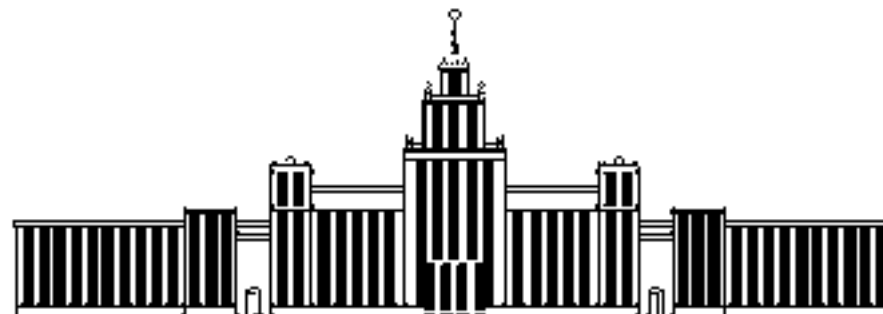

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

628.9(07)
Л42

А.Я. Лейви, А.А. Шульгинов

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

Учебное пособие

**Челябинск
2016**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Институт естественных и точных наук
Кафедра физической электроники

628.9(07)
Л42

А.Я. Лейви, А.А. Шульгинов

ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

Учебное пособие

Под редакцией А.А. Шульгинова

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2016

УДК 628.9(075.8)
Л42

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

*Рецензенты:
д.ф.-м.н. А.Е. Майер, к.ф.-м.н. В.С. Красников*

Лейви, А.Я.
Л42 Основы светотехники: учебное пособие / А.Я. Лейви, А.А. Шульгинов; под ред. А.А. Шульгинова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 71 с.

В пособии изложены основные представления о природе излучения, источниках света, оптических средах и фотоприёмниках, о теории цветового зрения, о фотометрии и колориметрии, а также о принципах работы оптических приборов, которые применяются в светотехнике.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки «Технология полиграфического и упаковочного производства». Пособие составлено в соответствии с требованиями ФГОС 3-го поколения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (научно исследовательская работа ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), проводимая в рамках государственных заданий № 1030 (№ 2014105-ГЗ)).

УДК 628.9(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Светотехника – область науки и техники, предметом которой являются исследование принципов и разработка способов генерирования, пространственного перераспределения и измерения характеристик оптического излучения, а также преобразование его энергии в другие виды энергии и использование в различных целях. Светотехника включает в себя также конструкторскую и технологическую разработку источников излучения и систем управления ими, осветительных, облучательных и светосигнальных приборов, устройств и установок, нормирование, проектирование, монтаж и эксплуатацию светотехнических установок [1]. В настоящее время светотехника – это наука о свойствах света, возможностях и принципах его использования, а также о новых альтернативных источниках получения света. Кроме того, светотехника изучает воздействие естественного и искусственного освещения на вещества и живые организмы. Светотехника как наука плотно связана с энергетикой, электроникой, оптикой, архитектурой и полиграфией.

Курс «Основы светотехники» предназначен, в первую очередь, для студентов, обучающихся по программе «Технология полиграфического и упаковочного производства». Полиграфия тесно связана со светотехникой, т.к. практически в любой технологии, используемой в полиграфическом производстве, производится запись изображения с помощью оптического излучения.

Данное учебное пособие является дополнением известных учебников по основам светотехники и технической оптике [2–6]. Оно разбито на 6 глав, которые включают в себя изложение современных представлений о природе света, перечень основных световых и энергетических характеристик излучения, законы преобразования оптических излучений различными средами, описание приёмников и источников излучений. Особое место в пособии занимает описание методов цветовых измерений и принципов работы различных оптических устройств, которые применяются, в том числе, в полиграфии.

ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ИЗЛУЧЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

§ 1. Современное представление о природе света

Конец XIX и начало XX века ознаменовались рядом великих открытий, которые в корне изменили наше представление о законах природы. К числу таких открытий можно отнести создание теории электромагнитного поля, сделанное английским физиком Джеймсом Максвеллом в конце XIX века. Стало ясно, что **свет – это электромагнитная волна**, длина которой определяет цвет (рис. 1.1). Теория подтверждается многими опытами, в частности, опытом Т. Юнга, и данное поведение света в виде электромагнитной волны наблюдается в таких физических явлениях, как дисперсия, дифракция и интерференция света.

Однако многие другие физические явления, связанные со све-

том, одной волновой теорией объяснить нельзя. К таким явлениям относится, например, фотоэффект – явление испускания электронов из вещества под воздействием света. Существование красной границы фотоэффекта – максимальной длины волны падающего света, при которой возможен фотоэффект – оказалось, невозможно объяснить, исходя из волновой природы света. В начале XX века Макс Планк и Альберт Эйнштейн выдвинули гипотезу о квантовой природе света. Согласно этой концепции **свет – это поток частиц, квантов, фотонов**, которые имеют энергию, пропорциональную частоте: $E = h\nu = hc/\lambda = \hbar\omega$. Именно это представление о природе света позволило объяснить законы фотоэффекта, законы теплового излучения, эффект Комптона, давление света, открытое П.Н. Лебедевым, и другие явления.

Таким образом, **свет обладает свойством дуализма**, т.е. двойственной природой, являясь одновременно и потоком частиц, и волной. Скорость света в вакууме постоянна и не зависит от скорости движения источника и

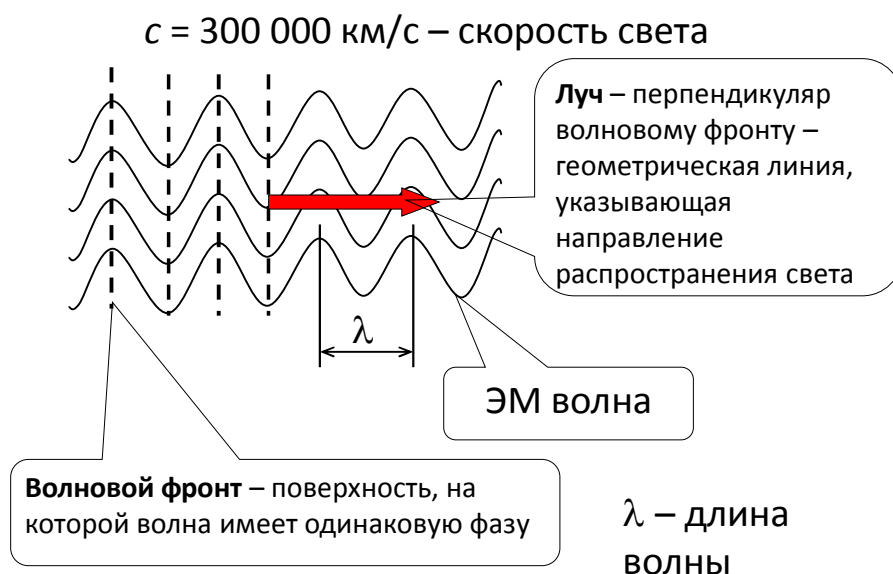


Рис. 1.1. Характеристики волны

приёмника. Это наибольшая скорость, известная современной науке. Световая волна не имеет массы, но при этом она переносит энергию и импульс. При взаимодействии с прозрачной средой скорость световой волны становится меньше, чем в вакууме. Поэтому можно ввести абсолютный показатель преломления среды, который показывает, во сколько раз скорость света в данной среде меньше, чем в вакууме: $n = c/V$. В таблице 1.1 имеются значения показателей преломления для некоторых сред. При прохождении границы раздела двух сред, луч света преломляется, а угол преломления зависит от показателя преломления, который, в свою очередь, зависит от длины волны света, проходящего через неё. Это явление называется дисперсией. Благодаря ему свет можно разложить в спектр (рис.1.2).

Таблица 1.1

Среда	n
Воздух (при нормальных условиях)	1,0003
Вода	1,33
Стекло	1,5 – 1,9
Алмаз	2,4

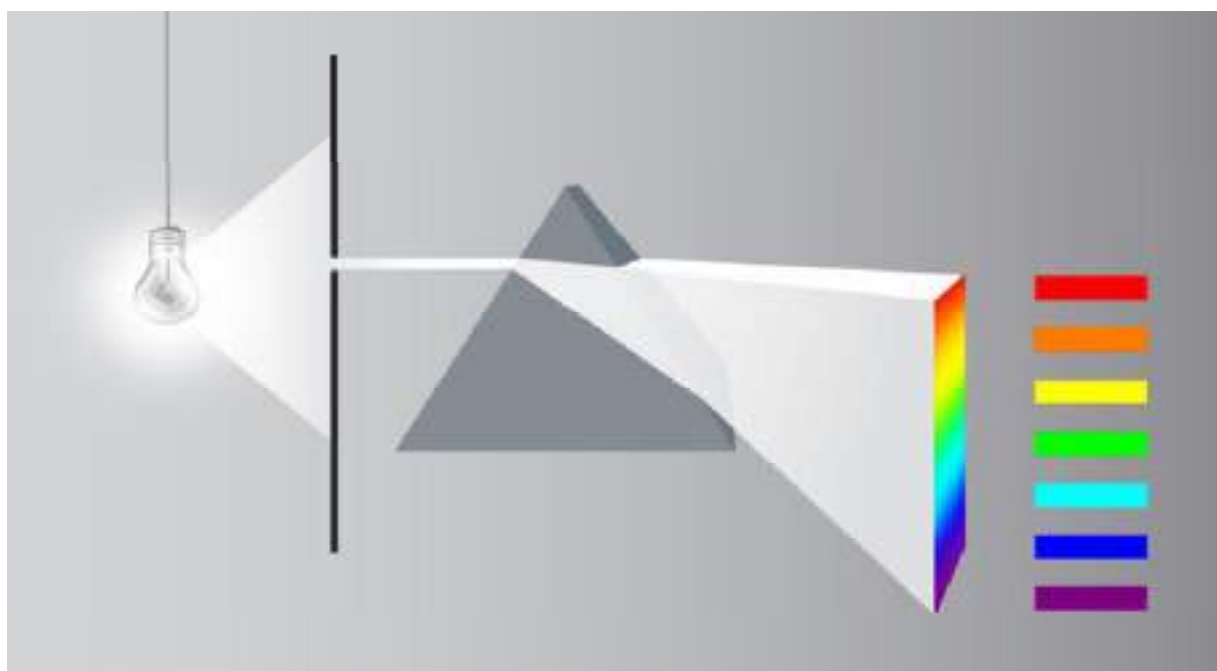


Рис. 1.2. Дисперсия света в призме

§ 2. Спектр электромагнитных полей

Известный человечеству спектр электромагнитных полей чрезвычайно широк: от 10^5 м (сверхдлинные радиоволны) до 10^{-16} м (гамма-частицы), но *оптическое излучение* находится в пределах от 10^{-3} м (инфракрасные

излучения) до 10^{-9} м (ультрафиолетовые лучи). Он включает в себя 3 области (рис. 2.1):

1. Инфракрасная область ($\lambda=780$ нм–1 мм), (1 нм = 10^{-9} м);
2. Видимая область (свет) ($\lambda=380$ –780 нм);
3. Ультрафиолетовая область ($\lambda=1$ –380 нм).

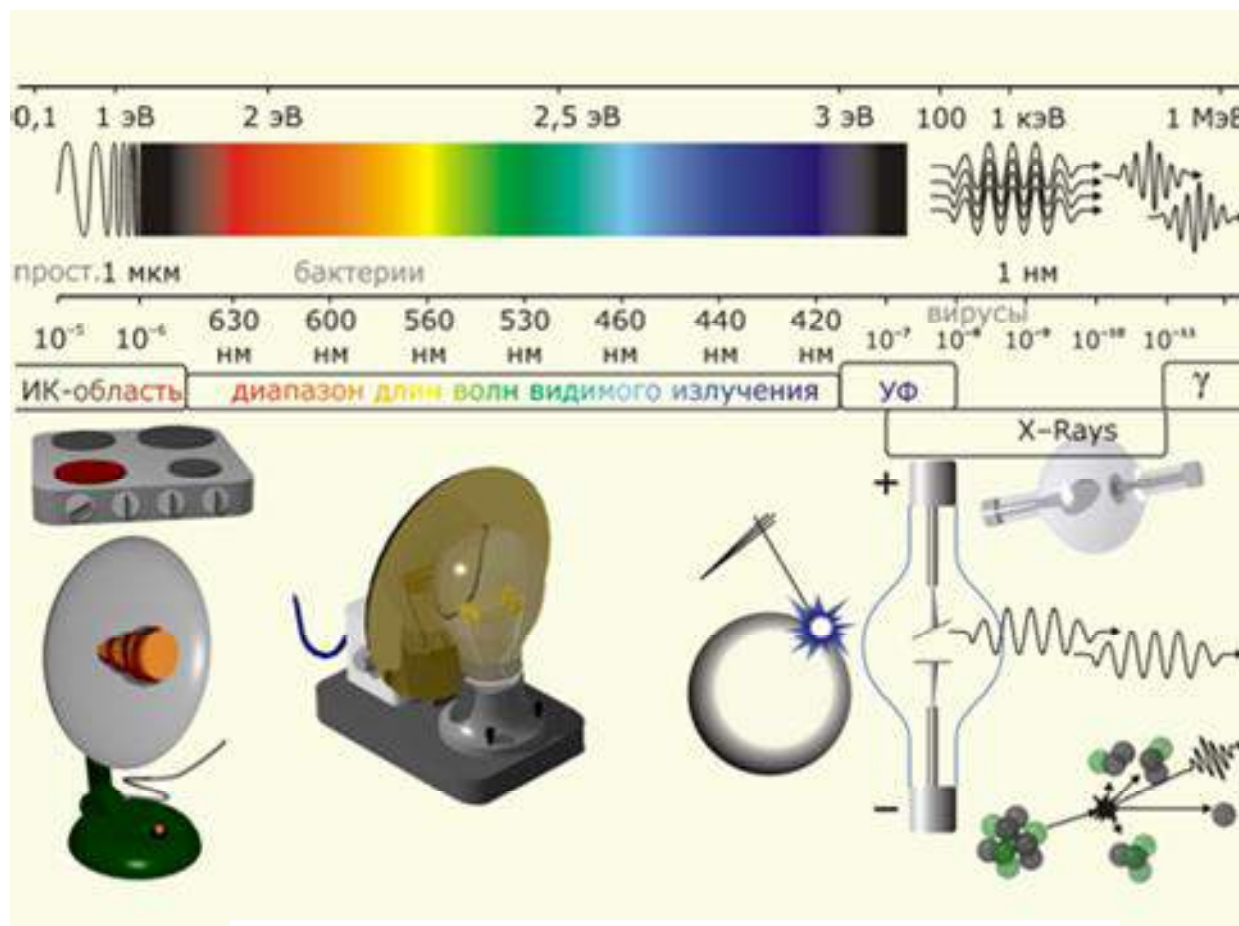


Рис. 2.1. Спектр электромагнитных излучений

Земная атмосфера имеет окно прозрачности в оптической области, которое находится в диапазоне длин волн от 10 до 0,3 мкм (от 10000 до 300 нм). За пределами этого диапазона атмосферный воздух активно поглощает электромагнитные излучения оптического диапазона. В полиграфии используются инфракрасные и ультрафиолетовые лучи, но наибольший интерес представляют волны видимого излучения. Электромагнитные излучения, которые человек способен видеть без применения специальных приборов, называется *свет* [7]. Традиционно, видимый спектр делят на диапазоны 7 цветов (табл. 2.1). Это деление условно и было введено Ньютоном, чтобы привязать их к 7 тонам музыкальной гаммы. Леонардо да Винчи считал, что основных цветов 5. Папуасы, живущие в горах Новой Гвинеи, называют только два цвета — мули (этим словом обозначают чёрный и зелёный) и мола — все остальные цвета [8]. Человеческий глаз в

обычных условиях может различать порядка 100 оттенков по цветовому фону. Способность распознавать большее количество цветов можно натренировать. Художники, декораторы, дизайнеры и полиграфисты могут различать около 150 цветов и оттенков.

Таблица 2.1

Цвет	Диапазон длин волн, нм	Диапазон энергий фотонов, эВ	Диапазон частот, ТГц
Красный	780 – 625	1,59 – 1,98	385 – 480
Оранжевый	625 – 590	1,98 – 2,10	480 – 510
Жёлтый	590 – 565	2,10 – 2,19	510 – 530
Зелёный	565 – 500	2,19 – 2,48	530 – 600
Голубой	500 – 485	2,48 – 2,56	600 – 620
Синий	485 – 440	2,56 – 2,82	620 – 680
Фиолетовый	440 – 380	2,82 – 3,26	680 – 790

§ 3. Энергетические характеристики излучения

Для количественной оценки оптического излучения используют две системы единиц: энергетическую и световую. При обозначении энергетических величин используется индекс *e* (англ. *energy* – «энергия») [9]. *Поток излучения* Φ_e – мощность излучения, определяемая отношением энергии, переносимой излучением, W_e ко времени переноса, значительно превышающему период электромагнитных колебаний:

$$\Phi_e = W_e / t . \quad (3.1)$$

Она измеряется в единицах Дж/с = Вт (ватт) и может быть определена не-селективным приёмником излучения, который поглощает всю энергию излучения, падающую на него.

