

1. ОСНОВЫ СВЕТОТЕХНИКИ

1.1. Природа и основные свойства оптического излучения

Светотехникой называется наука, занимающаяся изучением генерирования, распространения и перераспределения в пространстве электромагнитных излучений оптической области спектра. Под оптической областью спектра понимают часть спектра электромагнитных излучений с длинами волн λ от 10 нм до 1 мм [1]. Спектр оптических излучений делится на три участка:

ультрафиолетовые излучения – от 10 до 380 нм;

видимые излучения – от 380 до 770 нм;

инфракрасные излучения – от 770 до 1 мм.

Оптические излучения отличаются единством принципов возбуждения и общностью методов их преобразования и использования. Инфракрасные излучения обнаруживаются в основном по их тепловому действию. Ультрафиолетовые излучения активно вступают во взаимодействие с веществом (фотоэлектрическое, фотохимическое действие, фотолюминесценция и т. д.). Видимые излучения вызывают ощущение света.

Исследования показали, что у громадного большинства людей оценка светового действия видимых излучений различной длины волны практически одинакова, поэтому оказалось возможным определить светочувствительные свойства «среднего» глаза (стандартного фотометрического наблюдателя) и основать на них среднюю, свободную от индивидуальных особенностей, оценку светового действия излучения.

Излучения можно разделить на монохроматические (однородные), имеющие одну определенную длину волны, и сложные, состоящие из совокупности монохроматических излучений.

Монохроматические излучения различных длин волн в пределах видимой части спектра воспринимаются глазом как лучи разного цвета. Примерное соотношение между длинами световых волн и создаваемыми ощущениями следующее:

380–430 нм – фиолетовый,

430–470 нм – синий,

470–490 нм – голубой,

490–565 нм – зеленый,

565–595 нм – желтый,

595–620 нм – оранжевый,

620–770 нм – красный.

Чувствительность глаза не только ограничена определенной областью спектра, но и неравномерна в этой области, т. е. глаз воспринимает

свет различных длин волн, но одинаковой энергии неодинаково. Функция, описывающая зависимость чувствительности глаза от длины волны излучения, была определена экспериментально и названа функцией относительной спектральной чувствительности глаза (или кривой видимости) $V(\lambda)$. На рис. 1.1 приведена кривая относительной спектральной чувствительности в условиях дневного зрения (см. также цветную вклейку, рис. 1). При $\lambda = 555$ нм $V(\lambda) = 1,0$. Пунктиром для сравнения изображена кривая относительной видимости в условиях ночного зрения $V'(\lambda)$. Она смещена в область более коротковолновых излучений примерно на 50 нм. Функция $V(\lambda)$ имеет большое практическое значение в светотехнике, так как она положена в основу построения системы световых (фотометрических) величин и единиц измерения.

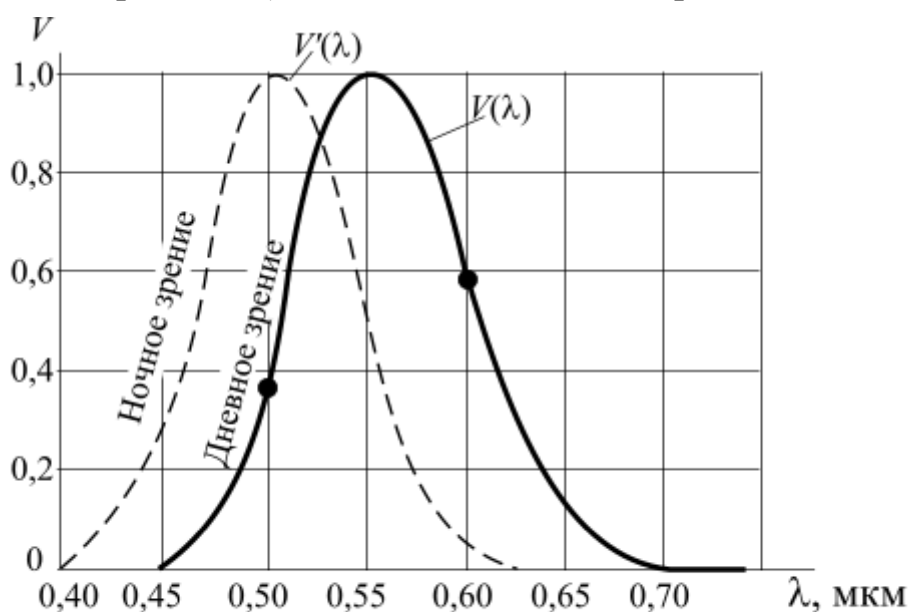


Рис. 1.1. Функция относительной спектральной чувствительности глаза (кривая видимости) в условиях дневного $V(\lambda)$ и ночного $V'(\lambda)$ зрения

В сложном излучении составляющие его однородные излучения пространственно не разделены. Глаз, как и многие приемники, реагирует на суммарное действие этих составляющих. Оценить и измерить монохроматические излучения, входящие в состав сложного, т. е. определить спектральный состав сложного излучения, можно только разложив его в спектр. По спектральному распределению излучения разбиваются на три класса: с линейчатым, полосатым и сплошным спектром. Графическое представление спектрального распределения сложных излучений приведено на рис. 1.2.

Линейчатые спектры – система светлых линий, разделенных темными промежутками (рис. 1.2,а). Каждая линия представляет собой однородное излучение определенной длины волны. Такие спектры излу-

чают вещества, находящиеся в газообразном состоянии (источники излучения, работающие в атмосфере газа или паров металла).

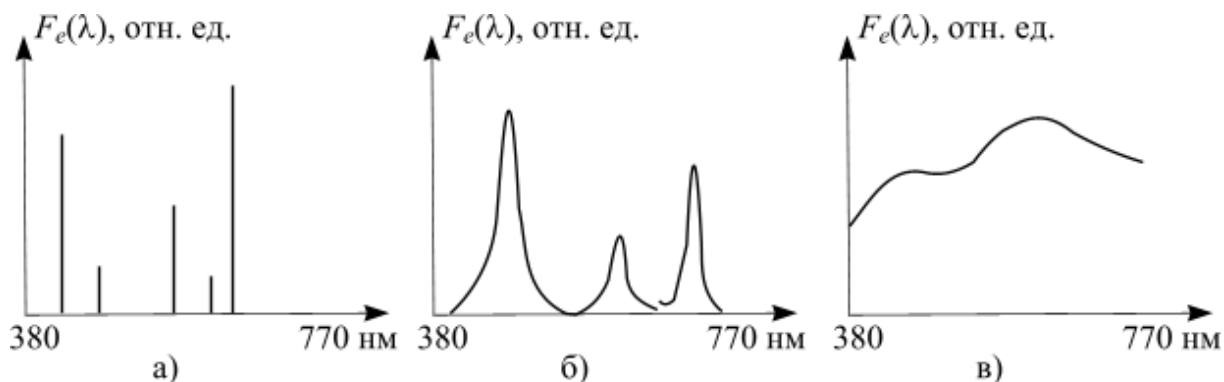


Рис. 1.2. Графическое представление спектрального распределения сложных излучений: а) линейчатый спектр; б) полосатый спектр; в) сплошной спектр

Газоразрядные источники, разряд в которых происходит в атмосфере инертного газа или паров металла, находящихся под высоким давлением, имеют полосатый спектр (рис. 1.2,б). Полосатые спектры получаются от слияния в полосы близко расположенных друг от друга спектральных линий.

