытания. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 14 с.

16. ГОСТ 10691.6-88. Пленки чёрно-белые фототехнические, плёнки для научных исследований и промышленных целей. Метод определения чисел светочувствительности. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 6 с.
17. ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров. – М.: Стандартинформ, 2014. – 43 с.
18. Щепина, Н.С. Основы светотехники / Н.С. Щепина – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.
19. Шеховцов, В.П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов / В.П. Шеховцов – М.: Форум, 2009. – 160 с.
20. Справочная книга по светотехнике / Под ред. А.Ю. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
21. ГОСТ Р 54350-2015 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015. – 45 с.
22. Шашлов, А.Б. Основы светотехники: учебник для вузов / А.Б. Шашлов. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Логос, 2011. – 256 с.
23. Большой энциклопедический словарь. Физика. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохоров 4-е изд. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 943 с.
24. Научно-технический энциклопедический словарь. – <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ntes/5387/ЦВЕТ>.
25. Стефанов, С. Цвет READY-MADE или теория и практика цвета / С. Стефанов, В. Тихонов. – М.: РепроЦЕНТР, 2005. – 320 с.