Излучение распространяется в пространстве в пределах определённого направления, которое можно охарактеризовать понятием *телесный угол*. Величина телесного угла определяется по формуле: $\Omega = A/r^2$, где A – площадь участка сферы радиусом r , ограниченной окружностью, которая находится на этой сфере (рис. 3.1). Телесный угол измеряется в стерadianах (ср). Максимальный телесный угол равен 4π ср. *Сила излучения* I_e – это физическая величина, определяемая отношением потока излучения, распространяющегося от источника излучения, внутри малого телесного угла, содержащего рассматриваемое направление, к этому углу:

$$I_e = \Phi_e / \Omega . \quad (3.2)$$

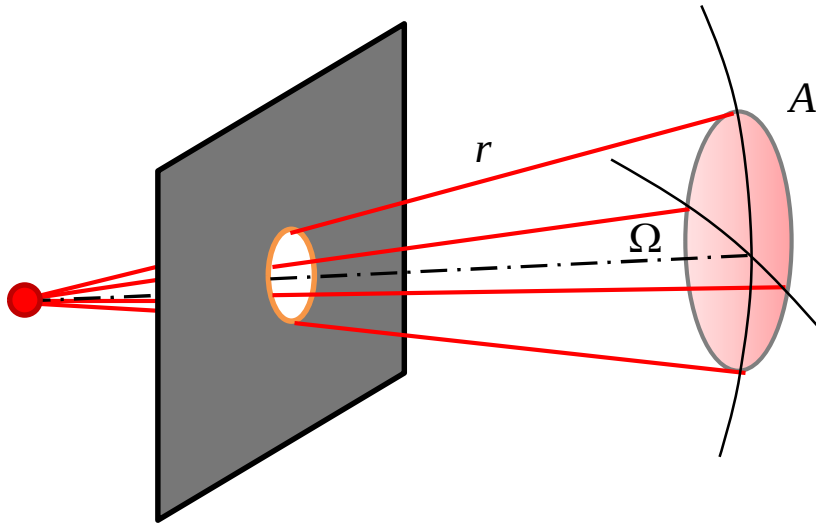


Рис. 3.1. Излучение в телесном угле Ω

На рис. 3.1 показан точечный источник излучения. Но, на практике источник имеет конечные размеры (рис. 3.2). Выделим площадку A_1 на поверхности источника. Поток излучения, исходящий из этой площадки во всех направлениях, отнесённый к её площади называется *энергетическая светимость* M_e :

$$M_e = \Phi_e / A_1 . \quad (3.3)$$

Если наблюдение ведётся под углом α , то эта площадка будет иметь видимую площадь $A_1 \cdot \cos \alpha$ (рис. 3.2). Можно ввести понятие *энергетическая яркость* излучения L_e , которая характеризуется отношением:

$$L_e = \Phi_e / (\Omega \cdot A_1 \cos \alpha) . \quad (3.4)$$

Если поток излучения падает на площадку A_2 , то можно ввести понятие *облучённость* E_e , которая определяется следующим образом:

$$E_e = \Phi_e / A_2 . \quad (3.5)$$

Ещё больше информации об излучении несут его спектральные характеристики. Если разложить излучение в спектр, например, по длинам волн

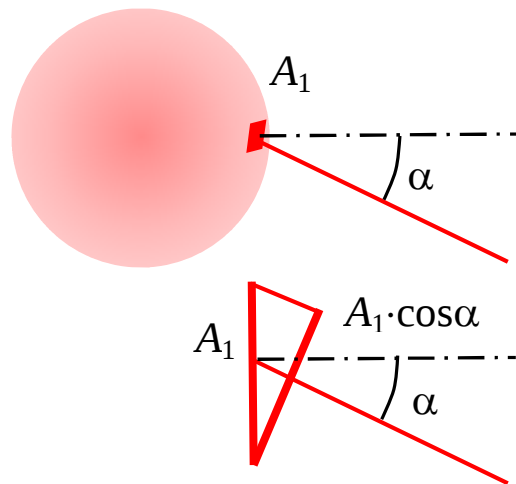


Рис. 3.2. Площадь проекции излучающей площадки в направлении наблюдения

λ , то можно выделить только ту часть потока излучения $d\Phi_e$, которая попадает в бесконечно узкий спектральный диапазон от λ до $\lambda+d\lambda$. Тогда *спектральная плотность потока излучения* равна отношению:

$$\Phi_{e\lambda} = d\Phi_e / d\lambda. \quad (3.6)$$

Аналогично спектральные характеристики можно ввести для других энергетических величин: $I_{e\lambda}$, $M_{e\lambda}$, $L_{e\lambda}$, $E_{e\lambda}$.

В табл. 3.1 приведены основные энергетические характеристики излучения. Кроме того, в этой таблице даны точные дифференциальные определения этих величин, которые нужно использовать, если излучение неравномерно распределено по площади или по направлению.

Таблица 3.1

Величина	Обозначение	Формула		Единицы измерения
		Упрощённая	Точная	
Поток излучения	Φ_e	$\Phi_e = W_e / t$	$\Phi_e = dW_e / dt$	Вт
Сила излучения	I_e	$I_e = \Phi_e / \Omega$	$I_e = d\Phi_e / d\Omega$	Вт/ср
Энергетическая светимость	M_e	$M_e = \Phi_e / A_1$	$M_e = d\Phi_e / dA$	Вт/м ²
Энергетическая яркость	L_e	$L_e = \frac{\Phi_e}{\Omega \cdot A_1 \cos \alpha}$	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega \cdot dA \cos \alpha}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{м}^2}$
Облучённость	E_e	$E_e = \Phi_e / A_2$	$E_e = d\Phi_e / dA$	Вт/м ²
Спектральная плотность потока излучения	$\Phi_{e\lambda}$	$\Phi_{e\lambda} = \Delta\Phi_e / \Delta\lambda$	$\Phi_{e\lambda} = d\Phi_e / d\lambda$	Вт/нм

§ 4. Световые характеристики излучения

Большую часть спектра излучения человек не может видеть. Глаза человека способны воспринимать только очень узкую часть спектра (380 – 780 нм). Ту часть электромагнитного излучения, которую видит человек, называют свет. У каждого человека чувствительность глаза индивидуальна. Около 8% людей страдают различными видами дальтонизма – цветовой слепотой. Некоторые люди имеют искусственный хрусталик в глазу. Они имеют возможность читать в ультрафиолетовом свете [8]. Несмотря на эти индивидуальные различия, в светотехнике введено понятие «стандартный глаз», спектральная чувствительность которого строго стандартизована [10]. Функция относительной спектральной чувствительности глаза, адаптированного к дневному свету, $V(\lambda)$ имеет почти симметричный вид (рис. 1.6) и достигает максимального значения, равного 1, на длине волны $\lambda = 555$ нм (зелёный свет). На это излучение человеческий глаз наиболее чувствителен. Чувствительность глаза к жёлто-оранжевому и голубому свету в 10 раз меньше, чем к зелёному, а к фиолетовому – в 100 раз меньше. Но в ночное время повышается чувствительность глаза к сине-фиолетовой области спектра. Интересно отметить, что спектр излучения Солнца приходится на длину волны около 470 нм, которая тоже лежит в зелёной области спектра. При этом примерно 44% излучения Солнца приходится на видимую часть спектра.

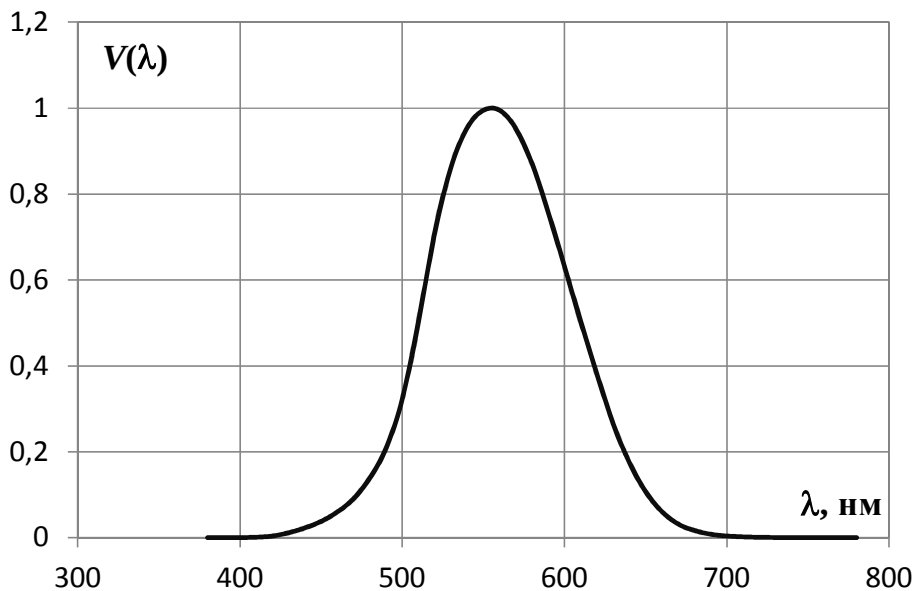


Рис. 4.1. Спектральная чувствительность глаза

Световые характеристики излучения аналогичны энергетическим (табл. 3.1), но учитывают спектральную чувствительность человеческого глаза. Световые величины оцениваются по зрительному ощущению. При их обозначении используется индекс v (англ. *vision* – «зрение»), который может быть опущен в обозначениях, если исключена возможность различного толкования [9]. Для измерения световых величин введены особые единицы. Так, например, для измерения светового потока – величине аналогичной потоку излучения – вводится особая единица – *люмен* (лм) (лат. *lumen* – «свет»). Допустим, источник монохроматического света излучает на длине волны наибольшей чувствительности человеческого глаза – $\lambda = 555$ нм. Если он даёт поток излучения $\Phi_e = 1$ Вт, то ему соответствует световой поток $\Phi_v = 683$ лм [9]. При произвольной мощности источника монохроматического излучения соответствующий ему световой поток рассчитывается по формуле:

$$\Phi_v(555) = 683 \cdot \Phi_e(555). \quad (4.1)$$

Если длина волны излучения источника λ , то при расчёте светового потока учитывается относительная спектральная чувствительность глаза $V(\lambda)$:

$$\Phi_v(\lambda) = 683 \cdot \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda). \quad (4.2)$$

Источники монохроматического излучения не используются в быту для освещения. Любой осветитель даёт широкий спектр излучений. Поэтому для определения светового потока такого источника света применяется формула:

$$\Phi_v(\lambda) = 683 \cdot \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda. \quad (4.3)$$

Аналогично силе излучения I_e в светотехнике вводится понятие *сила света* I_v , которая равна световому потоку Φ_v , распространяющемуся в единичном телесном угле

$$I_v = \Phi_v / \Omega. \quad (4.4)$$

Для измерения силы света введена особая единица – *кандела* (кд) (лат. *candela* — свеча). Одна кандела определена как «сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц (что соответствует длине волны 555,016 нм), энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср». Кандела принята в качестве единицы СИ в 1979 г. XVI Генеральной конференцией по мерам и весам. Это одна из семи основных единиц СИ, наряду с килограммом, метром, секундой, моле́м, кельви́ном и ампером.

Другие энергетические величины – энергетическая светимость M_e , энергетическая яркость L_e и облучённость E_e – также имеют свои аналоги среди световых величин – светимость M_v , яркость L_v и освещённость E_v . Светимость M_v – это физическая величина, определяемая отношением светового потока, исходящего из малого участка поверхности, содержащего рассматриваемую точку, к площади этого участка. Яркость L_v имеет физический смысл светового потока, распространяющегося в единичном телесном угле с площадки единичной площади, нормально расположенной к направлению распространения света. Освещённость E_v – это физическая величина, определяемая отношением светового потока, падающего на малый участок поверхности, содержащей рассматриваемую точку, к площади этого участка. Эта величина измеряется в единицах лм/м², которая называется люкс (лк) (лат. lux – «блеск», «свет»). Основные световые величины сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Величина	Обозначение	Формула		Единицы измерения
		Упрощённая	Точная	
Световой поток	Φ_v, Φ	$\Phi = W/t$	$\Phi_v = dW_v/dt$	лм
Сила света	I_v, I	$I = \Phi/\Omega$	$I_v = d\Phi_v/d\Omega$	кд
Светимость	M_v, M	$M = \Phi/A_1$	$M_v = d\Phi_v/dA$	лм/м ²
Яркость	L_v, L	$L = \frac{\Phi}{\Omega \cdot A_1 \cos \alpha}$	$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega \cdot dA \cos \alpha}$	кд/м ²
Освещённость	E_v, E	$E = \Phi/A_2$	$E_v = d\Phi_v/dA$	лк
Спектральная плотность светового потока	$\Phi_{v\lambda}$	$\Phi_{v\lambda} = \Delta\Phi_v/\Delta\lambda$	$\Phi_{v\lambda} = d\Phi_v/d\lambda$	лм/нм

§ 5. Законы освещённости

Если человек смотрит на источник света, то его световым ощущениям может быть сопоставлена величина яркости L этого источника. Наименьшая яркость светящегося объекта, различимая глазом составляет $\sim 10^{-6}$ кд/м², а максимально допустимая яркость объекта для глаза составляет $\sim 10^5$ кд/м². Человек способен различать светящиеся объекты, которые различаются по яркости на 11 порядков! Для того чтобы глаз смог регистрировать самый слабый свет нужна длительная адаптация. Так, итальянский астроном Джованни Скиапарелли, объявивший во время противостояния Марса 1877 года об открытии марсианских каналов, вынужден был в период наблюдений по несколько дней проводить в абсолютно тёмной комнате, чтобы глаза могли привыкнуть к столь слабой яркости объекта наблюдения. При наблюдении Солнца надо иметь ввиду, что его яркость составляет $1,5 \cdot 10^9$ кд/м², что более чем в 10000 раз превышает максимально допустимую для глаза яркость. Поэтому Солнце можно наблюдать только через специальные светофильтры. Даже яркость нити лампы накаливания может достигать значений $\sim 10^6$ кд/м², что также превышает допустимый порог яркости для глаза.

Большинство объектов светят не сами, а отражают и рассеивают падающий на них свет. В этом случае необходимо знать освещённость E этих объектов. От степени освещённости напрямую зависит не только здоровье глаз и работоспособность человека, но ещё и его физическое и психоэмоциональное состояние. Причём в помещениях различного назначения требования по освещённости должны различаться. Расчёт нормы освещённости регламентируется несколькими правовыми актами. Самый главный документ – СНиП (строительные нормы и правила), а также СанПиН (санитарные правила и нормы), большое количество региональных (для каждого субъекта РФ) и отраслевых документов. Например, в офисах общего назначения с использованием компьютеров освещённость должна быть от 200 до 500 лк, а в коридорах и холлах – от 50 до 100 лк. Для чтения необходима освещённость 30–50 лк. Прямые солнечные лучи дают освещённость 100 тыс. лк, а в пасмурный день – 1000 лк. Измерить освещённость можно с помощью специального прибора – люксметра, но на стадии проектирования объекта необходимо рассчитывать освещённость будущих помещений и рабочих мест.

Чтобы рассчитать освещённость поверхности, необходимо знать силу света источника. Если он точечный (рис. 5.1), то световой поток, падающий на поверхность, определяется следующим образом:

$$\Phi = I \cdot \Omega = E \cdot S = E \cdot \Omega \cdot r^2. \quad (5.1)$$

Отсюда следует первый закон освещённости:

$$E = I / r^2. \quad (5.2)$$

Освещённость площадки, ориентированной перпендикулярно к свету, равна силе света, делённой на квадрат расстояния до точечного источника. Этот закон действует только для точечного источника света. Если источник не является точечным, то надо сложить освещённости от каждого точечного элемента поверхности источника.

Допустим, что свет распространяется в прозрачной среде, которая не поглощает и не рассеивает его. Тогда сила света остаётся постоянной, и будет выполняться закон обратных квадратов:

$$E_1/E_2 = r_2^2/r_1^2. \quad (5.3)$$

Освещённость площадки обратно пропорциональна квадрату расстояния до точечного источника.

Когда площадка, на которую падает свет, не перпендикулярна оси потока, то необходимо учитывать, что тот же самый световой поток распределяется на большую площадь $S_1 = S_0/\cos\alpha$, а, значит, освещённость будет зависеть от угла падения света α (рис. 5.2):

$$E = I \cdot \cos\alpha / r^2. \quad (5.4)$$

Формула (5.4) выражает собой обобщённый закон освещённости.