Источники теплового излучения и излучения люминесценции жидких и твердых тел имеют сплошные спектры (рис. 1.2,в). Для характеристики спектрального распределения сложных излучений спектр разделяют на участки, которые содержат излучения, очень близкие по значениям λ . Излучение в пределах этого участка считается однородным. Считается также, что вся энергия данного участка спектра излучается с длиной волны, соответствующей центру участка.

1.2. Единицы измерения света

Электромагнитные излучения при распространении в пространстве переносят определенное количество энергии. Энергию, переносимую излучением оптической области спектра, называют лучистой энергией.

Для оценки излучений пользуются энергетическими и эффективными величинами. Основная особенность системы энергетических величин – независимость их от характеристик приемников света и вытекающая из этого универсальность. Однако энергетические величины не дают полного представления о действии излучений, так как при одной и той же мощности излучения различных длин волн создают различный эффект в приемнике света. В связи с этим во многих случаях пользуются системами эффективных величин, учитывающими спектральные характеристики чувствительности приемников света.

Энергетические величины и единицы измерения света. Для построения системы энергетических характеристик излучения в качестве исходной принята не энергия излучения, а мощность ее переноса F_e [1].

Мощность (количество энергии в единицу времени) излучения оптического диапазона спектра называется потоком излучения (лучистым потоком). Для измерения потока излучения используется единица мощности – ватт.

Если источник лучистой энергии за время dt излучает энергию dW , то мгновенное значение лучистого потока этого источника F_i будет равно:

$$F_i = dW / dt. \quad (1.1)$$

Часто пользуются понятием среднего значения лучистого потока F_e за конечный интервал времени t :

$$F_e = W / t, \quad (1.2)$$

где W – лучистая энергия, излучаемая источником за время t .

Данная характеристика является интегральной. Если рассматривается сложное излучение, заданное своим спектральным составом, то его поток излучения складывается из потоков однородных излучений, его образующих.

Для излучения с линейчатым спектром

$$F_e = \sum_{i=1}^n F_{\lambda_i}, \quad (1.3)$$

где F_{λ_i} – потоки излучения отдельных линий.

Для характеристики спектрального распределения потока излучения с полосатым и сплошным спектром пользуются величиной, называемой спектральной плотностью потока излучения $p(\lambda)$ и измеряемой в Вт/нм:

$$p(\lambda) = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta F_\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{dF_\lambda}{d\lambda}, \quad (1.4)$$

где ΔF_λ , dF_λ – соответственно лучистые потоки узких участков спектра шириной $\Delta\lambda$ и $d\lambda$.

Тогда поток излучения определяется формулой:

$$F_e = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} p(\lambda) d\lambda. \quad (1.5)$$

Кроме потока излучения система энергетических характеристик включает в себя следующие основные величины: энергетическую силу света, энергетическую светимость, энергетическую яркость, энергетическую освещенность [1].

Источники света излучают энергию неодинаково в различных направлениях. Для того чтобы охарактеризовать распределение потока излучения в пространстве, вводят величину, характеризующую пространственную (угловую) плотность потока излучения – силу излучения или энергетическую силу света $I_{e\alpha}$.

Энергетическая сила света источника в некотором направлении – это отношение потока излучения dF_e , исходящего от источника и равномерно распространяющегося внутри телесного угла $d\omega$, к величине этого угла.

$$I_{e\alpha} = dF_e / d\omega, \quad (1.6)$$

где $I_{e\alpha}$ – сила излучения в направлении α .

Сила излучения – величина, имеющая направления. За направление силы излучения принимают ось телесного угла OO' (рис. 1.3), в пределах которого распространяется и равномерно распределяется лучистый поток.

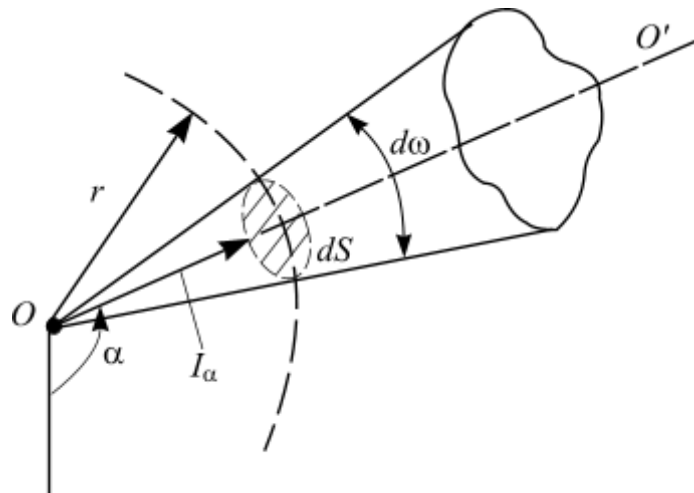


Рис. 1.3. К определению силы излучения

Вершина телесного угла совпадает со световым центром источника света.

Простейшим телесным углом будет угол, образованный конической поверхностью. На рис. 1.3 показан центральный телесный угол, опирающийся на участок поверхности сферы dS . Под величиной телесного угла понимают отношение площади сферической поверхности, на которую опирается центральный телесный угол, к квадрату радиуса сферы:

$$d\omega = dS / r^2. \quad (1.7)$$

За единицу телесного угла принят такой телесный угол, который вырезает на поверхности сферы участок с площадью, равной квадрату радиуса сферы. Эта единица телесного угла называетсястерадианом (ср). Очевидно, что наибольшая величина телесного угла равна 4π .

За единицу силы излучения принята сила излучения такого точечного источника, у которого в пределах телесного угла 1 ср равномерно распространяется лучистый поток в 1 Вт.

Если из светового центра источника в различных направлениях пространства откладывать значения силы излучения этого источника и через концы векторов провести поверхность, то мы получим фотометрическое тело излучателя, которое полностью характеризует распределение лучистого потока данного источника в окружающем его пространстве.

Строго говоря, понятие силы света может использоваться только для точечного источника света, т. е. для источника, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до точки, в которой оценивается его действие.

Реальный источник излучения имеет конечные размеры, пренебречь которыми для ряда расчетов нельзя. Для оценки равномерности распределения потока излучения по поверхности источника вводится понятие энергетической светимости (излучательности) M_e .

Энергетическая светимость равна отношению элементарного потока излучения dF_e к площади элементарного, т. е. бесконечно малого излучающего элемента $dS_{и}$:

$$M_e = dF_e / dS_{и}. \quad (1.8)$$

Единица измерения светимости имеет размерность Вт/м².

Для оценки условий освещения используют понятие энергетической освещенности (облученности). Освещенностью E_e называется плотность потока излучения на поверхности, на которую он падает:

$$E_e = dF_e / dS_0. \quad (1.9)$$

За единицу облученности принимают такую облученность, при которой на 1 м² поверхности падает и равномерно распределяется по ней 1 Вт потока излучения. Единица измерения энергетической освещенности – Вт/м².

Как уже указывалось раньше, распределение в пространстве лучистого потока точечного источника полностью характеризуется силой излучения. Излучатель конечных размеров может быть заменен очень

большим количеством точечных источников света. Энергетическая светимость M_e излучателя конечных размеров характеризует полный поток излучения, испускаемый каждым элементом его поверхности, однако этот элемент может излучать различно в разных направлениях, поэтому для характеристики пространственного распределения плотности потока излучения вводится понятие энергетической яркости L_e .

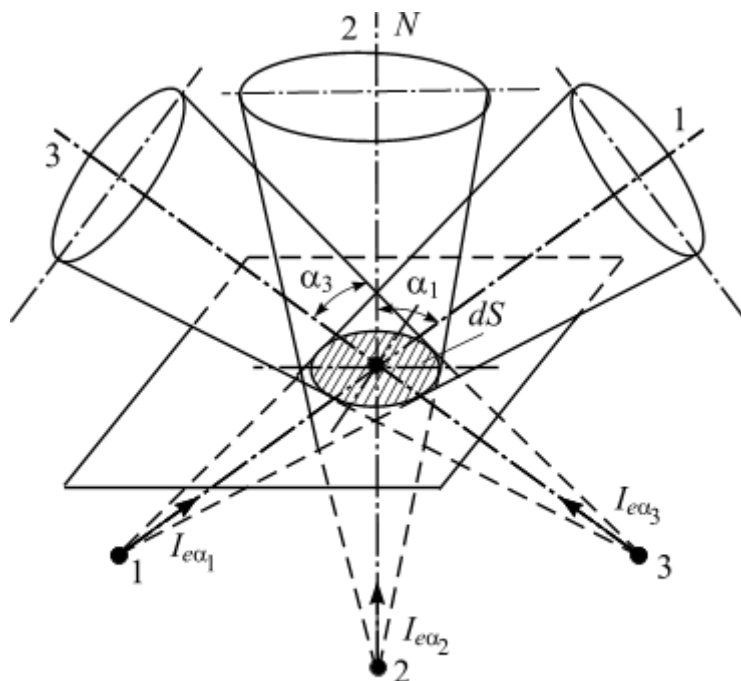


Рис. 1.4. К определению энергетической яркости

Пусть, как показано на рис. 1.4, поток излучения dF_e испускается элементом dS поверхности в направлениях 1, 2 и 3 (направление задается углом α , который отсчитывается от перпендикуляра N к элементу dS). Потоки излучения, исходящие от элемента излучающей поверхности в этих направлениях, можно представить как потоки излучения от точечных источников 1, 2 и 3 соответственно. Поток излучения каждого из них зависит от видимой с данного направления, задаваемого углом α , площади элемента dS , т. е. площади проекции $dS \cos \alpha$, и телесного угла $d\omega$, в котором сосредоточен этот поток. Тогда яркость L_e в направлении α равна:

$$L_{e\alpha} = dF_e / (dS \cos \alpha d\omega). \quad (1.10)$$

Единица энергетической яркости – Вт/(ср·м²). Она численно равна яркости равномерно излучающей поверхности площадью 1 м² в перпендикулярном к ней направлении при силе излучения, равной 1 Вт/ср.

Энергетическую яркость можно определить через силу излучения элемента поверхности излучателя. Используя для элемента поверхности соотношение (1.7), получим

$$L_{e\alpha} = dI_{e\alpha} / dS \cos \alpha. \quad (1.11)$$

Таким образом, энергетическая яркость – это отношение силы излучения элемента поверхности в выбранном направлении к площади его проекции на плоскость, перпендикулярную этому направлению.

Понятие энергетической яркости является наиболее сложным, однако введение этого понятия обусловлено его практической важностью, так как именно эту величину непосредственно оценивает глаз.

У большинства используемых излучателей яркость в различных направлениях пространства приблизительно одинакова. Это означает, что излучение подчиняется закону Ламберта, т. е. распределение силы излучения в пространстве описывается зависимостью:

$$I_{e\alpha} = I_{e0} \cos \alpha = L_e S \cos \alpha, \quad (1.12)$$

где I_{e0} – сила излучения в направлении $\alpha = 0$.

Такие тела называются диффузно излучающими. Фотометрическое тело излучателя, излучающего по закону Ламберта, представляет собой сферу, касательную к излучающей поверхности. На рис. 1.5 приведена диаграмма пространственного распределения силы излучения для равнорядной поверхности.

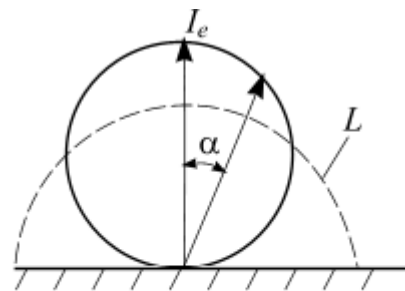


Рис. 1.5. Диаграмма пространственного распределения силы излучения поверхности, излучающей по закону Ламберта

Для равнорядной поверхности площадью S

$$F_e = \pi L_e S, \quad (1.13)$$

откуда

$$L_e = F_e / \pi S = M_e / \pi. \quad (1.14)$$

Фотометрические величины и единицы измерения света. Для оценки излучения по его действию на приемник используются специальные системы величин и единиц. Величины, составляющие такие системы, называются эффективными.

Большинство приемников излучения являются избирательными, т. е. их чувствительность к однородным излучениям различных длин волн неодинакова. Для количественной оценки процесса преобразова-

ния лучистой энергии вводится величина, равным значениям которой будет соответствовать равная мера реакции приемника – эффективный поток излучения, эквивалентный лучистой мощности, оцененной по уровню реакции приемника излучения.

Для однородного излучения

$$F_{\text{эф}}(\lambda) = F_e(\lambda) s(\lambda), \quad (1.15)$$

где $F_e(\lambda)$ – однородный поток излучения; $s(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника к однородному излучению с длиной волны λ .

С учетом свойства аддитивности, согласно которому эффективное действие потока сложного излучения равно сумме значений эффективных потоков однородных излучений, его составляющих, значение эффективного потока для излучения со сплошным спектром равно

$$F_{\text{эф}} = \int_0^{\infty} F_e(\lambda) s(\lambda) d\lambda. \quad (1.16)$$

Для оценки видимых излучений (особенно в тех случаях, когда приемником света является глаз) используется система эффективных величин и единиц, в которых в качестве функции спектральной чувствительности приемника используется функция относительной спектральной чувствительности глаза $V(\lambda)$ (рис. 1.1). Такие величины и единицы называются фотометрическими.

Перечень основных фотометрических величин соответствует рассмотренным ранее энергетическим величинам [1].

Световой поток представляет поток излучения, оцениваемый по зрительному восприятию. При известном потоке излучения световой поток на длине волны λ определяется как

$$F(\lambda) = K_m F_e(\lambda) V(\lambda), \quad (1.17)$$

где $F_e(\lambda)$ – поток излучения, а $V(\lambda)$ – относительная видимость на длине волны λ , коэффициент K_m – максимальное значение световой эффективности глаза (значение $V(\lambda)$ при $\lambda = 555$ нм).

Световой поток сложного излучения, в соответствии с (1.16), определяется как

$$F = K_m \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} F_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (1.18)$$

где λ_{\min} и λ_{\max} соответствуют границам видимого спектра.

Если принять $K_m = 1$, то выражения (1.17), (1.18) определяют световой поток F в световых ваттах.

Однако обычно световой поток выражают в люменах (лм).

Один люмен равен световому потоку, излучаемому точечным источником света силой в 1 канделу (кд) внутри телесного угла в 1 ср.

Экспериментально установлено, что $1 \text{ лм} = 1/683 \text{ Вт}$, т. е., для определения светового потока в люменах, необходимо принять $K_m = 683 \text{ лм/Вт}$.