Если несколько точечных источников освещают поверхность, то освещённости от каждого источника необходимо сложить, чтобы получить общую освещённость (рис. 5.3):

$$E = \sum_i I_i \cdot \cos\alpha_i / r_i^2. \quad (5.5)$$

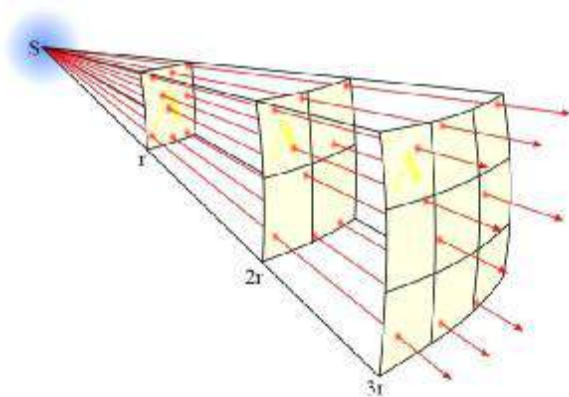


Рис. 5.1. Расчёт освещённости от точечного источника

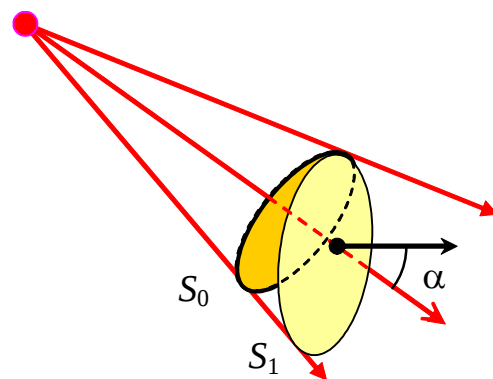


Рис. 5.2. Расчёт освещённости в зависимости от угла падения света

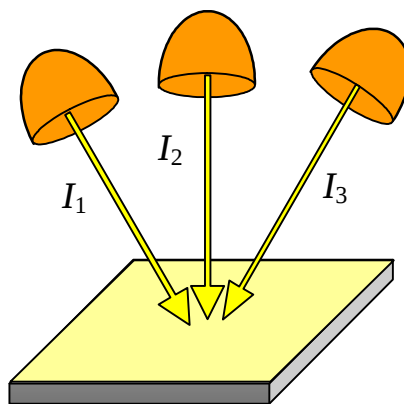


Рис. 5.3. Суперпозиция источников света

ГЛАВА 2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ СРЕДАМИ

§ 6. Общие сведения об оптических свойствах тел

Все тела взаимодействуют со светом. Характером этого взаимодействия определяются оптические свойства тел. Это взаимодействие приводит к появлению бесчисленного количества оптических явлений таких, как: интерференция, дифракция, поляризация, рассеяние, преломление, дисперсия, поглощение, отражение света и другие. Не имея возможности рассмотреть все эти явления, ограничимся только теми, которые могут быть наиболее интересными для полиграфистов: отражение, поглощение и рассеяние света на твёрдых телах. Допустим, на тело падает световой поток Φ_0 (рис. 6.1). Частично, он отражается от поверхности (Φ_ρ), поглощается средой (Φ_α) и проходит насквозь (Φ_τ). Для характеристик преобразования используют безразмерные коэффициенты:

$\rho = \Phi_\rho / \Phi_0$ – коэффициент отражения,
 $\alpha = \Phi_\alpha / \Phi_0$ – коэффициент поглощения и
 $\tau = \Phi_\tau / \Phi_0$ – коэффициент пропускания.

Если это тело является серым, т.е. оно не изменяет спектр излучений, то

$$\Phi_0 = \Phi_\rho + \Phi_\alpha + \Phi_\tau. \quad (6.1)$$

Отсюда,

$$\rho + \alpha + \tau = 1. \quad (6.2)$$

В полиграфии часто в качестве меры отражения и пропускания света телом используют оптическую плотность D , которая измеряется в белах (Б):

$$D_\rho = \lg(1/\rho), \quad D_\tau = \lg(1/\tau). \quad (6.3)$$

Для светофильтров используется понятие «кратность» $f = 1/\tau$ – коэффициент, который показывает, во сколько раз световой поток ослабевает при прохождении светофильтра. Если используются несколько светофильтров, то их общая кратность равна произведению кратностей светофильтров:

$$f = f_1 \cdot f_2 \cdot \dots \cdot f_n. \quad (6.4)$$

Оптические плотности светофильтров, соединённых вместе, будут складываться:

$$D_\tau = D_{\tau 1} + D_{\tau 2} + \dots + D_{\tau n}. \quad (6.5)$$

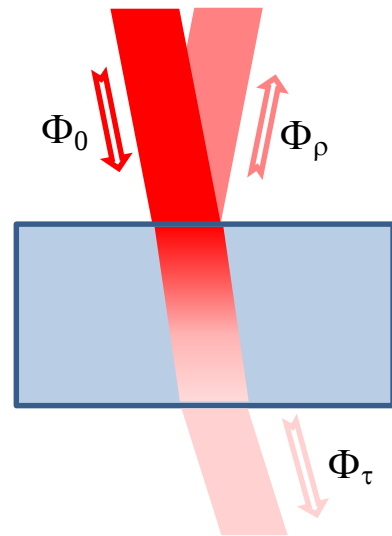


Рис. 6.1. Отражение, поглощение и пропускание света через среду

Всё вышенаписанное относилось к телам серым или нейтральным светофильтрам, световые параметры которых не зависят от длины волны света λ . Большинство предметов является спектрально зависимыми, т.е. их световые характеристики зависят от λ . Например, предмет кажется красным потому, что он лучше всего отражает красные лучи с длиной волны от 625 до 780 нм (табл. 2.1), но гораздо хуже отражает лучи сине-зелёной области спектра (440 – 565 нм). Поэтому необходимо ввести спектральные характеристики коэффициентов отражения, поглощения (поглощательная способность) и пропускания: ρ_λ , α_λ и τ_λ . Если на тело падает световой поток Φ_0 , то можно выделить только ту его часть $d\Phi_0$, которая попадает в бесконечно узкий диапазон длин волн от λ до $\lambda+d\lambda$. Отражённый световой поток для этого диапазона длин волн будет $d\Phi_\rho$, поглощённый – $d\Phi_\alpha$, а прошедший – $d\Phi_\tau$. Тогда формулы для спектральных коэффициентов будут записываться следующим образом:

$$\rho_\lambda = d\Phi_\rho/d\Phi_0, \quad \alpha_\lambda = d\Phi_\alpha/d\Phi_0, \quad \tau_\lambda = d\Phi_\tau/d\Phi_0. \quad (6.6)$$

Спектральная оптическая плотность может быть определена аналогично (6.3):

$$D_{\rho\lambda} = \lg(1/\rho_\lambda), \quad D_{\tau\lambda} = \lg(1/\tau_\lambda). \quad (6.7)$$

Интегральный коэффициент отражения ρ для цветного тела может быть рассчитан по формуле:

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_\lambda \frac{d\Phi_0}{d\lambda} d\lambda}{\Phi_0}, \quad (6.8)$$

где $\frac{d\Phi_0}{d\lambda}$ – спектральная плотность падающего светового потока (табл. 4.1).

Аналогичные формулы можно написать для интегрального коэффициента поглощения α и пропускания τ .

§ 7. Поглощение света. Закон Бугера

Любое вещество поглощает свет, проходящий через него, частично превращая его энергию в другие виды энергии, например, тепловую или химическую при экспонировании фотослоя. Впервые закон поглощения света веществом сформулировал французский исследователь Пьер Бугер в 1729 году в своей работе по фотометрии «Опыт о градации света». Лишь спустя 31 год после этой публикации немецкий физик и астроном Иоганн Ламберт изложил этот же закон, ссылаясь при этом на Бугера.

Этот закон был доказан Бугером экспериментально и теоретически. Он утверждает, что ослабление света в среде происходит по степенному закону, а не по линейному. Этому же степенному закону подчиняется ослабление любого потока энергии в однородной среде (гамма-лучей, рентгеновского излучения, звуковых волн). Современникам Бугера казалось, что при последовательном прохождении одинаковых слоёв световой поток ослабляется на одинаковые порции до полного уничтожения. Поэтому некоторые исследователи даже в 19 веке пытались определить глубину проникновения дневного света в толщу океанской воды, не осознавая, что на самом деле они лишь измеряют порог чувствительности своего приёмника света [11, с. 41].

Допустим, что свет проникает в среду (рис. 7.1). Световой поток, прошедший границу раздела сред – Φ_0 . На расстоянии x от поверхности световой поток Φ будет меньше Φ_0 . Выделим слой бесконечно тонкий dx . После его прохождения световой поток изменится на бесконечно малую величину $d\Phi$. Это приращение будет отрицательным и пропорциональным толщине слоя dx и падающему на него световому потоку Φ :

$$d\Phi = -k \cdot \Phi \cdot dx. \quad (7.1)$$

Отсюда,

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = -k \cdot dx. \quad (7.2)$$

Решая это дифференциальное уравнение с граничным условием $\Phi(0) = \Phi_0$, получаем закон Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-kx}. \quad (7.3)$$

Этот же закон можно переписать, используя основание степени 10 [2, с. 41]:

$$\Phi = \Phi_0 \cdot 10^{-\chi cl}, \quad (7.4)$$

χ – удельный показатель поглощения, характеризующий свойства среды, c – концентрация поглощающего вещества, l – толщина слоя.

Следует отметить, что в законе Бугера не учитывается отражение света на границах раздела сред. Поэтому при прохождении света через светофильтр будут возникать дополнительные потери света – ~3–5% на каждой границе раздела.

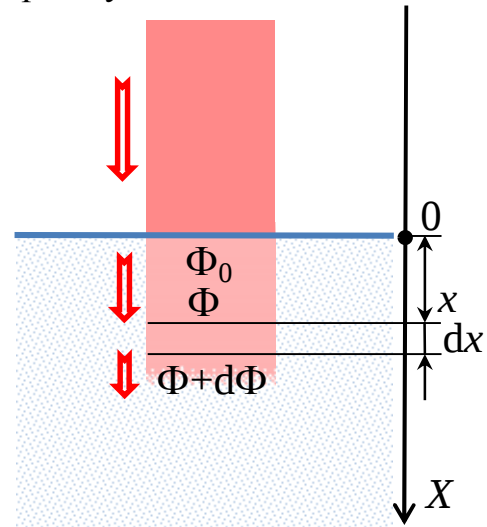


Рис. 7.1. Поглощение света средой

§ 8. Отражение и преломление света на границе двух сред

Визуальное восприятие предметов зависит от их способности отражать и преломлять падающий на них свет. Рассмотрим закономерности отражения света от гладкой поверхности. Если размер неровностей и неоднородностей поверхности предмета меньше чем длина волны излучения, то поверхность будет выглядеть гладкой, и для неё будет выполняться закон зеркального отражения (рис. 8.1): *угол падения равен углу отражения* ($\alpha = \gamma$). *Луч падающий, отражённый и перпендикуляр, проведённый к точке падения, лежат в одной плоскости.*

Закон отражения света был найден экспериментально ещё в III веке до нашей эры древнегреческим учёным Евклидом. Также этот закон может быть получен как следствие принципа Гюйгенса. Согласно этому принципу, каждая точка среды, до которой дошло возмущение, является источником вторичных сферических волн. Волновая поверхность (фронт волны) в следующий момент представляет собой касательную поверхность ко всем вторичным волнам.

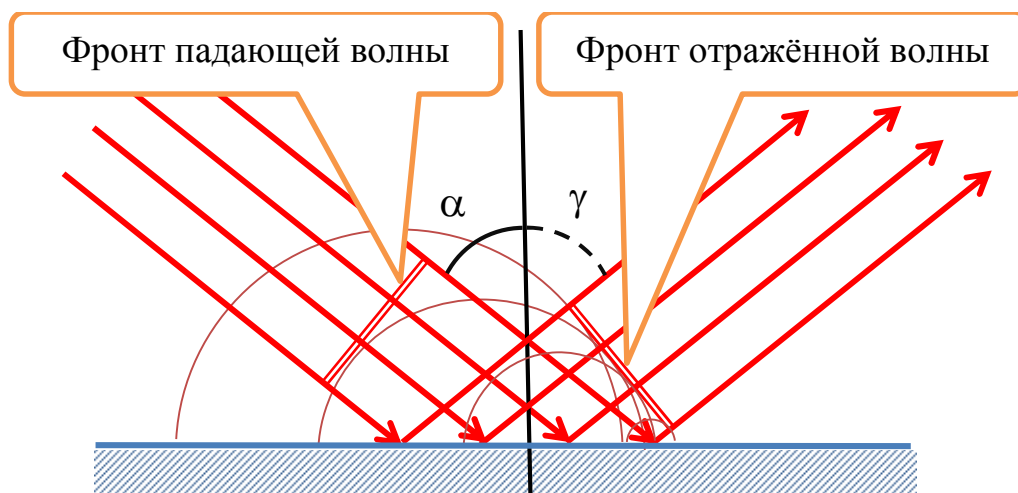


Рис. 8.1. Отражение света от гладкой поверхности

Благодаря действию этого закона, зеркало или любая другая гладкая отражающая поверхность создаёт мнимое изображение источника света (рис. 8.2). Плоское зеркало даёт возможность видеть предметы, находящиеся перед ним, причём эти предметы кажутся расположенными за зеркальной плоскостью. В геометрической оптике каждый точечный источник света S считается центром расходящегося пучка лучей. Такой пучок лучей называется гомоцентрическим. Изображением точки S в оптическом устройстве называется центр S' гомоцентрического отражённого пучка лучей. Явление зеркального отражения от поверхности имеет большое значение для светотехники и полиграфии. Нанося на полиграфические издания лак, или, производя печать на глянцева бумаге, полиграфисты добиваются большей «сочности» изображения – повышается визуальный контраст.

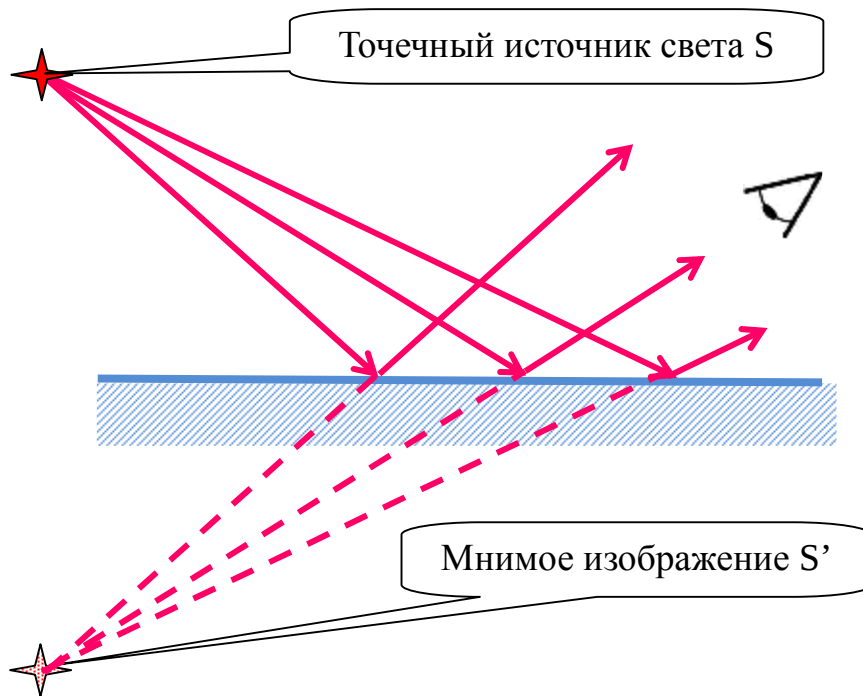


Рис. 8.2. Формирование мнимого изображения источника света

При переходе света из одной прозрачной среды в другую направление света может меняться. Изменение направления света на границе разных сред называется преломлением света. Вследствие преломления света происходит кажущееся изменение формы предмета. В отличие от закона отражения света, известного с глубокой древности, закон преломления света был сформулирован в XVII веке. Он был открыт голландским математиком, физиком и астрономом Виллебрордом Снеллиусом и носит его имя.

На рис. 8.3 показан пример преломления света при переходе из оптически менее плотной в оптически более плотную среду, т.е. в среду с большим абсолютным показателем преломления ($n_2 > n_1$). Угол преломления β в этом случае будет меньше, чем угол падения α . Соотношение между этими углами вытекает из закона Снеллиуса:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (8.1)$$

В табл. 1.1 даны примеры абсолютных показателей преломления для некоторых веществ. Так, для воздуха в большинстве

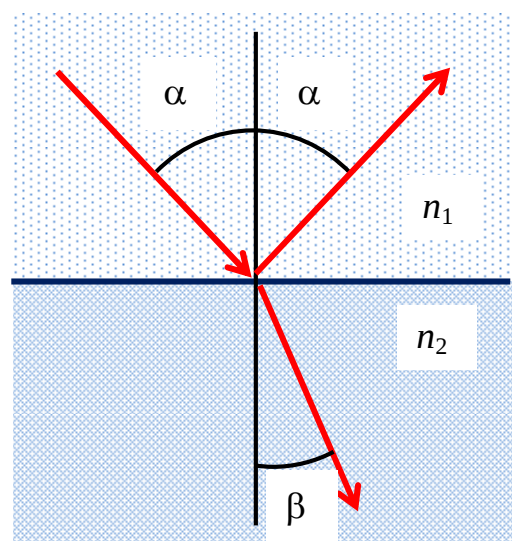


Рис. 8.3. Преломление света

случаев можно считать, что его показатель преломления примерно равен вакуумной единице ($n_{\text{вакуума}} = 1$). Преломление света в среде приводит к появлению разнообразных оптических иллюзий, которые сводятся к искажению изображения предмета, как, например, показано на рис. 8.4.

Другим интересным следствием закона Снеллиуса является полное внутреннее отражение света. Это явление наблюдается при выполнении двух условий: во-первых, свет должен распространяться из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, т.е. в среду с меньшим показателем преломления ($n_2 < n_1$). Например, когда свет распространяется в воде и отражается от поверхности обратно, не выходя наружу. Во-вторых, угол падения луча на границу раздела сред должен быть больше или равен предельному углу полного внутреннего отражения $\alpha_{\text{пред}}$, который определяется из выражения:

$$\sin \alpha_{\text{пред}} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (8.2)$$

Так, для границы раздела воды ($n_1 = 1,33$) и воздуха ($n_2 = 1$), $\alpha_{\text{пред}} = 49^\circ$ (рис. 8.5). Это выражение следует из закона Снеллиуса (8.1), если принять, что угол преломления $\beta = 90^\circ$ ($\sin 90^\circ = 1$). Явление полного внутреннего отражения света используется в оптических устройствах таких, как стеклянные призмы для переворачивания изображения. Кроме того, стеклянные призмы используются для разложения света в спектр.

Любые источники света не являются монохроматическими, т.е. они дают излучения с разными длинами волн. Показатель преломления среды n зависит от длины волны света λ , распространяющегося в этой среде. Это явление называется дисперсией. Например, стекло тяжёлый флинт марки ТФ5 имеет показатель преломления для



Рис. 8.4. Оптическая иллюзия, вызванная преломлением света

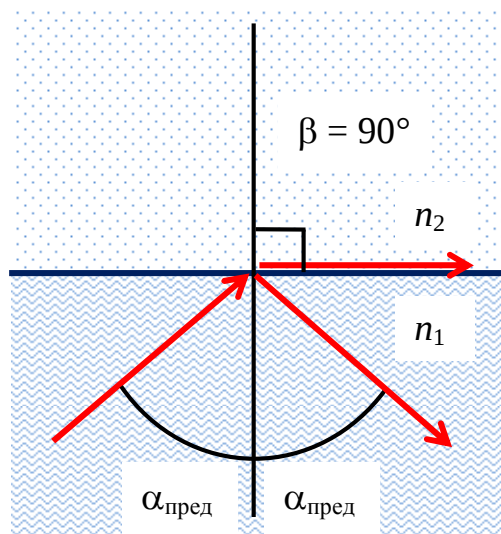


Рис. 8.5. Полное внутреннее отражение света

красных лучей $n_{\text{красн}} = 1,73$, а для фиолетовых – $n_{\text{фиол}} = 1,79$ [12]. Поэтому, свет разных длин волн будет преломляться в такой призме под разными углами. Так происходит пространственное разделение лучей (рис. 8.6).

Аналогичное явление происходит при прохождении света через каплю воды. Благодаря этому возникает радуга (рис. 8.7). Луч света преломляется при попадании на каплю. При этом происходит его разложение в спектр. Затем он испытывает полное внутреннее отражение, и опять преломляется при выходе наружу.

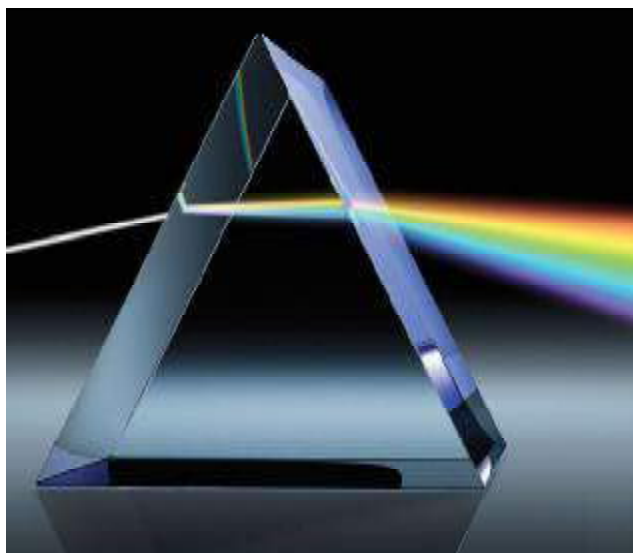


Рис. 8.6. Разложение света в стеклянной призме

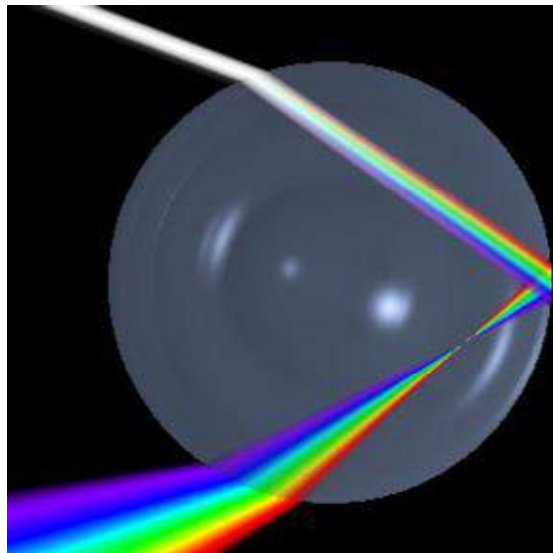


Рис. 8.7. Преломление и отражение света в капле воды

§ 9. Рассеяние света

Если поверхность тела не является гладкой такой, что размер неоднородностей и неровностей больше 1 мкм (больше длины волны видимого света), то она будет выглядеть матовой. Для такой поверхности не выполняется закон зеркального отражения (рис. 9.1).

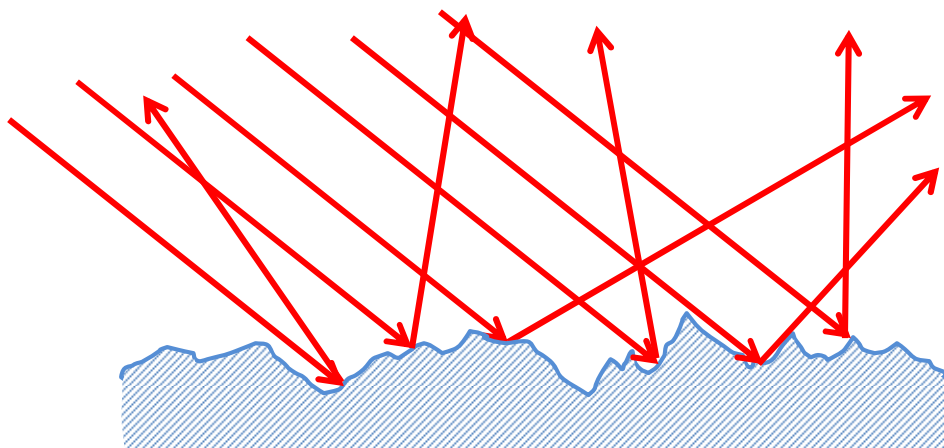


Рис. 9.1. Отражение света от шероховатой поверхности

Отражение света от шероховатой поверхности происходит во все стороны. Такое отражение называется диффузным. Благодаря этому, зрители, находящиеся в кинозале, видят всё изображение на экране, а не его часть, как могло бы быть в случае с зеркальным экраном. Для идеальной рассеивающей поверхности выполняется закон Ламберта. Согласно этому закону, *яркость L (см. § 4) рассеивающей свет (диффузной) поверхности одинакова во всех направлениях*. Закон был сформулирован в 1760 году И. Ламбертом. В настоящее время он рассматривается как закон идеального рассеяния света, удобный для теоретических исследований. Однако он находит применение и для приближённых фотометрических и светотехнических расчётов. Чаще для таких расчётов необходимо знать не яркость L , а силу света I , исходящего от отражающей поверхности. Допустим, что угол, под которым регистрируют рассеянный поверхностью свет по отношению к нормали α (рис. 9.2). Согласно формулам табл. 4.1,

$$L = \frac{I}{A_1 \cos \alpha}, \quad (9.1)$$

где A_1 – площадь рассеивающей поверхности. При $\alpha = 0$ ($\cos 0 = 1$) яркость L остаётся неизменной,

$$L = \frac{I_0}{A_1}. \quad (9.2)$$

Из выражений (9.1) и (9.2) получаем:

$$I = I_0 \cos \alpha. \quad (9.3)$$

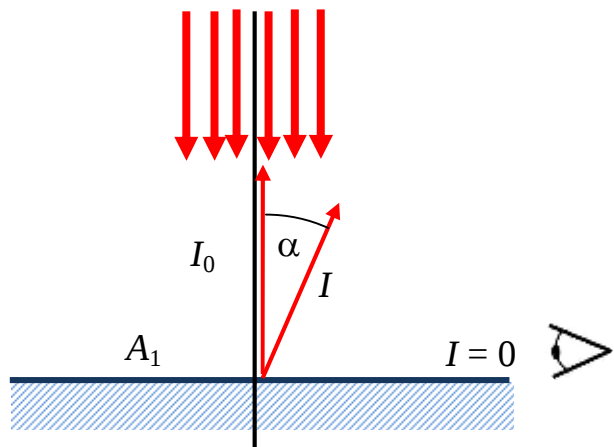


Рис. 9.2. Диффузное отражение света от шероховатой поверхности

Чем больше угол α , под которым наблюдатель видит рассеивающую поверхность, тем меньше её видимая площадь. Поэтому, хотя яркость поверхности, согласно закону Ламберта, остаётся неизменной, сила света уменьшается вплоть до нуля при наблюдении вдоль этой поверхности. Реальные тела даже в видимой области спектра рассеивают свет со значительными отступлениями от закона Ламберта. Наиболее близки к закону Ламберта бархат, матовые шероховатые поверхности гипса, оксида магния, сульфата бария и др.; из мутных сред – некоторые типы облаков и молочных стекол. Сильное отклонение от закона Ламберта наблюдается для полированных поверхностей, так как для них яркость при угле α , равном углу падения луча, будет большей, чем в направлении, нормальном к поверхности (рис. 9.3).

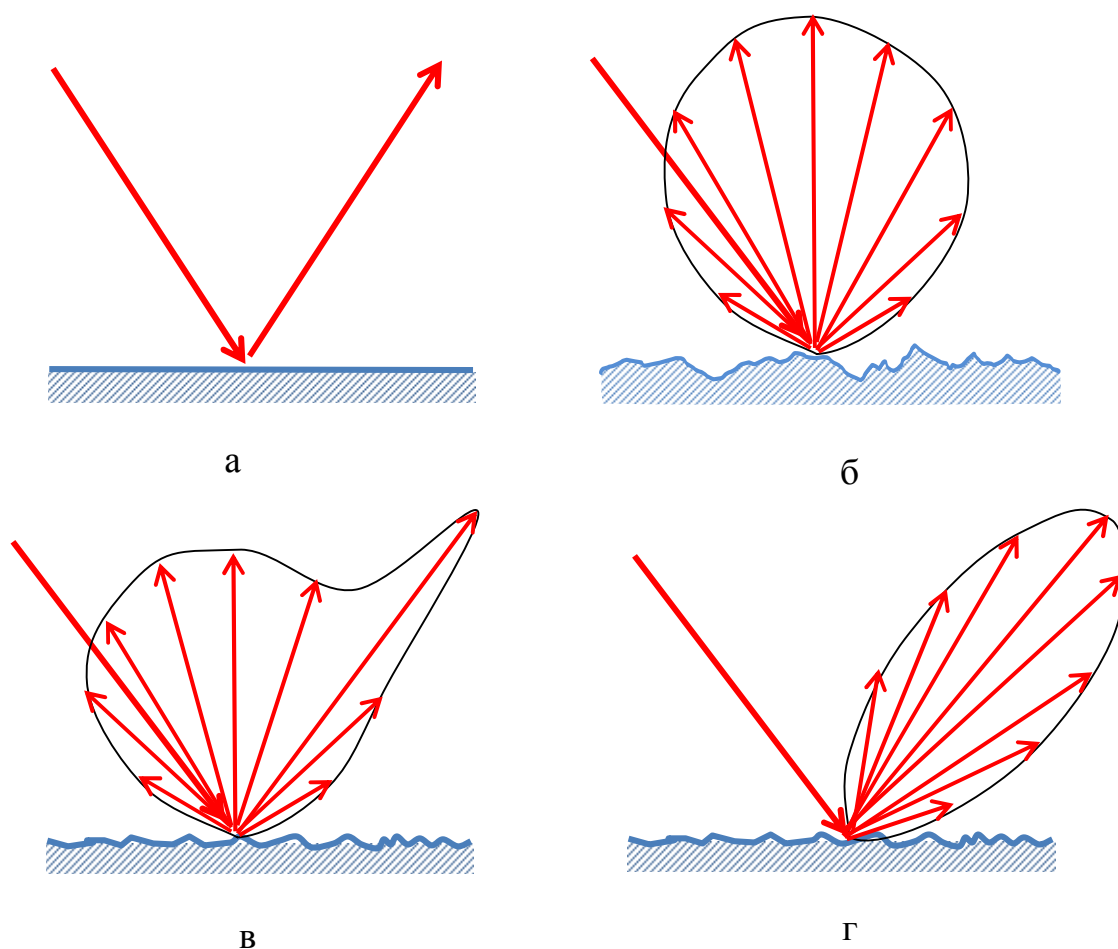


Рис. 9.3. Индикатрисы рассеяния света:
 а – зеркальное отражение; б – диффузное;
 в – смешанное; г – направленно-рассеянное

Существует количественная характеристика, описывающая способность поверхности отражать и рассеивать свет. Она называется *альбедо* (от лат. albus – белый). Вообще альбедо – это отношение потока, отраженного (рассеянного) поверхностью во всех направлениях излучения к потоку падающего излучения. Понятие альбедо широко применяют в светотехнических расчетах. Эту характеристику определяют с помощью прибора – альбедометра. Этот прибор измеряет два световых потока: падающий на плоскую поверхность и рассеянный ею. По их отношению определяется альбедо (A), которое называется истинным или ламбертовым. В светотехнике эту же величину называют *коэффициентом диффузного отражения*. Для абсолютно белой поверхности $A = 1$. Свежий снег имеет альбедо около 0,9, а древесный уголь – 0,04.

ГЛАВА 3. ПРИЁМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

§ 10. 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:

$$W_e = W_{\text{эф}} + \Delta W, \quad (10.1)$$

где $W_{\text{эф}}$ – эффективная энергия; ΔW – 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 :

$$S = cW_{\text{эф}}/W_e, \quad (10.2)$$

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.

$$S(\lambda) = cW_{\text{эф}}(\lambda)/W_e(\lambda), \quad (10.3)$$

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.

§ 11. 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. 11.1) – 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.

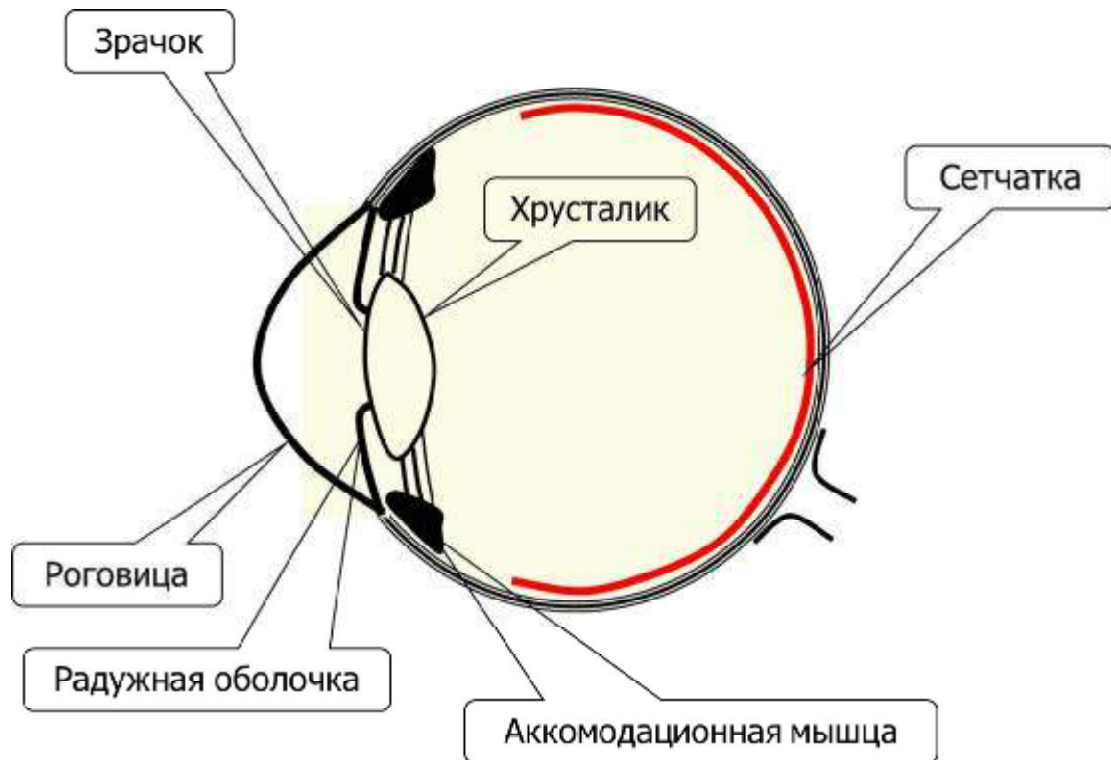


Рис. 11.1. Строение человеческого глаза

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 кольцообразной 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. 11.2 (2)). Что касается колбочек, то они менее чувствительны к свету, чем палочки, и реагируют на свет лишь при достаточном освещении (рис. 11.2 (1)). 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, как было отмечено в § 4, 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.