Сила света I_α представляет пространственную (угловую) плотность светового потока и используется для характеристики светораспределения в различных направлениях:

$$I_\alpha = dF / d\omega. \quad (1.19)$$

За единицу силы света принята кандела (кд). Кандела является основной световой единицей и равна силе света, испускаемого в перпендикулярном направлении с поверхности полного излучателя площадью $1/(6 \cdot 10^5) \text{ м}^2$ при температуре затвердевания платины ($T = 2042 \text{ К}$).

Светимость M определяет поверхностную плотность светового потока и используется для оценки источников света, имеющих протяженные размеры:

$$M = dF / dS_{\text{и}}. \quad (1.20)$$

Единицей светимости является 1 люмен с 1 м^2 (лм/м²).

Освещенность E представляет собой величину, характеризующую поверхностную плотность падающего на некоторую плоскость светового потока:

$$E = dF / dS_o. \quad (1.21)$$

Освещенность используется для оценки условий освещения. Единицей освещенности является люкс (лк), представляющий собой освещенность поверхности площадью 1 м^2 , на которую падает равномерно распределенный световой поток в 1 лм.

Яркость L характеризует собой величину светового потока, излучаемого с единицы видимой поверхности в данном направлении. Яркость численно равна отношению силы света к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную заданному направлению (рис. 1.6):

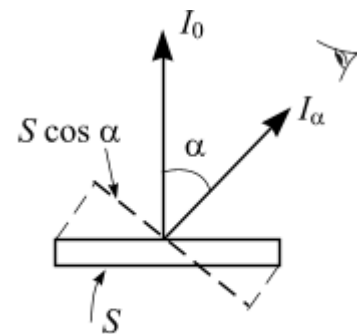


Рис. 1.6. К определению яркости

$$L_\alpha = dF / (dS \cos \alpha d\omega) = dI_\alpha / dS \cos \alpha. \quad (1.22)$$

Единицей яркости является 1 кд на 1 м^2 (кд/м²).

Основные светотехнические величины сведены в таблицу.

Энергетические величины			Фотометрические величины		
Наименование	Определяющее уравнение	Единица измерения	Наименование	Определяющее уравнение	Единица измерения
Поток излучения	$F_e = W/t$	Вт	Световой поток	F	Лм
Сила излучения	$I_{e\alpha} = dF_e/d\omega$	Вт/ср	Сила света	$I_\alpha = dF/d\omega$	Кд
Энергетическая светимость	$M_e = dF_e/dS_{\text{и}}$	Вт/м ²	Светимость	$M = dF/dS_{\text{и}}$	Лм/м ²
Энергетическая освещенность	$E_e = dF_e/dS_o$	Вт/м ²	Освещенность	$E = dF/dS_o$	Лк
Энергетическая яркость	$L_{e\alpha} = dI_{e\alpha}/dS \cos \alpha$	Вт/(ср·м ²)	Яркость	$L_\alpha = dI_\alpha/dS \cos \alpha$	Кд/м ²

1.3. Светотехнические характеристики тел и сред

Световой поток, поступающий в глаза человека при непосредственном наблюдении, на поверхность фоточувствительного преобразователя при ТВ съемке и т.п., обычно образован лучами, пришедшими от первичных источников света (естественных или искусственных) сложным

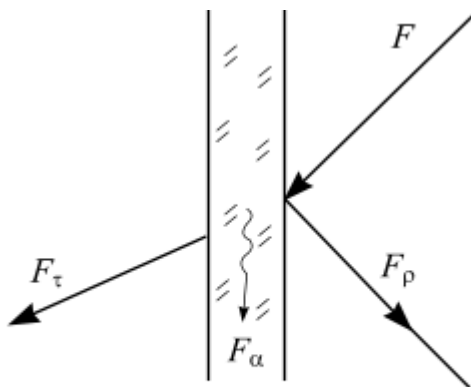


Рис. 1.7. Распределение светового потока при взаимодействии с телом

путем в результате многократных преломлений и отражений различными телами и средами. Величина и спектральный состав этого светового потока непосредственно зависят от светотехнических свойств тел, т. е. от свойств, определяющих характер их взаимодействия со светом.

Световой поток F , падающий на некоторое тело (рис. 1.7), в общем случае делится на три части: отраженную F_ρ , пропущенную F_τ и поглощенную F_α .

$$F = F_\rho + F_\tau + F_\alpha. \quad (1.23)$$

Удельные веса этих потоков определяются соответственно интегральными коэффициентами:

- отражения $\rho = F_\rho/F$;
- пропускания $\tau = F_\tau/F$;
- поглощения $\alpha = F_\alpha/F$.

Очевидно, что

$$\rho + \tau + \alpha = 1. \quad (1.24)$$

Соотношение между коэффициентами зависит от типа материала, состояния поверхности, его толщины. В большинстве случаев преобладает один из коэффициентов. Коэффициенты отражения, пропускания и поглощения зависят от длины волны падающего излучения. Зависимости $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ от длины волны излучения называются спектральными характеристиками отражения, пропускания и поглощения. Значения спектральных коэффициентов для однородных излучений определяются уравнениями

$$\rho(\lambda) = F_\rho(\lambda)/F(\lambda); \quad \tau(\lambda) = F_\tau(\lambda)/F(\lambda); \quad \alpha(\lambda) = F_\alpha(\lambda)/F(\lambda). \quad (1.25)$$

Если коэффициенты $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$ в пределах видимой части спектра резко изменяются, то такие отражение, пропускание и поглощение являются избирательными. Все цветные объекты имеют избирательный характер преобразования падающего на них светового потока. Спектральные характеристики серых объектов в пределах видимой части спектра практически равномерны.

Если падающий на тело световой поток имеет сложный спектральный состав, то интегральные коэффициенты отражения, пропускания и поглощения определяются соответственно формулами:

$$\rho = \frac{\int_0^\infty p(\lambda)\rho(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty p(\lambda)d\lambda}; \quad \tau = \frac{\int_0^\infty p(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty p(\lambda)d\lambda}; \quad \alpha = \frac{\int_0^\infty p(\lambda)\alpha(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty p(\lambda)d\lambda}, \quad (1.26)$$

где $p(\lambda)$ – спектральная плотность светового потока.

Коэффициенты отражения и пропускания, определяя соотношение световых потоков, не характеризуют их распределение в пространстве. Распределение отраженного и прошедшего световых потоков в пространстве может резко различаться в зависимости от свойств поверхности тела и внутренней его структуры [1].

Различают направленное, рассеянное (диффузное) и направленно-рассеянное отражение (пропускание). На рис. 1.8 приведены диаграммы сил света для различных видов отражения и пропускания.

Направленное (зеркальное) отражение (рис. 1.8,а) свойственно полированным поверхностям. Направление отраженного света определяется законом отражения (разд. 2).