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 2°. 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».

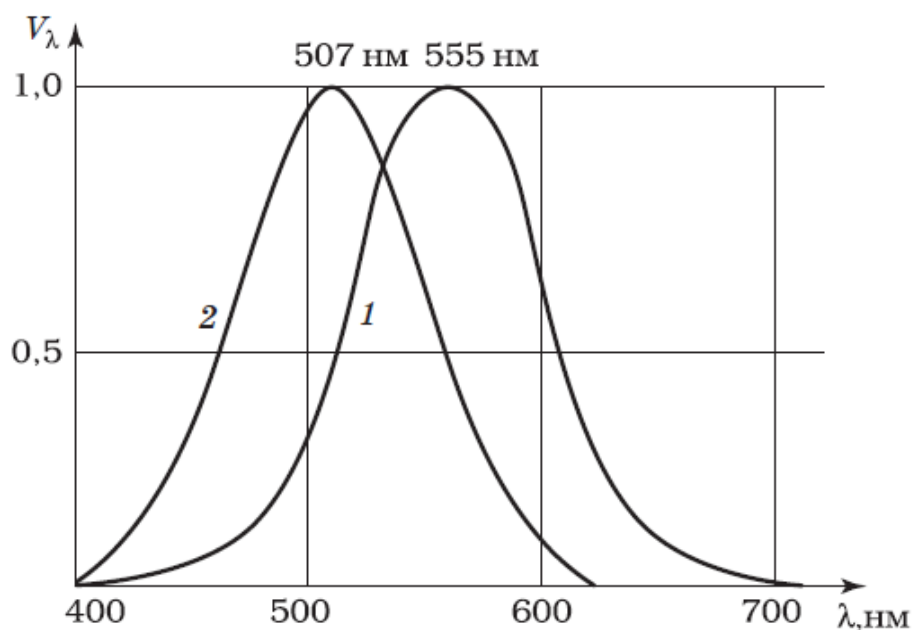


Рис. 11.2. Кривые относительной спектральной световой эффективности:
1 – для глаза, адаптированного к дневным яркостям;
2 – для глаза, адаптированного к ночным яркостям.

§ 12. 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. 12.1), 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. 12.1) гальванометр (2) будет показывать силу тока при освещении фотоэлемента. Световые характеристики вакуумных фотоэлементов

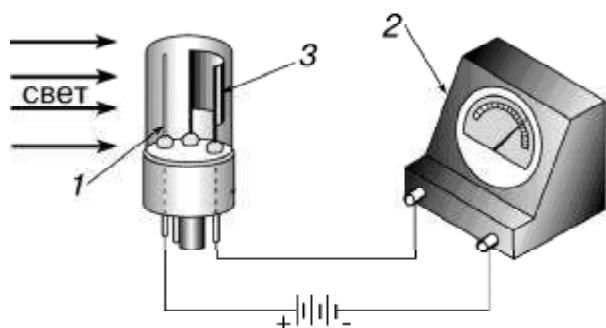


Рис. 12.1. Вакуумный фотоэлемент

отличаются линейностью в достаточно широких пределах освещенности фотокатода.

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. 12.2 изображен внешний вид ФЭУ. Принцип работы продемонстрирован на рис. 12.3. Фотоэлектроны, эмитируемые с фотокатода под действием электрического поля, ускоряются и попадают на первый промежуточный электрод $\mathcal{E}_1$ (промежуточные электроды называют динодами 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. 12.2. Внешний вид ФЭУ

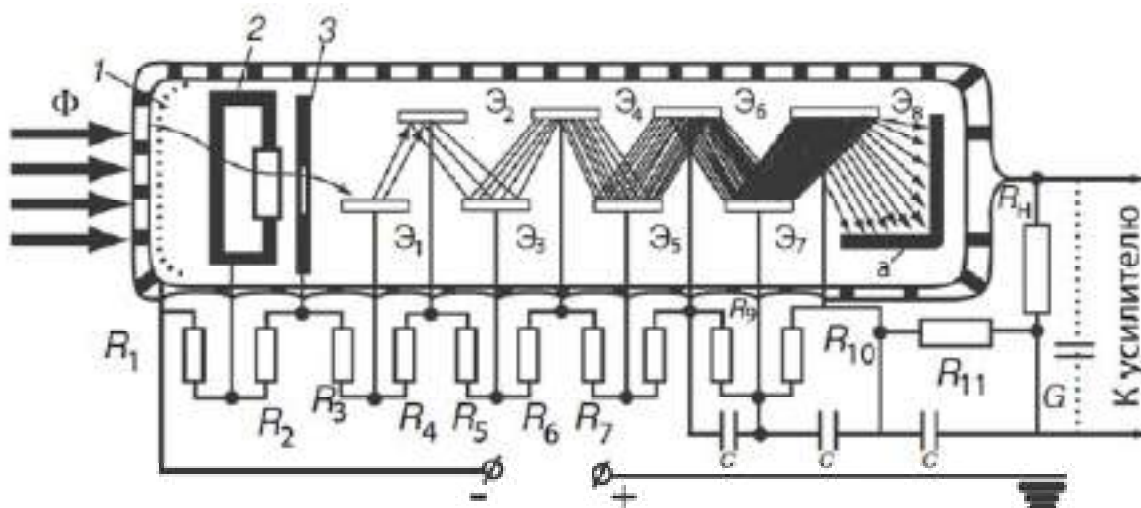


Рис. 12.3. Строение фотоэлектрического умножителя:

1 – металлическая сетка за входным окном; 2 – полупроводниковый катод, нанесенный на полый металлический цилиндр; 3 – анод; Э – вторичные катоды (эмиттеры), усиливающие сигнал; R – резисторы, регулирующие напряжение на эмиттерах; 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 Дэйема 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. 11.2 (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. 12.4 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 определённый сигнал (напряжение) подающийся на электроды.

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.

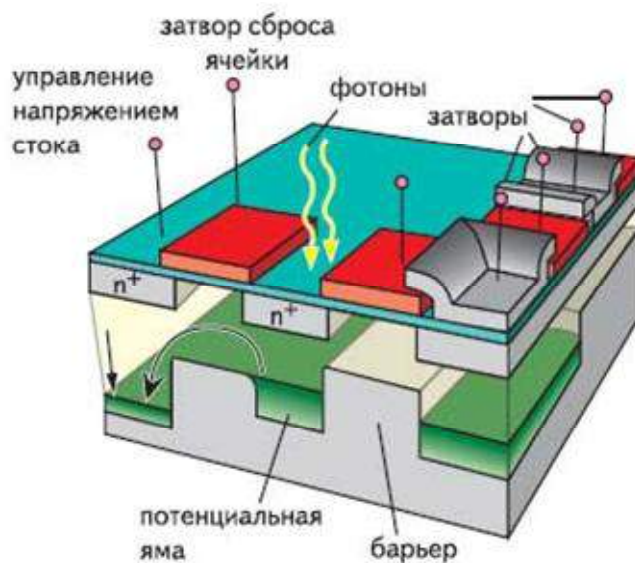


Рис. 12.4. Принцип работы ПЗС-матрицы

§ 13. 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 [13, 14].

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):

$$m = k\Phi t, \quad (13.1)$$

где Φ – 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 процесс, 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 – сенсibilизатор, который изменяет спектральную чувствительность фотоматериала.

ГЛАВА 4. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

§ 14. 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 превращения 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 $\Phi_{e\lambda}$ (§ 3). 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 Φ (§ 4).

3. Световая отдача η – 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 [15]. Это температура абсолютно чёрного тела, при которой оно испускает излучение с той же цветностью, что и рассматриваемое излучение.

§ 15. 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 [3]. 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. 15.1). 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. 15.1) из его отверстия будет выходить излучение, имеющее сплошной спектр, т.е. в состав его излучения входят длины волн от 0 до ∞ . 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 $M_{e\lambda}$ (§ 3) к его поглощательной способности α_λ (§ 6) не зависит от природы тела, а зависит только от его температуры T и длины волны излучения λ :

$$\frac{M_{e\lambda 1}}{\alpha_{\lambda 1}} = \frac{M_{e\lambda 2}}{\alpha_{\lambda 2}} = \dots = \frac{M_{e\lambda n}}{\alpha_{\lambda n}} = f(\lambda, T), \quad (15.1)$$

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:

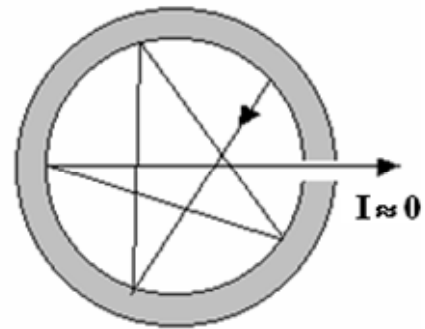


Рис. 15.1. Модель АЧТ

$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (15.2)$$

где h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана. На рис. 15.2 приведено спектральная плотность энергетической светимости АЧТ, для различных температур.

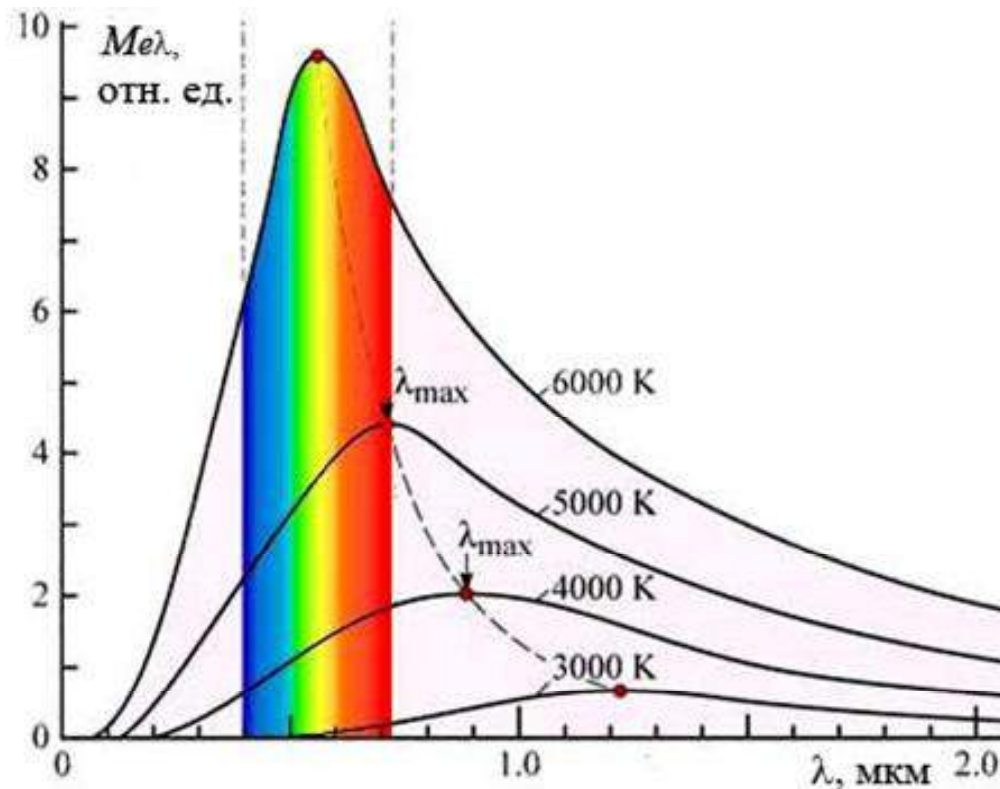


Рис. 15.2. Спектр излучения АЧТ

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:

$$\lambda_{\max} = \frac{b_1}{T}, \quad (15.3)$$

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.

$$M_e = \sigma T^4, \quad (15.4)$$

где $\sigma = 5,672 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – 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. [16]. Поверхность Солнца имеет температуру 6000 К, а максимум спектра его излучения находится в зелёной области (~500 нм) (см. § 2, табл. 2.1), и это излучение наиболее комфортно для зрения человека.

§ 16. 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 [16] 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. 16.1. Нить накала в лампах накаливания изготавливается из вольфрамовой проволоки, чаще всего свитой в спираль. С целью



Рис. 16.1. Лампа накаливания

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 расплывается, что приводит к ее перегоранию. В результате испарения вольфрамовой нити накала на колбе образуется чёрный налет.

На рис. 16.2 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.

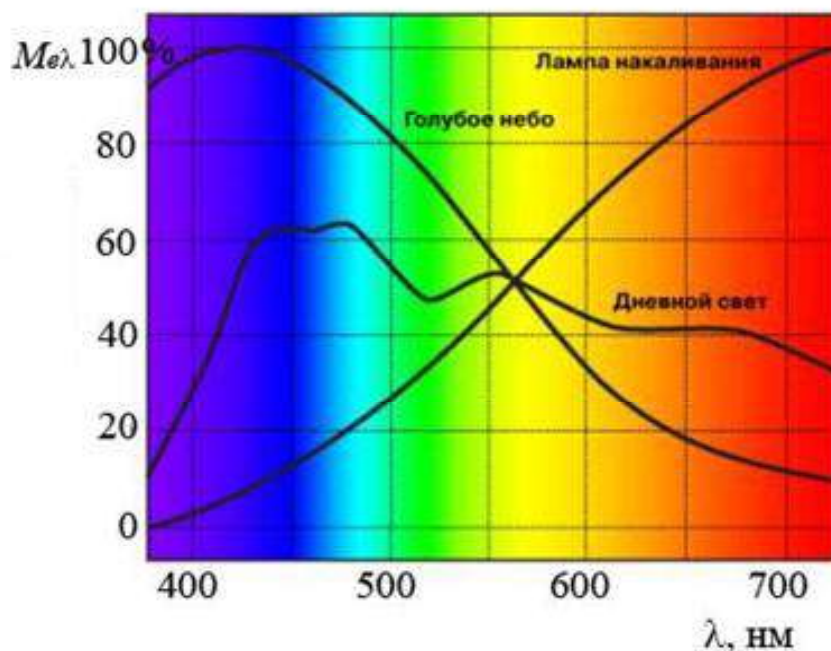


Рис. 16.2. Графики спектральной плотности энергетической светимости различных источников света в видимом диапазоне длин волн

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 различие 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. 16.2, 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 (§ 14) 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. 16.3). 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. 16.3. Лампа галогенная

§ 17. 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 [16]. 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. 16.1).



Рис. 16.1. 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 прекращения 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. 16.2 показан спектр излучения подобной люминесцентной лампы. Такие лампы излучают преимущественно в видимом диапазоне.

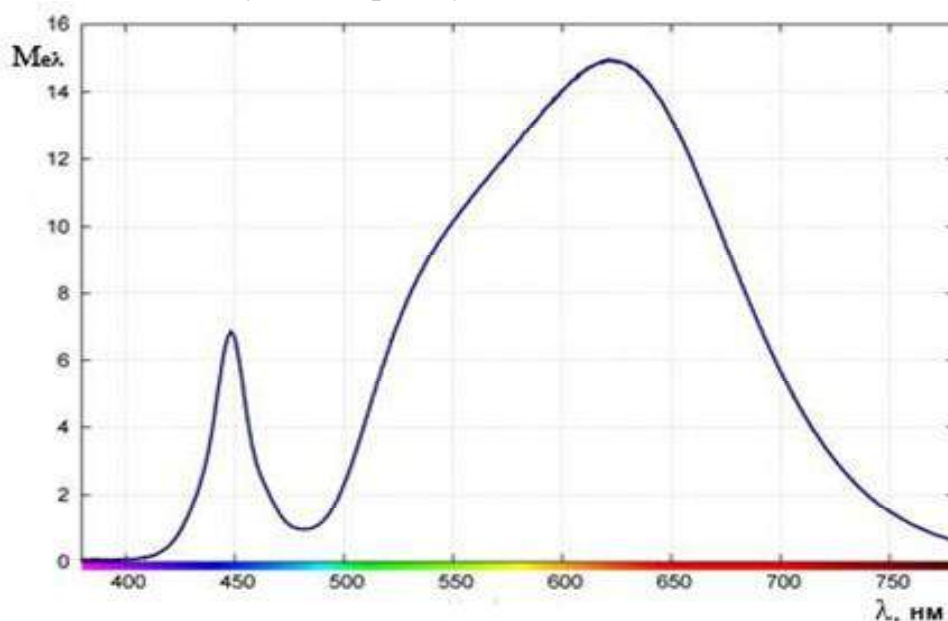


Рис. 16.2. Спектр излучения люминесцентной лампы

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.

§ 18. 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 [17]. Такие излучатели изготавливают из полупроводниковых материалов высокой частоты, добавляя незначительное количество примесей. Данные примеси создают избыток «дырок» (тип р) или электронов (тип n). На границе раздела материалов р и n типа образуется полупроводниковый р-n переход. Если к такому переходу приложить

небольшое напряжение в несколько вольт, к п материалу отрицательное, а к р положительное, то электроны и «дырки» начнут перемещаться навстречу друг другу. В зоне контакта при рекомбинации они будут испускать фотоны [17]. 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 [1]. Подлинная революция в производстве светодиодов произошла в начале 90-х годов, когда, благодаря работам Ж.И. Алфёрова 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. [1]

Светодиодный источник света состоит из (рис. 18.1): излучающего элемента, роль которого играет полупроводниковый кристалл р-п 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) [18]. 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.



Рис. 18.1. Устройство светодиодной лампы

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 мощности (до 10^{11} Вт/см² в непрерывном режиме и до 10^{18} Вт/см² в импульсе), 4) высокой степенью монохроматичности ($\Delta\lambda = 10^{-9}$ нм при $\lambda = 500$ нм, 5) способностью фокусироваться в исключительно малые объёмы порядка λ^3 [1].

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 возбуждённых атомов. Такая среда называется активной. Излучение с частотой, соответствующей переходу атома из возбуждённого в невозбуждённое 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/(см²·ср).

§ 19. 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 концентрирующих 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 [17]. 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. 19.1), 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 α . 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. 19.2 [19].

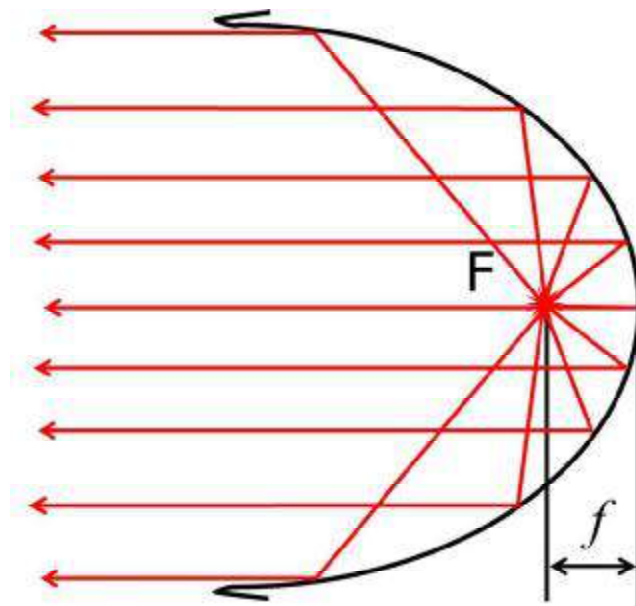


Рис. 19.1. Формирование светового поля с помощью параболического отражателя

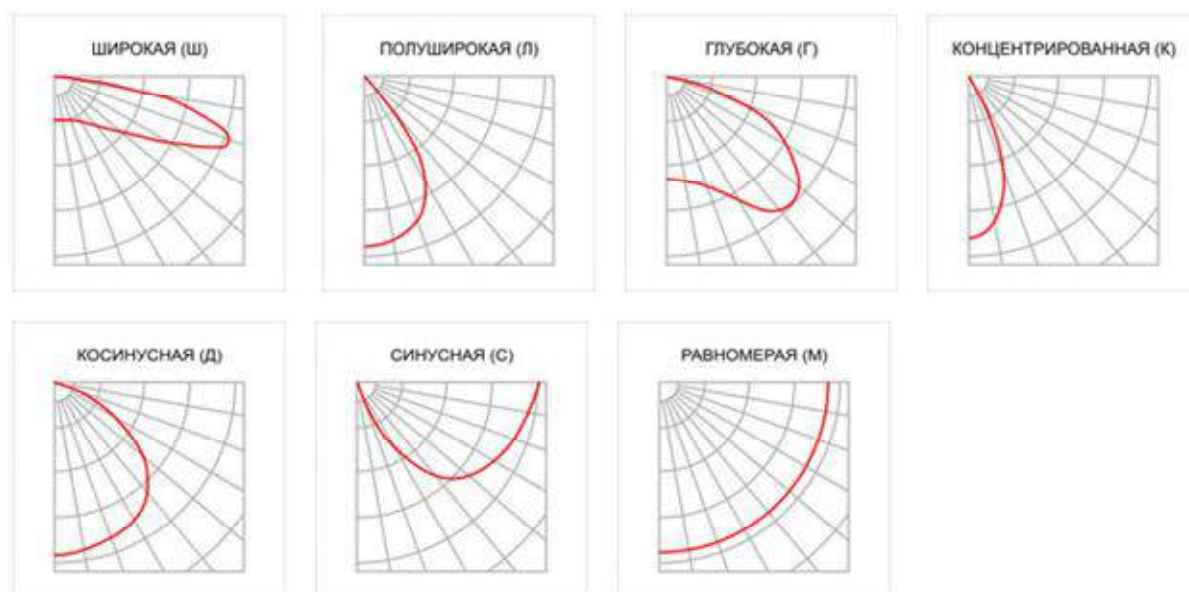


Рис. 19.2. Типовые кривые силы света

ГЛАВА 5. КОЛОРИМЕТРИЯ

§ 20. 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 [2].

Колориметрия – наука о методах измерения и количественном выражении цвета [20]. 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 [21].

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 [22]. 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 [2]. 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.

§ 21. 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 (§ 20). 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. 21.1).

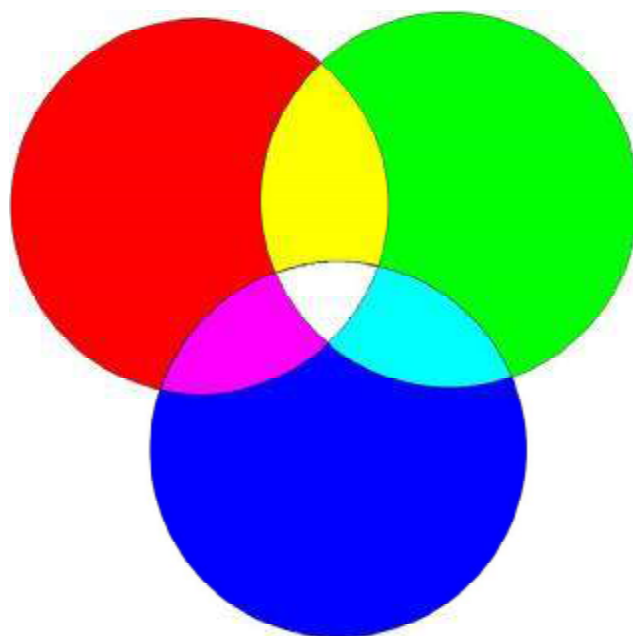


Рис. 21.1. Смешение базовых цветов RGB

Существует несколько способов аддитивного сложения цветов:

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

2) Смешение 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 [2].

Аналогично рассмотрим один из вариантов аддитивного синтеза цвета с использованием трёх проекторов и белого экрана (рис. 21.2). 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.

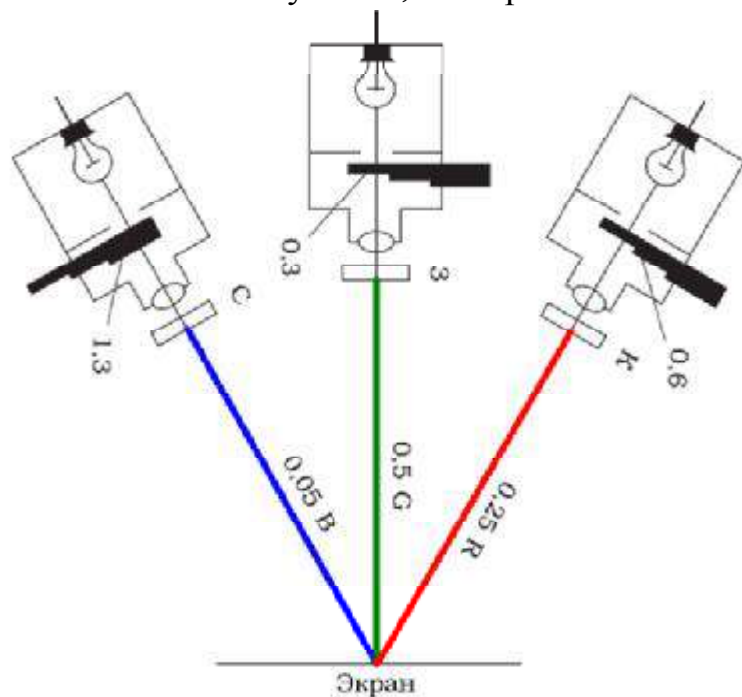


Рис. 21.2. Схема аддитивного синтеза цвета:

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

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.

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. **С** (cyan), **М** (magenta), **Y** (yellow) (синий, пурпурный и жёлтый) – основные краски субтрактивного синтеза. На рис. 21.3. 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.

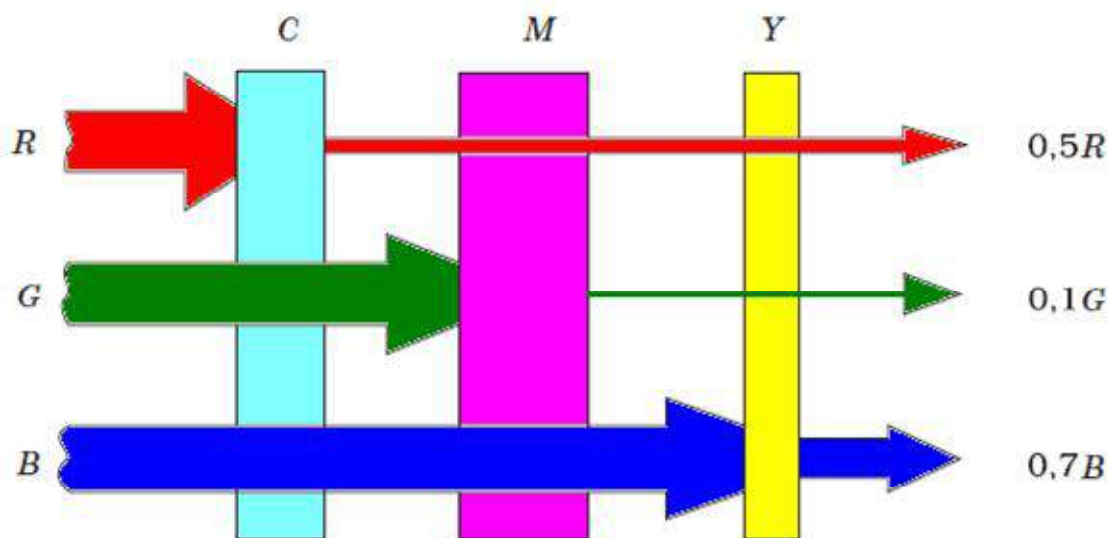


Рис. 21.3. Схема управления основными излучениями при субтрактивном синтезе цвета

При смешении 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. 21.4). Принципы работы копировально-множительной техники будут изложены в § 29.

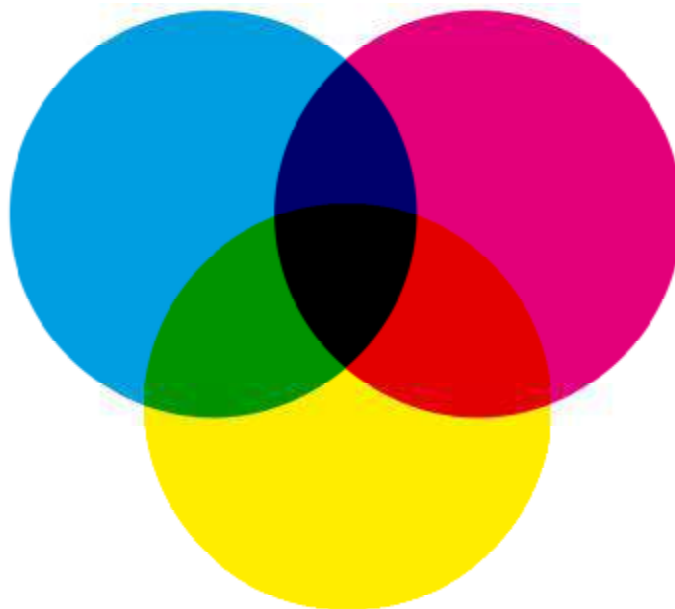


Рис. 21.4. Смешение базовых цветов СМУК

§ 22. Диаграмма цветности

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

$$C = R\vec{R} + G\vec{G} + B\vec{B}. \quad (22.1)$$

где C – 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:

$$r = \frac{R}{m}; g = \frac{G}{m}; b = \frac{B}{m}. \quad (22.2)$$

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.

$$C = r\vec{R} + g\vec{G} + b\vec{B}. \quad (22.3)$$

Согласно третьему закону аддитивного синтеза (§ 21) «цвета нескольких излучений описаны уравнениями, то цвет смеси излучений выражается суммой этих уравнений». Таким образом, с помощью цветовых уравнений легко находить результирующий цвет от двух и более излучений различного цвета (различных длин волн). Для этого необходимо по-координатно сложить уравнения от каждого излучения:

$$C = (R_1 + \dots + R_n)\vec{R} + (G_1 + \dots + G_n)\vec{G} + (B_1 + \dots + B_n)\vec{B}. \quad (22.4)$$

При выполнении расчётов, часто оказываются полезными удельные координаты $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$, которые получаются путём нормировки подобно (22.2).

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 [2], 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 [2].

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.

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 цветowych координат. Началом координат служит точка, соответствующая черному цвету. В этой точке свет отсутствует, воспринимаемый колбочками, а значит, и цвет. Система цветowych 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 [2].

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. 22.1). Для определения качественных

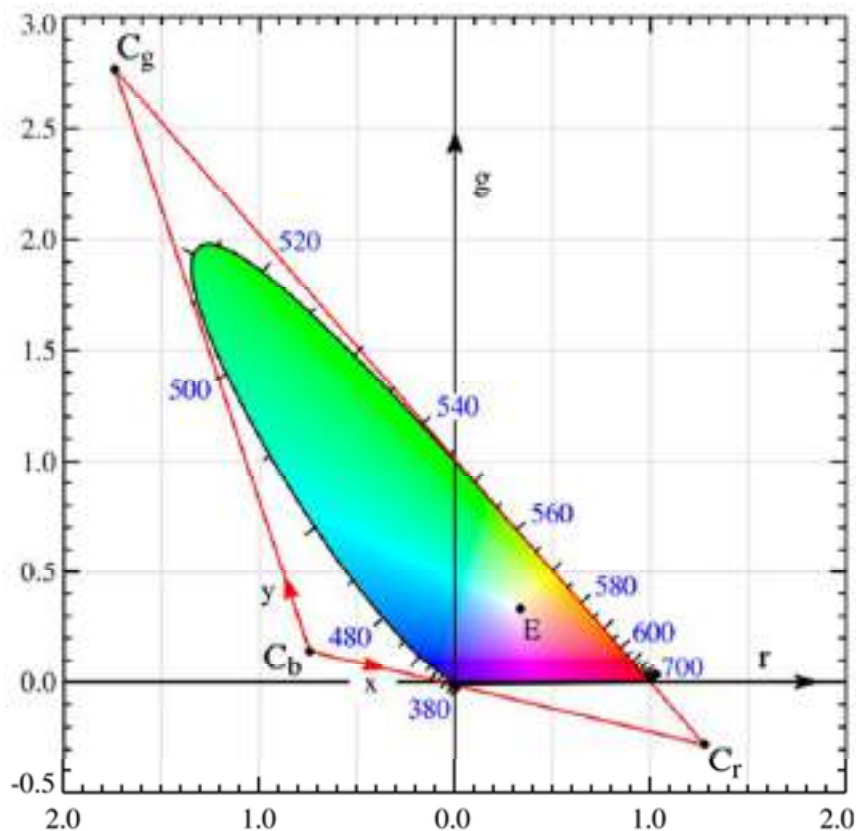


Рис. 22.1. Диаграмма цветности **rg**

характеристик цвета пользуются диаграммой цветности **rg**, изображённой на сетке прямоугольных.

Данная диаграмма характеризуется следующими колориметрическими свойствами:

- 1) белая точка Е 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.