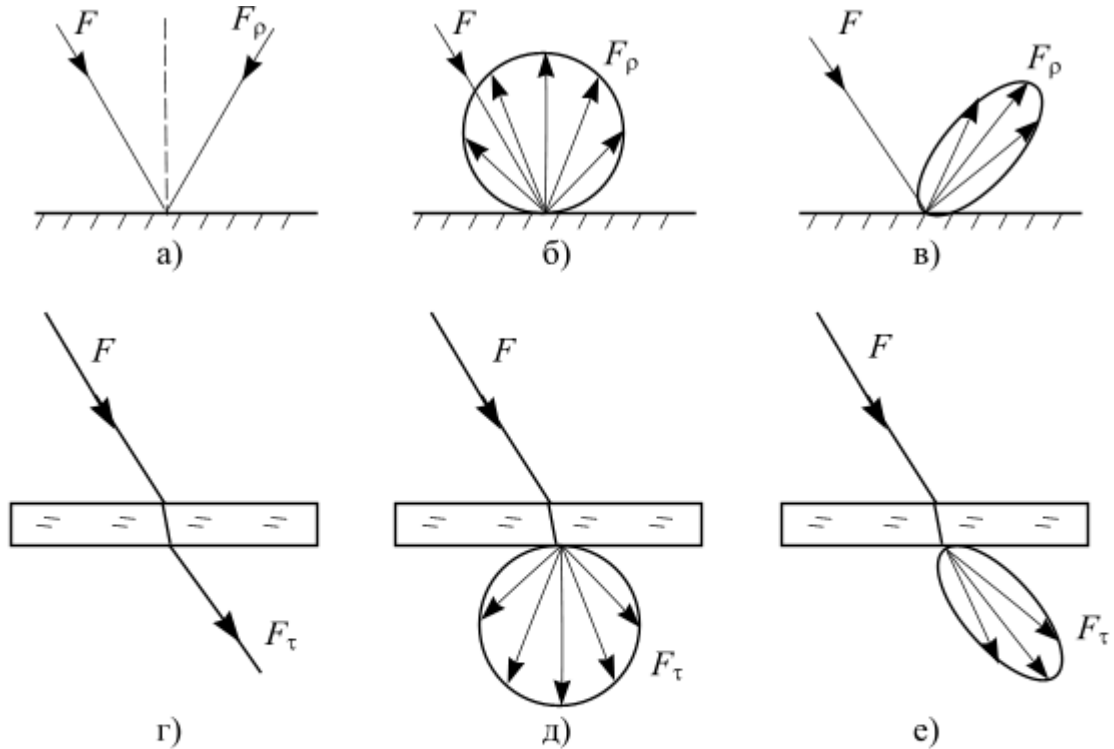


Рис. 1.8. Диаграммы сил света при различных видах отражения и пропускания:
 отражение: а) направленное; б) рассеянное (диффузное);
 в) направленно-рассеянное;
 пропускание: г) направленное; д) рассеянное (диффузное);
 е) направленно-рассеянное

Направленным пропусканием (рис. 1.8,г) обладают однородные слабо поглощающие материалы с полированными плоскостями. Направление распространения света определяется законом преломления.

Рассеянное (диффузное) отражение (рис. 1.8,б) или пропускание (рис. 1.8,д) возникает в тех случаях, когда поверхность тела имеет шероховатости или его среда содержит непрозрачные включения, соизмеримые с длиной волны падающего света. При диффузном отражении (или пропускании) световой поток распространяется по всем направлениям пространства независимо от направления падающего света. Диаграмма сил света для плоской поверхности описывается косинусной зависимостью: $I_\alpha = I_0 \cos \alpha$. К диффузно отражающим поверхностям отно-

сятся меловая бумага, белое полотно, поверхности, покрытые окисью бария. Диффузно пропускающими телами являются молочное и опаловое стекло. Следует отметить, что большинство объектов окружающего мира создает отражение, близкое к диффузному. Для характеристики отражающих свойств таких объектов пользуются коэффициентом диффузного отражения, или альбедо, $\rho_d = F_d / F$, где F_d – диффузно отражаемая часть потока.

При направленно-рассеянном отражении (рис. 1.8,в) или пропускании (рис. 1.8,е) основная часть отраженного или пропущенного потока распространяется в пределах ограниченного телесного угла. Яркость поверхности в большинстве случаев максимальна в направлении зеркального отражения или направленного пропускания и заметно падает по мере отклонения от этих направлений. Направленно-рассеянным отражением обладают матированные поверхности металлов или поверхности, покрытые металлическим порошком. Материалы с направленно-рассеянным пропусканием – матовое стекло, желатин, бумаги и ткани, пропитанные специальными составами.

Для оценки направленных свойств отражающих и пропускающих тел используется коэффициент яркости r , представляющий собой отношение яркости L тела в заданном направлении к яркости L_d идеальной диффузно рассеивающей поверхности (с $\rho = 1$ или $\tau = 1$):

$$r = L / L_d. \quad (1.27)$$

Для направленно-рассеивающих поверхностей в направлениях максимума отражения (пропускания) значения коэффициента яркости могут быть существенно больше единицы. Для диффузно рассеивающих поверхностей $r = \rho$. Если поверхность имеет освещенность E , то ее светимость M и яркость L определяются формулами

$$M = \rho E \quad (\text{или } M = \tau E) \quad \text{и} \quad L = rE / \pi, \quad (1.28)$$

где $r = \rho$ при диффузном отражении и $r = \tau$ при диффузном пропускании.

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

2.1 Основные законы геометрической оптики

Все многообразие явлений, связанных с распространением света в различных средах, достаточно полно описывается законами волновой оптики. Однако при конструировании оптических приборов и практическом их использовании многие задачи могут быть решены более просто с помощью представлений геометрической оптики, которая является частным случаем волновой, но имеет значительно более простой математический аппарат.

Геометрическая оптика рассматривает излучение как совокупность световых лучей. Под световым лучом подразумевается геометрическая линия, определяющая направление распространения света и не имеющая размеров в поперечном сечении.

В геометрической оптике используются также такие понятия, как светящаяся точка и световой пучок. Светящаяся точка – это геометрическая точка пересечения двух лучей. Световой пучок – это совокупность световых лучей.

Световой пучок, состоящий из лучей, проходящих через одну точку или исходящих из одной точки, называется гомоцентрическим. Сходящиеся гомоцентрические пучки образуют светящуюся точку. С другой стороны, каждая светящаяся точка является источником расходящихся световых лучей. Бесконечно удаленная светящаяся точка является источником параллельного светового пучка.

Основу геометрической оптики составляют законы, полученные опытным путем. Их можно сформулировать следующим образом:

1. Луч света в однородной среде является прямолинейным (закон прямолинейного распространения света).

2. Световые лучи, пересекаясь, не влияют друг на друга (закон независимости распространения световых лучей).

3. При отражении лучей от зеркальной поверхности угол падения равен углу отражения, а падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности в точке падения (рис. 2.1,а):

$$\alpha = -\alpha'. \quad (2.1)$$

Знак минус показывает, что углы α и α' отсчитываются в разные стороны от нормали к поверхности.

4. При переходе луча из одной оптической среды в другую луч света преломляется. Падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с нормалью к поверхности в точке падения. Ход лучей определяется законом синусов: если угол падения луча при переходе из одной

среды в другую равен α , а преломления – равен α' (рис. 2.1,б), то произведения синусов этих углов на показатели преломления соответствующих сред (n или n') равны между собой.

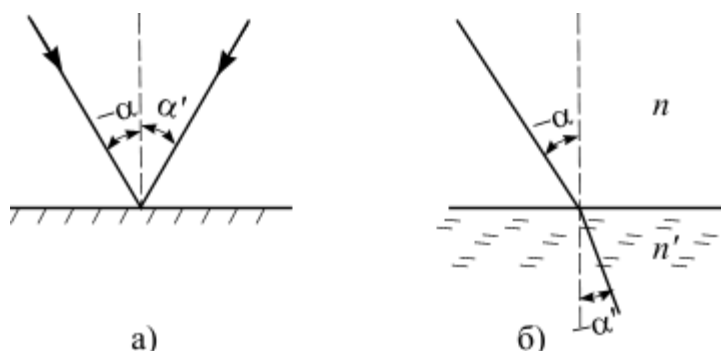


Рис. 2.1. Ход лучей:
а) при направленном (зеркальном) отражении;
б) при преломлении

$$n \sin \alpha = n' \sin \alpha'. \quad (2.2)$$

Для всех задач геометрической оптики, связанных с построением изображения, справедлив принцип взаимности. Он заключается в том, что при преломлении (отражении) на границе двух сред изменение направления лучей на обратное не изменяет взаимного расположения лучей. Это означает, что если поменять объект и изображение объекта местами, то ход лучей в оптической системе останется неизменным.

2.2. Оптические системы: основные определения и понятия

Оптической системой (ОС) называется совокупность преломляющих и отражающих поверхностей, способная создавать оптическое изображение [2].

Практически ОС состоит из ряда простейших элементов (линз, призм, зеркал и т. д.), разделенных воздушными промежутками.

Отражающие и преломляющие поверхности ОС обычно являются поверхностями вращения, в большинстве случаев – сферическими. Поверхности обычно расположены в пространстве так, что центры их кривизны находятся на одной прямой линии – оптической оси ОС. Такие ОС называются центрированными.

При известных параметрах ОС на основе законов геометрической оптики можно построить изображение, получаемое с помощью этой системы, однако, прежде всего необходимо учесть принятые в оптике правила графических построений.

При графических построениях условились размещать объект – слева, а изображение – справа от ОС. Соответственно этому область пространства, находящаяся слева от ОС, называется пространством объек-

тов (предметов), а область, находящаяся справа от ОС, – пространством изображений.

Для отсчета различных отрезков и углов в оптике приняты соответствующие правила знаков. Они исходят из принятого за положительное направление света слева направо.

Сформулировать эти правила можно следующим образом:

- все отрезки и расстояния, откладываемые вправо от опорной точки, линии или поверхности, считаются положительными, а откладываемые влево, – отрицательными. Для радиусов кривизны опорной является определяемая ими сферическая поверхность;

- толщины оптических элементов и расстояния между ними считаются положительными при прямом ходе и отрицательными – при обратном ходе световых лучей;

- все отрезки и расстояния, отсчитываемые вверх от оптической оси, считаются положительными, отсчитываемые вниз, – отрицательными;

- углы, отсчитываемые поворотом от опорной линии (оптической оси, нормали) по часовой стрелке, считаются положительными, поворотом против часовой стрелки – отрицательными;

- показатели преломления сред считаются положительными при прямом ходе лучей и отрицательными – при обратном.

Пусть имеется некоторая центрированная оптическая система, перед которой помещен объект. Из каждой точки объекта исходит гомоцентрический пучок лучей. Если преломленный или отраженный ОС пучок также сходится в одну точку (т. е. сохранится гомоцентричность пучка), то каждая точка объекта дает одну точку изображения. Эти точки называются сопряженными. Изображения всех точек объекта составят изображение объекта в целом. Такие изображения называются точечными или стигматическими.

Условие сохранения гомоцентричности пучков является необходимым условием получения неискаженного изображения. Решение многих практических задач прикладной оптики удастся упростить, если рассматривать идеальную ОС, в которой выполняется это условие, а также ряд других.

Идеальной называется такая ОС, которая любую точку пространства предметов изображает стигматически, т. е. не нарушает гомоцентричности прошедших через нее сколь угодно широких пучков в пределах неограниченно большой области предметов.

В идеальной ОС:

- каждой точке в пространстве предметов соответствует одна (сопряженная) точка в пространстве изображений;

- каждой прямой линии в пространстве предметов соответствует одна (сопряженная) прямая линия в пространстве изображений;
- если какая-либо точка в пространстве предметов лежит на некоторой прямой, то сопряженная с ней точка в пространстве изображений лежит на прямой, сопряженной с первой;
- всякой плоскости в пространстве предметов соответствует только одна сопряженная плоскость в пространстве изображений.

В дальнейшем будем рассматривать ОС и их элементы, предполагая, что эти условия выполняются, т. е. система является идеальной. При этом, однако, необходимо учесть, что полученные результаты в большинстве своем будут справедливы только для параксиальной (приосевой) области, т. е. для лучей, проходящих в непосредственной близости от оптической оси, под малыми углами к ней.

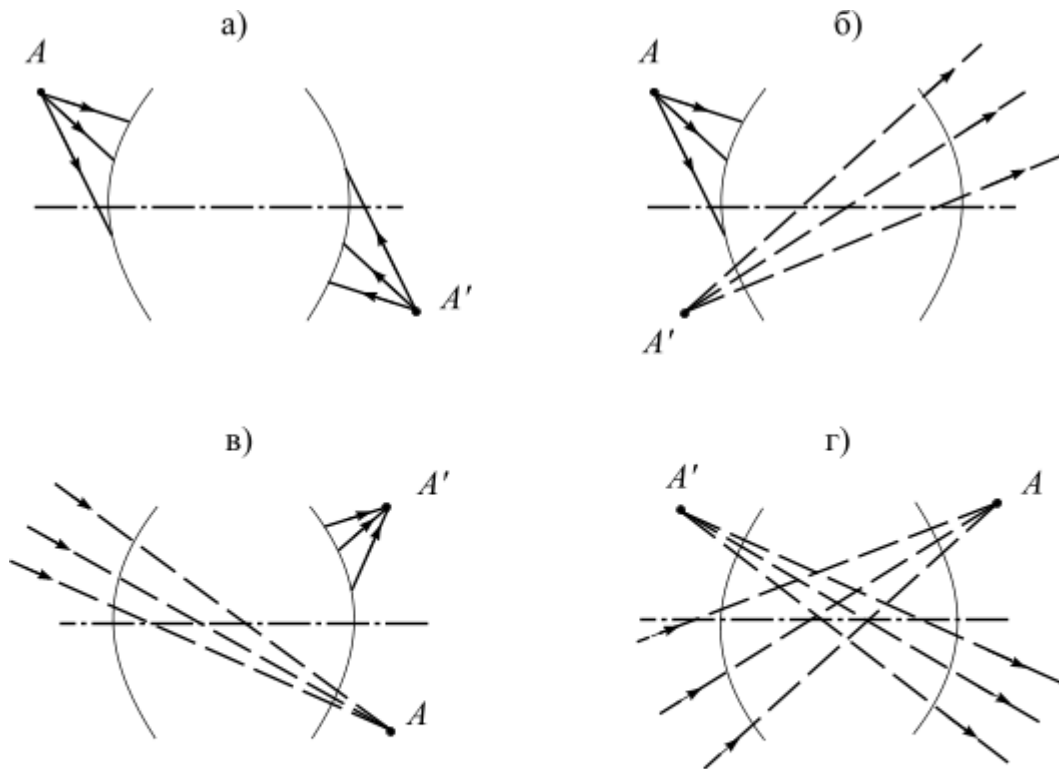


Рис. 2.2. Характеристики объектов и изображений:
 а) действительный объект – действительное изображение;
 б) действительный объект – мнимое изображение;
 в) мнимый объект – действительное изображение;
 г) действительный объект – мнимое изображение

В зависимости от параметров ОС и характера входящих в нее световых пучков объекты (A) и их изображения (A') могут быть действительными или мнимыми (рис. 2.2). Действительный объект – это точка,

являющаяся источником расходящихся лучей, действительное изображение – точка схождения вышедших из ОС лучей. Мнимый объект – точка, образованная путем продолжения сходящихся на входе ОС лучей, мнимое изображение – точка, образованная путем продолжения (в обратном направлении) расходящегося на выходе ОС пучка лучей.