§ 23. Колориметрические системы CIE

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 CIE, 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 (§ 20). 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 количеств 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 [2]:

$$\begin{aligned}
B_R &= 680 L_R = 680 \text{ кд/м}^2; \\
B_G &= 680 L_G = 3121 \text{ кд/м}^2; \\
B_B &= 680 L_B = 41 \text{ кд/м}^2.
\end{aligned}
\tag{23.1}$$

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: $\Phi_R = 680 \text{ лм}$, $\Phi_G = 3121 \text{ лм}$, $\Phi_B = 41 \text{ лм}$.

Рассмотрим еще одну колориметрическую систему **CIE XYZ**. Данная система была предложена с целью упрощения расчётов яркости. Основным смыслом CIE следующий: выбрав в качестве трёх основных три цвета спектра и соединив их прямыми линиями, получим треугольник. Из-за кривизны линий, на которых лежат спектральные цвета, некоторые цвета всегда будут выпадать из этого треугольника и в соответствующих цветовых уравнениях обозначаться отрицательными величинами. По этой причине CIE выбрала в качестве базовых некоторые нереальные цвета и расположила их по осям X, Y и Z таким образом, чтобы вся область между боковыми сторонами и «пурпурной» прямой лежала внутри треугольника XYZ. Для перехода от одной колориметрической системы к другой существуют несложные преобразования.

Построение системы **CIE XYZ** основано на следующих положениях [2]:

- 1) все реальные цвета должны иметь только положительные координаты;
- 2) яркость должна определяться одной координатой цвета;
- 3) координаты белого цвета равноэнергетического источника должны быть равны между собой.

Путем математических преобразований с учётом указанных выше требований удалось осуществить переход от реальных основных излучений R, G, B к основным нереальным (сверхнасыщенным) X, Y, Z.

В соответствии со вторым условием построения **CIE XYZ** более насыщенные цвета L_X и L_Z имеют яркостные коэффициенты, равные 0 ($L_X = 0$; $L_Z = 0$). Коэффициент L_Y принимают равным 1 ($L_Y = 1$). Формула для расчета яркости ($B_{ц}$) значительно упрощается и выглядит следующим образом:

$$B_{ц} = 68Y. \tag{23.2}$$

где Y – координата цвета, выраженная в энергетических единицах. Яркостный коэффициент цвета в этом случае определяется координатой цветности (y): $L_y = y$.

ГЛАВА 6. ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Данная глава 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.

§ 24. 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. 24.1). 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) [23]. Использовать лупу для увеличения можно двояко, помещая её близко к глазу или вдали от него. Рассмотрим принцип действия лупы при помещении вблизи глаза. Ход лучей, которые дают прямое увеличенное мнимое изображение, показан на рис. 24.2.



Рис. 24.1. Лупа, помещённая вдали от глаза

Другой важной величиной, характеризующей лупу, является увеличение. Она определяется по формуле [24]:

$$\Gamma = \frac{250}{f, \text{ мм}}. \quad (24.1)$$

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

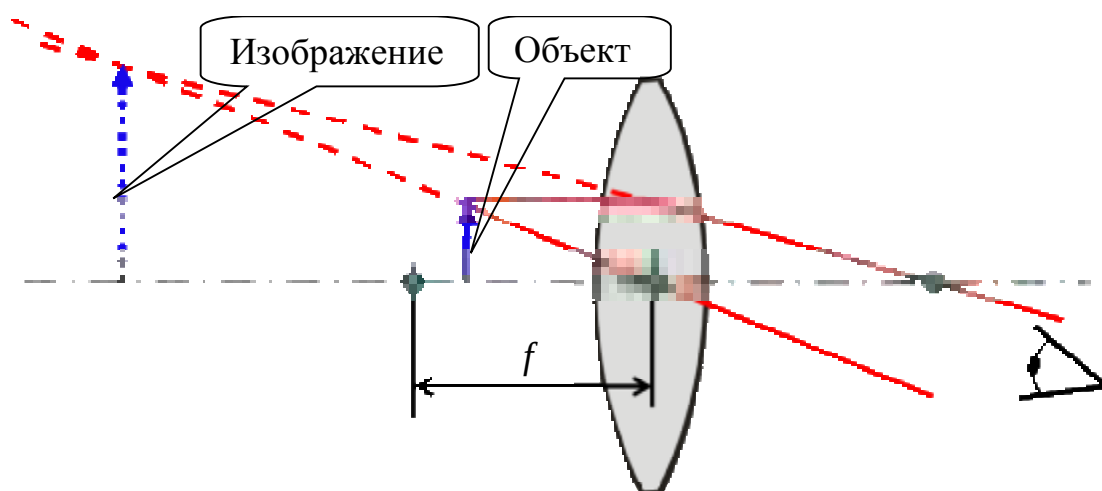


Рис. 24.2. Получение мнимого изображения с помощью лупы

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, так же как и для лупы, является увеличение. Оно также рассчитывается по формуле (24.1).

§ 25. 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. 25.1 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. 24.2), 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. ~ 500 нм (см. табл. 2.1). 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 ~ 100 нм, и, конечно, атомы размером $\sim 0,1$ нм.

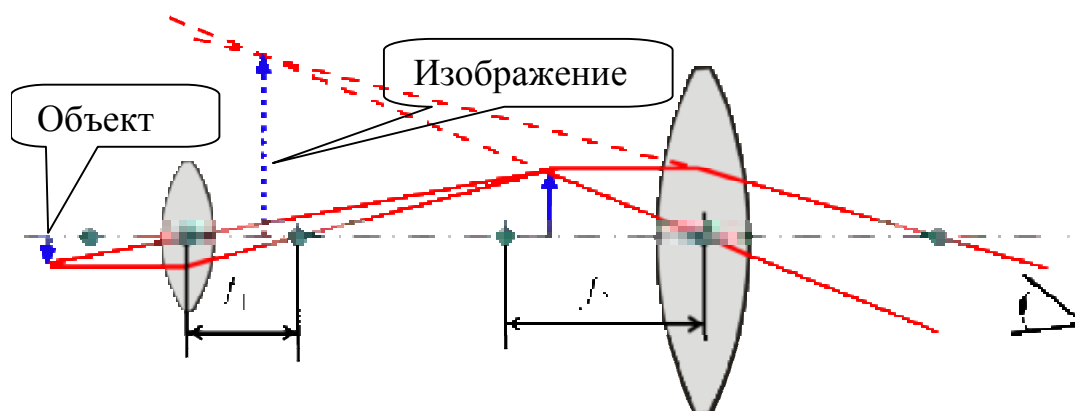


Рис. 25.1. Ход лучей в микроскопе

Аналогичным образом устроен телескоп-рефрактор Кеплера, дальномер и любая оптическая трубка (рис. 25.2). 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.

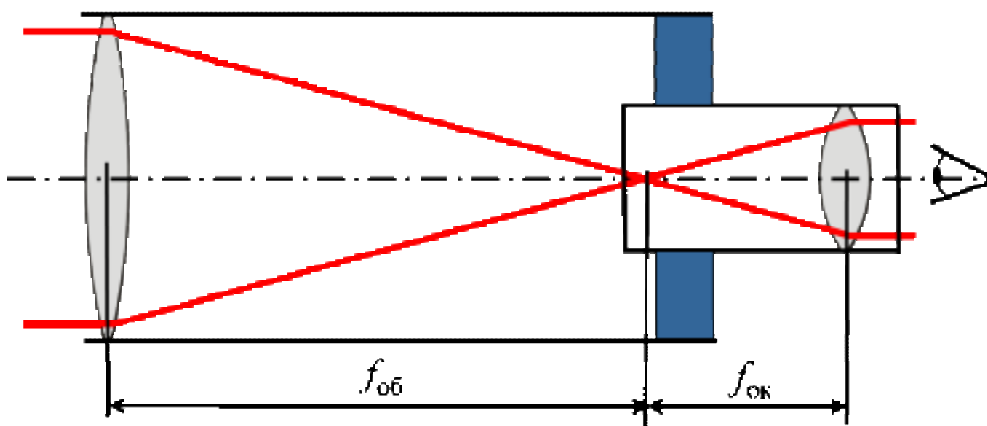


Рис. 25.2. Оптическая схема телескопа

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. 25.3, 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. 25.3, б).

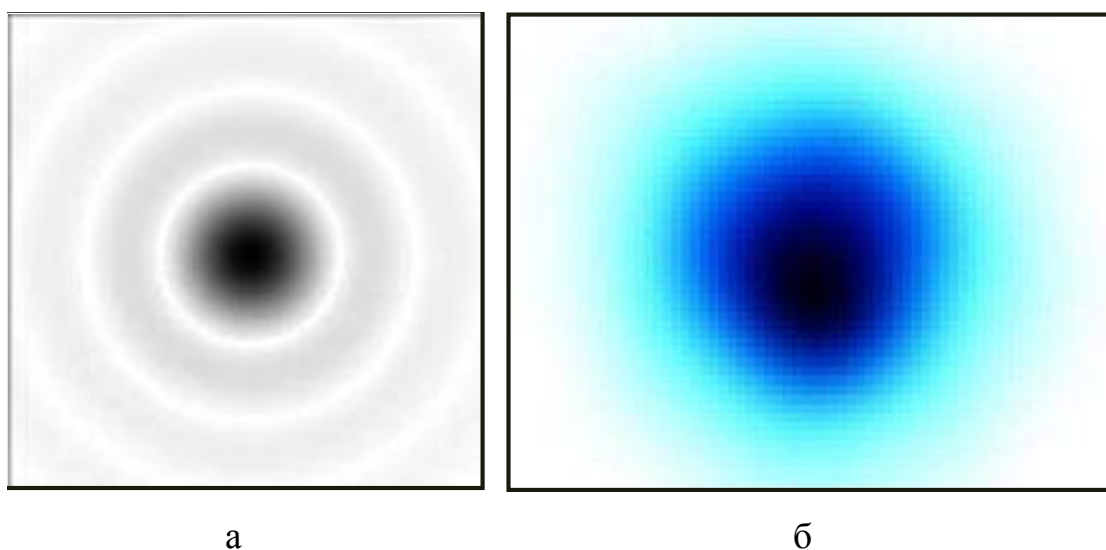


Рис. 25.3. Фотография компактного объекта (карликовая звезда) (а), фотография протяжённого объекта (звезда Бетельгейзе) (б)

§ 26. Волоконная оптика

Световые волокна используются в современной технике для передачи изображения и информации на расстояние. Свет, попадая в волокно, распространяется в нём почти без затухания. Даже если волокно изогнуто, свет будет в нём распространяться за счёт явления полного внутреннего отражения от внутренних границ, т.к. они имеют меньший показатель преломления, чем основное вещество волокна, а угол падения больше, чем предельный угол полного внутреннего отражения (рис. 26.1).

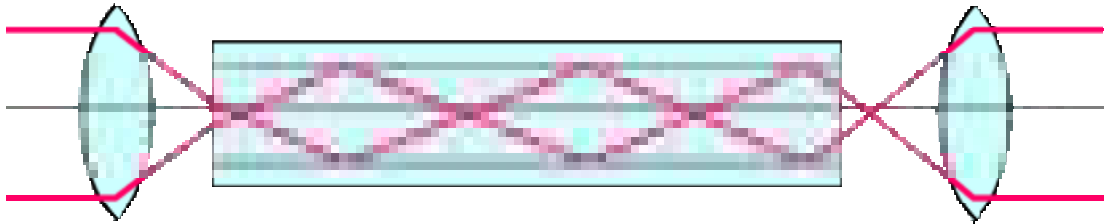


Рис. 26.1. Ход лучей в световом волокне

Если собрать много таких волокон в жгут (рис. 26.2), то они могут передавать изображение, которое будет тем чётче, чем больше волокон будет на единицу площади поперечного сечения жгута.

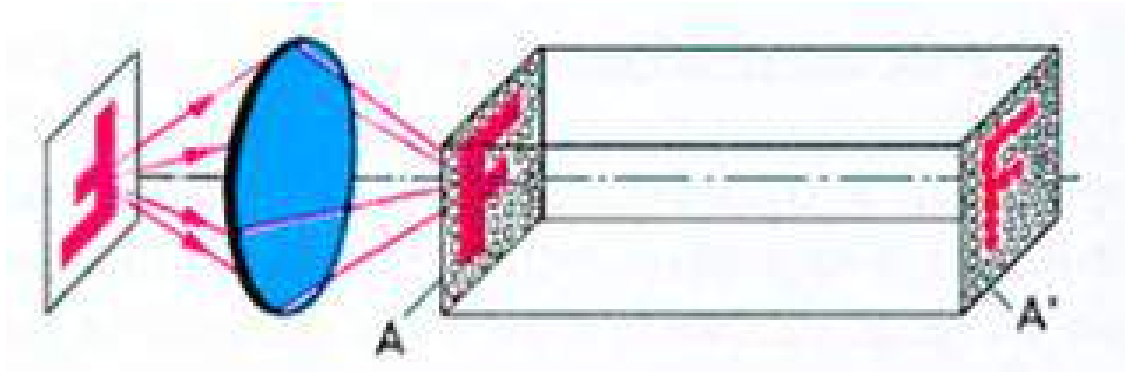


Рис. 26.2. Передача изображения в жгуте из световых волокон

С помощью такого жгута из световых волокон можно получить изображение объекта, находящегося в труднодоступном месте (рис. 26.3). Это основной элемент волоконно-оптического эндоскопа. Такой прибор является разновидностью микроскопа. Только объектив такого микроскопа отделён от окуляра жгутом из световых волокон. Кроме того, вокруг этого жгута помещают дополнительный жгут, через который подают свет на исследуемый объект.

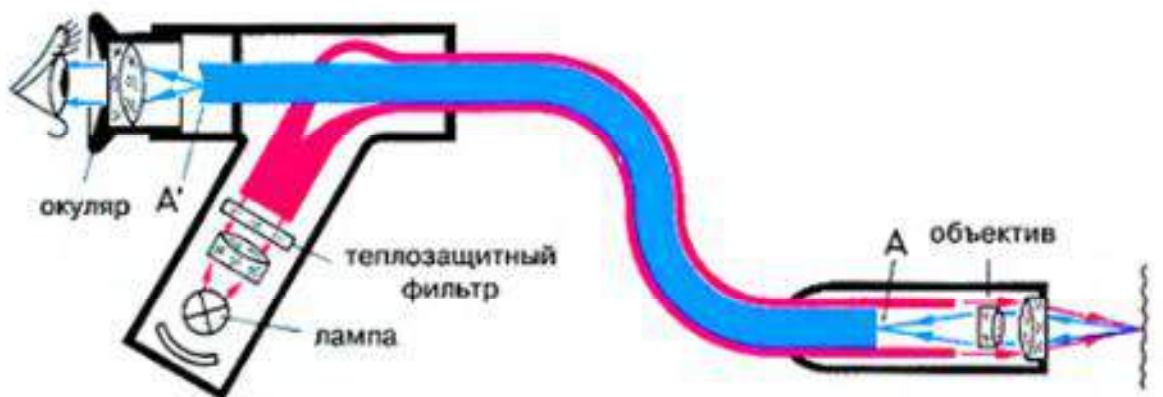


Рис. 26.3. Волоконно-оптический эндоскоп

§ 27. 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. 27.1). 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 перевёрнутым. 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 (см. § 9).

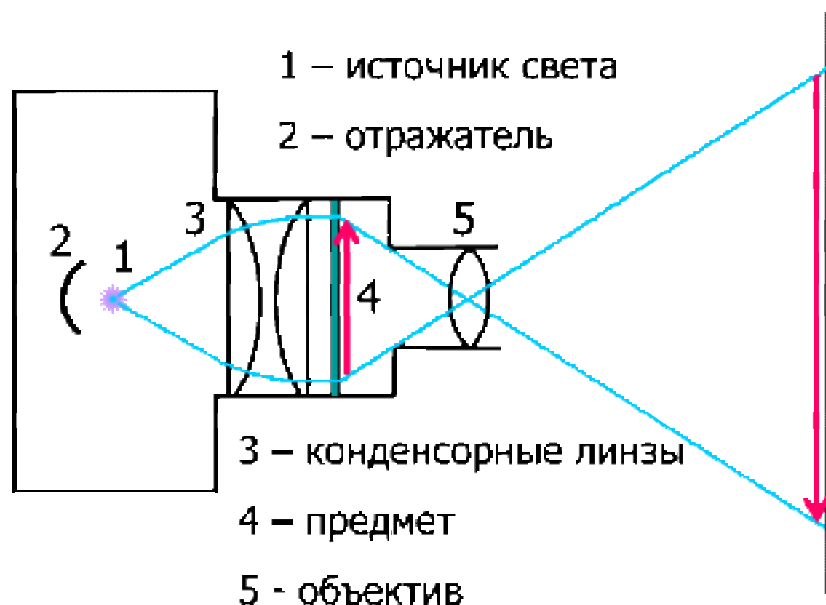


Рис. 27.1. Ход лучей в проекторе

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. 27.2). 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.