2.3. Оптические элементы

Плоские зеркала. Плоское зеркало представляет собой хорошо отполированную плоскую пластинку, на поверхность которой нанесен отражающий слой. В ОС плоские зеркала обычно выполняют вспомогательные функции: изменение направления распространения лучей, расщепление световых лучей, обращение, вращение изображений и т. п.

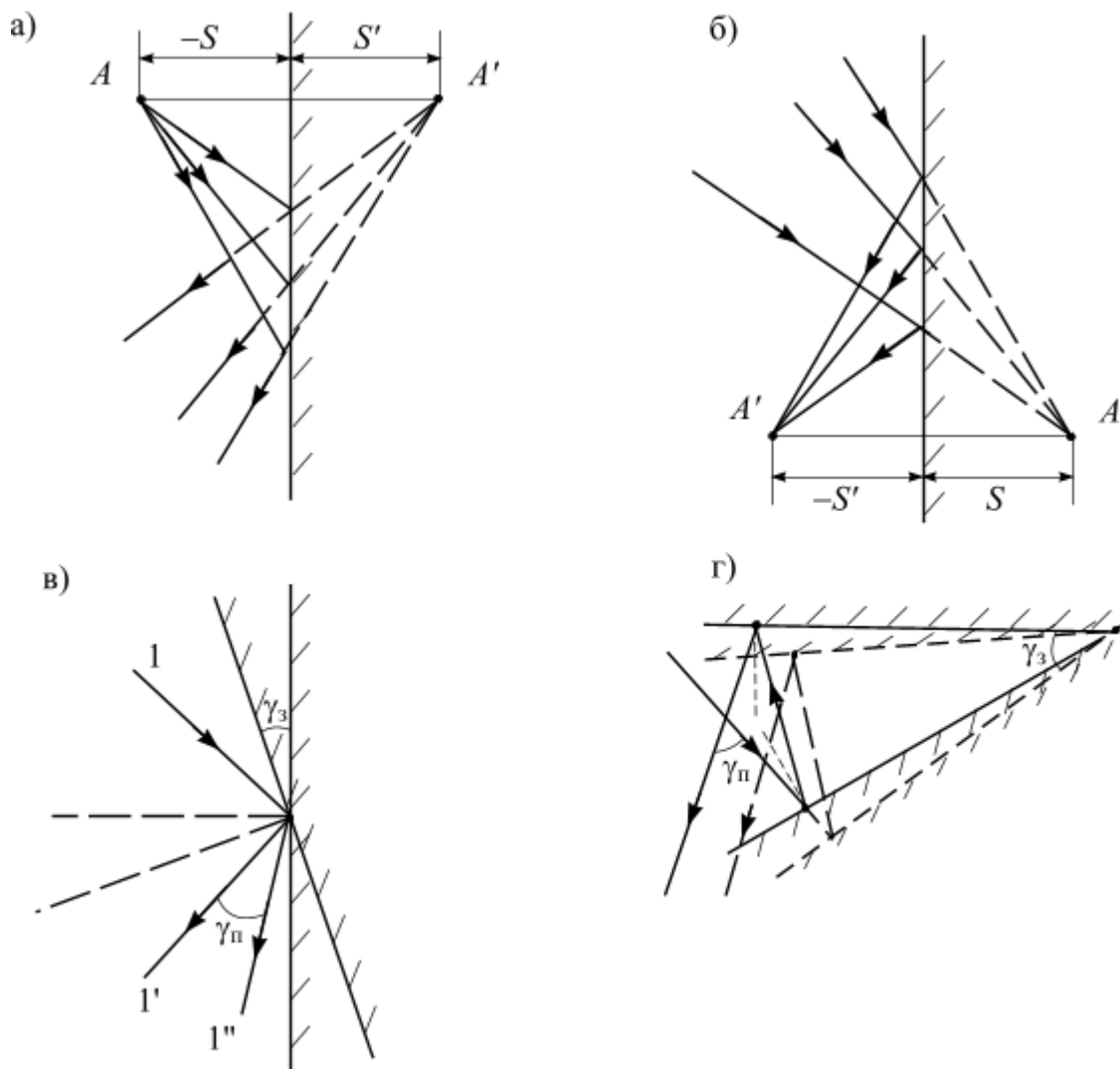


Рис. 2.3. Основные свойства плоских зеркал

Если на плоское зеркало (рис. 2.3,а) из светящейся точки A падает расходящийся гомоцентрический пучок лучей, то после отражения лучи

будут распространяться так, как если бы они исходили из точки A' , являющейся мнимым изображением действительной точки A .

Если на плоское зеркало (рис. 2.3,б) падает сходящийся гомоцентрический пучок лучей, то после отражения лучи соберутся в точке A' , являющейся действительным изображением мнимой светящейся точки A . Изображения, даваемые зеркалом, являются частично обращенными.

При повороте плоского зеркала происходит поворот изображения (рис. 2.3,в). Угол поворота изображения $\gamma_{\text{п}}$ равен удвоенному повороту зеркала γ_3 :

$$\gamma_{\text{п}} = 2\gamma_3. \quad (2.3)$$

Система из двух зеркал с углом γ_3 между ними (рис.2.3,г) изменяет направление распространения лучей на угол $\gamma_{\text{п}} = 2\gamma_3$. Поворот системы двух зеркал вокруг линии пересечения их плоскостей не изменяет угол поворота.

Плоскопараллельные пластинки. Плоскопараллельная пластинка представляет собой оптический элемент, состоящий из прозрачного материала (например, стекла), ограниченного параллельными плоскостями. Плоскопараллельные пластинки применяются в качестве подложки для различного рода тонких слоев (светоделительных покрытий, фотокатодов и т.п.), защитных стекол, фильтров и устройств смещения изображений.

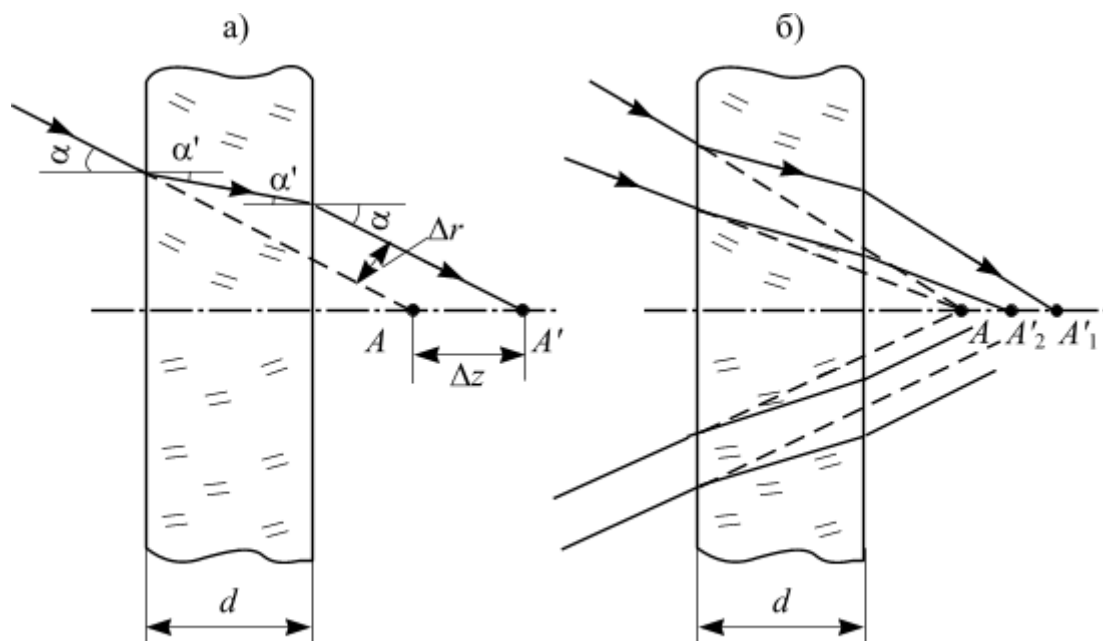


Рис.2.4. Основные свойства плоскопараллельной пластинки

Прохождение наклонного светового луча через плоскопараллельную пластинку сопровождается двумя последовательными преломлени-