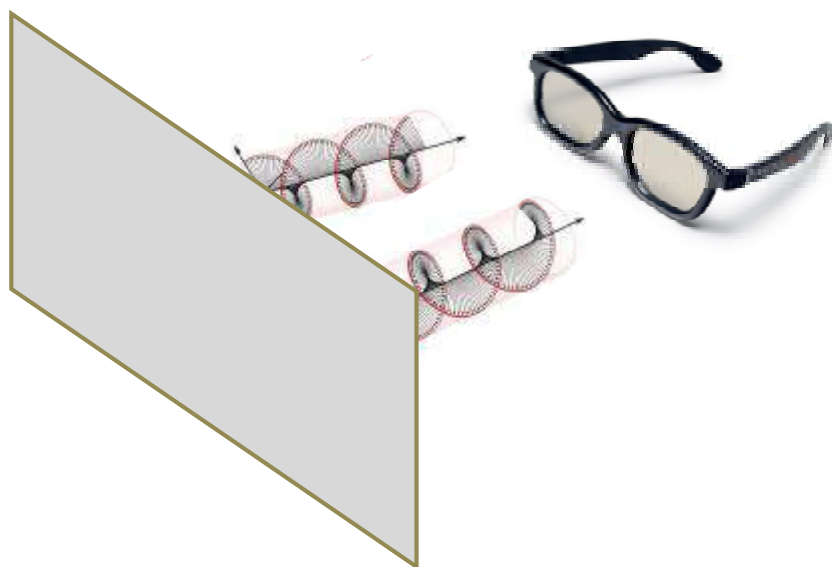


Рис. 27.2. Принцип получения стереоизображения

§ 28. 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 перевёрнутое изображение на экране (рис. 28.1). 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.

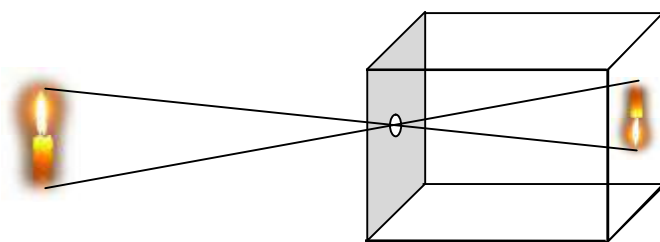


Рис. 28.1. Получение изображения объекта с помощью камеры-обскуры

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. 28.2). Главной характеристикой объектива является его светосила – отношение диаметра объектива при полностью раскрытой диафрагме D к его фокусному расстоянию f –

D/f . 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

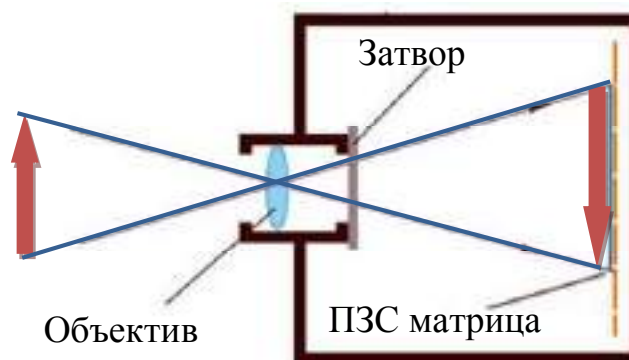


Рис. 28.2. Оптическая схема фотоаппарата

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. Кажется бы, можно легко достичь более высоких показателей светосилы путём увеличения диаметра объектива, но это приводит к появлению различных искажений изображения. Одно из таких искажение называется сферической аберрацией (рис. 28.3). Помимо этого, возникают и другие виды искажений: хроматическая аберрация, кома, дисторсия. Причина всех видов аберраций 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 аберраций. 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.

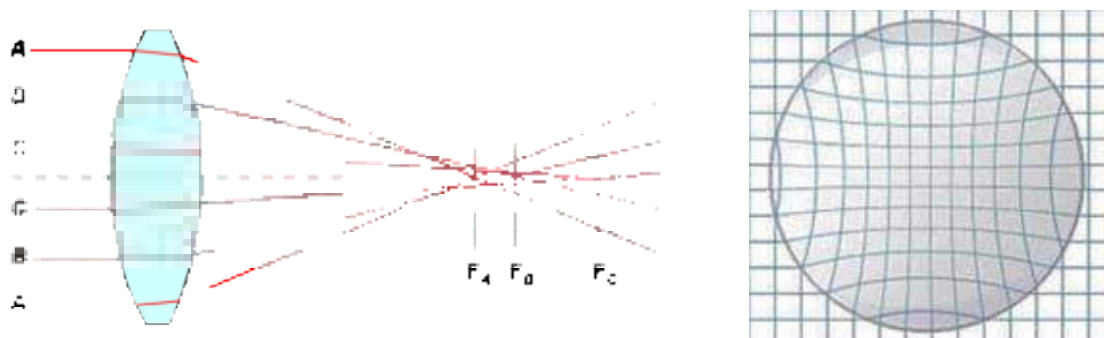


Рис. 28.3. Различная сходимость лучей – причина сферической аберрации

§ 29. Копировально-множительная техника

В настоящее время копировально-множительная техника в силу своей относительной дешевизны во многом заменила фотографическую. Современные цветные лазерные принтеры позволяют получать качество изображения, практически не уступающее по качеству хорошей фотографии. Если необходимо скопировать информацию с листа, то её сначала сканируют и переводят в цифровой формат. На рис. 29.1 показан принцип работы сканера. Объект сканирования освещают лампой. Отражённый от объекта свет через систему зеркал подаётся на светочувствительную матрицу, которая преобразует световой сигнал в электрический с помощью ПЗС-матрицы (матрица CCD – charge-coupled device – англ.), а затем в цифровой. Цвет объекта разлагается по трём каналам одновременно на красный, зелёный и синий (RGB-формат – § 21). Отсканированный объект можно воспроизвести на экране монитора, используя аддитивное воспроизведение цвета (см. первый закон аддитивного воспроизведения цвета § 21).

В основе работы принтера используется субтрактивное воспроизведение цвета (§ 21) с применением тонеров синего (Cyan), пурпурного (Magenta), жёлтого (Yellow) и чёрного (black) цвета – CMYK-формат. Поэтому прежде чем цифровой сигнал от сканера попадёт в принтер, он проходит через CMYK-конвертер. На бумагу последовательно наносятся тонеры всех четырёх цветов для синтеза исходного цвета. Процесс нанесения тонера на бумагу показан на рис. 29.2. Поверхность фотобарабана заряжается отрицательным зарядом при каждом его повороте. Лазерный луч, попадающий на поверхность барабана, локально разогревает её. Так как

поверхность фотобарабана обладает полупроводниковыми свойствами, то электрическое сопротивление нагретых участков резко падает и заряд с них стекает. Тонер наносится на незаряженные участки фотобарабана, а с него на бумагу. Термовал окончательно фиксирует тонер на бумаге.

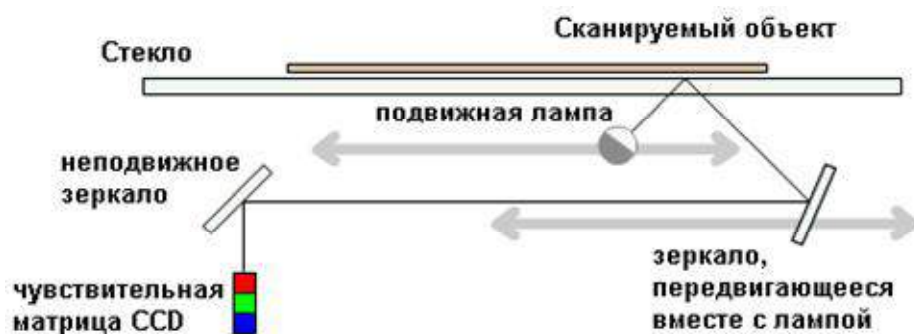


Рис. 29.1. Принцип работы сканера

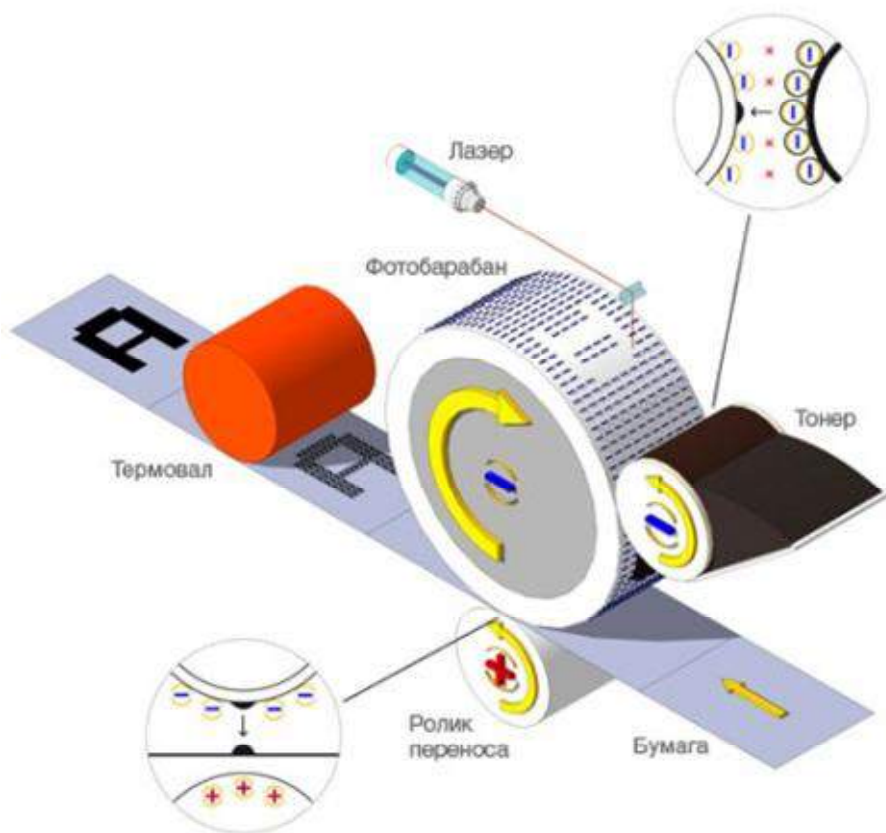


Рис. 29.2. Принцип работы лазерного принтера

ВОПРОСЫ ПО ТЕМАМ

Вопросы по теме главы 1

«Физическая природа излучения и его характеристики»

1. Что называется дуализмом природы света?
2. В каких пределах длин волн электромагнитного излучения находится видимый свет?
3. Как определяются основные энергетические характеристики излучения: поток излучения, энергетическая светимость, энергетическая яркость, облучённость, спектральная плотность потока излучения? В каких единицах СИ они измеряются?
4. Как определяются основные световые характеристики излучения: световой поток, сила света, светимость, яркость, освещённость, спектральная плотность светового потока? В каких единицах СИ они измеряются?
5. Сформулировать 2 закона освещённости.

Вопросы по теме главы 2

«Преобразование излучения оптическими средами»

1. Что такое коэффициент поглощения света? Сформулировать закон Бугера.
2. Как определяется коэффициент отражения и пропускания поверхности?
3. Что такое оптическая плотность?
4. Чем отличается отражение света от зеркальной и шероховатой поверхности?
5. Сформулируйте закон Ламберта для рассеяния света от шероховатой поверхности. Для каких поверхностей он применим?
6. Что такое альбедо поверхности?

Вопросы по теме главы 3

«Приёмники оптического излучения»

1. Что называется приёмником оптического излучения?
2. Каковы основные характеристики фотоприёмников?
3. Какой фотоприёмник называется идеальным?
4. Чем обусловлено цветовое восприятие человеческого глаза?
5. С какой особенностью человеческого восприятия света связана поговорка: «В темноте все кошки серые»?

6. Какие фотоэлектрические приёмники обладают наибольшей чувствительностью и почему?

7. Что такое красная граница фотоэффекта? Как она влияет на селективность приёмника излучения?

8. Что такое квантовый выход фотоэлектрического и фотохимического преобразования?

9. Для чего в фотоматериал добавляют сенсibilизатор?

Вопросы по теме главы 4 «Источники света»

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?

Вопросы по теме главы 5 «Колориметрия»

1. Что такое цвет?

2. Какие существуют способы воспроизведения цвета?

3. Сформулируйте законы аддитивного воспроизведения цвета.

4. Какие основные цвета используют в полиграфии для воспроизведения цвета?

5. Что такое цветовое пространство?

Вопросы по теме главы 6 «Оптические приборы»

1. На какие группы делятся все оптические приборы?

2. Какой предел увеличения имеют лупы и окуляры?

3. Какие оптические элементы входят в состав телескопа?

4. Каково строение оптических волокон, и для каких целей они используются?

5. Из каких оптических элементов состоят проектор и фотоаппарат?

6. Какой принцип работы лазерного принтера?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. А.Ю. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Шашлов, А.Б. Основы светотехники: учебник для вузов / А.Б. Шашлов. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Логос, 2011. – 256 с.
3. Щепина, Н.С. Основы светотехники / Н.С. Щепина – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.
4. Гуторов, М.М. Основы светотехники и источники света: учебное пособие для вузов / М.М. Гуторов – 5-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.
5. Мешков, В.В. Основы светотехники: учебное пособие для вузов / В.В. Мешков – 2-е изд., испр. и дополн. – М.: Энергия, 1979. – 368 с.
6. Шрёдер, Г. Техническая оптика / Г. Шрёдер, Х. Трайбер – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
7. ГОСТ 26148-84. Фотометрия. Термины и определения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 25 с.
8. Демидов, В.Е. Как мы видим то, что видим / В.Е. Демидов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Знание, 1987. – 240 с.
9. ГОСТ 26148-84. Фотометрия. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 25 с.
10. ГОСТ 8.332-2013. Световые измерения. Значения относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 12 с.
11. Гершун, А.А. Избранные труды по фотометрии и светотехнике. Сборник статей / А.А. Гершун – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 400 с.
12. ГОСТ 3514-94. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 39 с.
13. ГОСТ 10691.0-84. Материалы фотографические чёрно-белые на прозрачной подложке. Метод сенситометрического испытания. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 14 с.
14. 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.

15. ГОСТ Р 55702-2013. Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров. – М.: Стандартинформ, 2014. – 43 с.
16. Ламехов, А.О. Светотехника и светоизмерения: учебное пособие для средних специальных учебных заведений ГА / А.О. Ламехов, Ю.В. Фрид, Г.В. Журкин – М.: «Машиностроение», 1980. – 296 с.
17. Шеховцов, В.П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов / В.П. Шеховцов – М.: Форум, 2009. – 160 с.
18. Джедай-Электромастер. Как подключить светодиодный светильник. – <http://jelektro.ru/vse-o-elektromontazhe/ustrojstvo-podkljuchenie-svetodiodnogo-svetilnika.html>.
19. ГОСТ Р 54350-2015 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2015. – 45 с.
20. Большой энциклопедический словарь. Физика. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М. Прохоров 4-е изд. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – 943 с.
21. Научно-технический энциклопедический словарь. – <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ntes/5387/ЦВЕТ>.
22. Стефанов, С. Цвет READY-MADE или теория и практика цвета / С. Стефанов, В. Тихонов. – М.: РепроЦЕНТР, 2005. – 320 с.
23. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – М.: Стандартинформ, 2014. – 31 с.
24. ГОСТ 25706-83. Лупы. Типы, основные параметры. Общие технические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 4 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
 Глава 1. Физическая природа излучения и его характеристики	
§ 1. Современное представление о природе света	4
§ 2. Спектр электромагнитных полей	5
§ 3. Энергетические характеристики излучения	7
§ 4. Световые характеристики излучения	10
§ 5. Законы освещённости	13
 Глава 2. Преобразование излучения оптическими средами	
§ 6. Общие сведения об оптических свойствах тел	15
§ 7. Поглощение света. Закон Бугера	16
§ 8. Отражение и преломление света на границе двух сред	18
§ 9. Рассеяние света	21
 Глава 3. Приемники оптического излучения	
§ 10. Основные характеристики приёмников излучения	24
§ 11. Глаз – фотобиологический приёмник излучения	26
§ 12. Фотофизические приёмники	28
§ 13. Фотохимические приёмники	31
 Глава 4. Источники света	
§ 14. Основные характеристики источников излучения	33
§ 15. Законы теплового излучения	34
§ 16. Лампы накаливания	36
§ 17. Газоразрядные лампы	38
§ 18. Светодиоды и лазеры	41
§ 19. Проекторы и светильники	44

Глава 5. Колориметрия

§ 20. Основные понятия колориметрии	46
§ 21. Субтрактивное и аддитивное воспроизведение цвета	47
§ 22. Диаграмма цветности	50
§ 23. Колориметрические системы CIE	53

Глава 6. Оптические приборы

§ 24. Лупы и окуляры	55
§ 25. Телескопы и микроскопы	57
§ 26. Волоконная оптика	59
§ 27. Проекторы	60
§ 28. Фотографическая оптика	62
§ 29. Копировально-множительная техника	64
Вопросы по темам	66
Библиографический список	68