ями (рис. 2.4,а) на каждой из границ раздела «воздух – стекло». Прошедший луч идет параллельно падающему, но со смещением в сторону. Значения поперечного Δr и осевого Δz смещений определяются по формулам [2]:

$$\Delta r = d \sin \varepsilon (1 - \operatorname{tg} \varepsilon' / \operatorname{tg} \varepsilon); \quad \Delta z = d(1 - \operatorname{tg} \varepsilon' / \operatorname{tg} \varepsilon), \quad (2.4)$$

где d – толщина пластинки; ε и ε' – углы падения луча на первую и вторую границы раздела «воздух – стекло».

При малых ε для плоскопараллельной пластины в воздухе $\operatorname{tg} \varepsilon' / \operatorname{tg} \varepsilon \approx 1/n$, и выражения (2.4) принимают более простой вид

$$\Delta r = d \sin \varepsilon (1 - 1/n); \quad \Delta z = d(1 - 1/n), \quad (2.4a)$$

где n – показатель преломления стекла пластинки.

Сходящиеся или расходящиеся гомоцентрические пучки, после прохождения плоскопараллельной пластинки, теряют свою гомоцентричность, параллельный пучок лучей после прохождения через плоскопараллельную пластинку сохраняет свою параллельность (рис. 2.4,б).

Тонкие линзы. Оптические системы, содержащие только преломляющие поверхности, составляют наиболее обширный класс. Простейшей ОС такого типа является тонкая линза, представляющая собой деталь из прозрачного материала (обычно стекла), ограниченную двумя сферическими поверхностями с радиусами r и r' . Линзы подразделяются на собирающие или положительные и рассеивающие или отрицательные. Если толщина линзы мала по сравнению с расстояниями от нее до объекта (s) и до изображения (s'), то такая линза называется тонкой (рис. 2.5,а).

Уравнение тонкой линзы имеет вид [2]

$$1/s' - 1/s = (n - 1)(1/r - 1/r') \quad (2.5)$$

и устанавливает связь между расстояниями от линзы до объекта s и до изображения s' и параметрами линзы. Если объект поместить в бесконечность ($s = -\infty$), то лучи сойдутся в точке F' . Если же объект поместить справа в бесконечность ($s' = +\infty$), то его изображение получится в точке F . Точки F и F' называются соответственно передним и задним фокусами, а расстояния f и f' между фокусами и центром линзы – фокусными расстояниями. Эти расстояния для линзы в воздухе составляют

$$f' = -f = rr' / (n - 1)(r' - r). \quad (2.6)$$

Фокусные расстояния определяются только параметрами линзы и сами могут рассматриваться как ее параметры. Если в (2.5) ввести фокусное расстояние f' , то получим основное уравнение линзы

$$1/s' - 1/s = 1/f'. \quad (2.7)$$

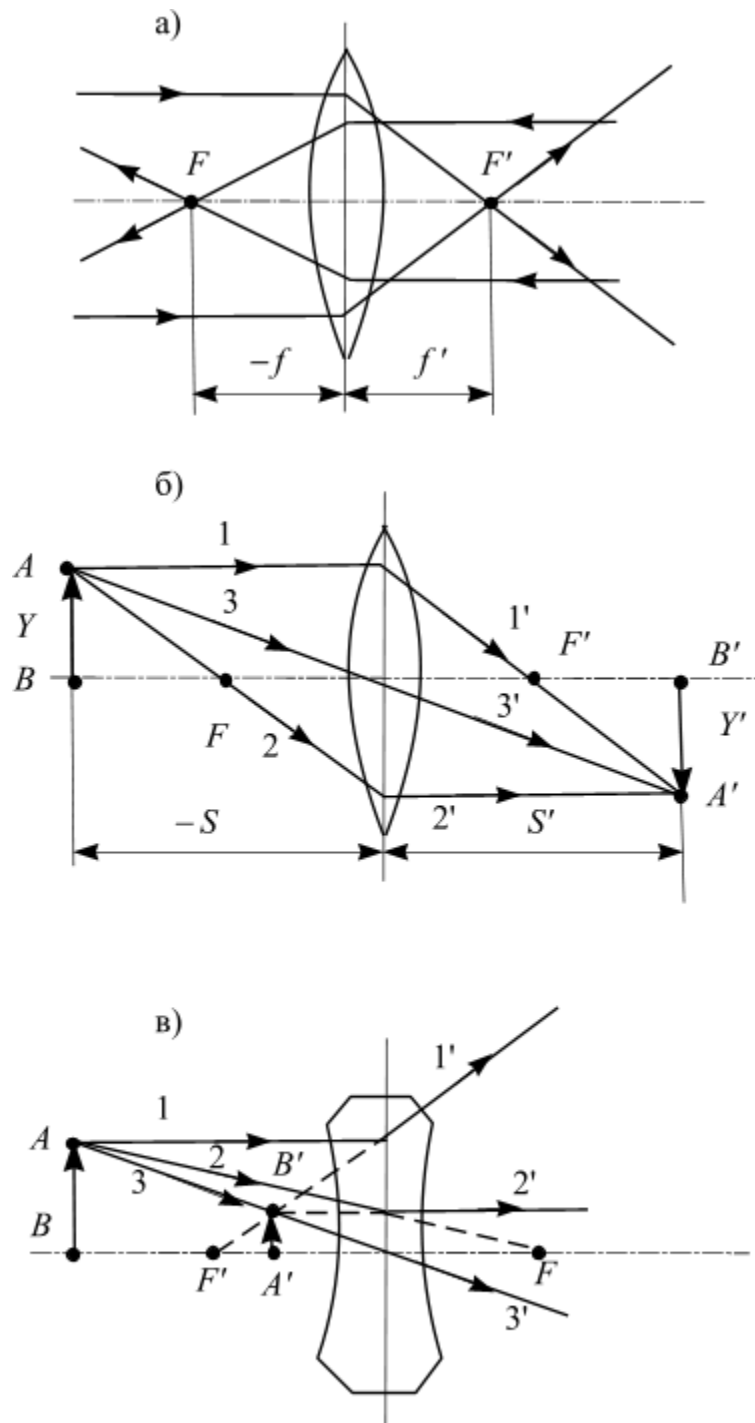


Рис. 2.5. Тонкая линза: а) общая схема;
 б) построение изображения в собирающей линзе;
 в) построение изображения в рассеивающей линзе

Линейное увеличение линзы (соотношение между размерами изображения и объекта, расположенных поперек оптической оси) можно определить из соотношения [2]

$$V = Y'/Y = s'/s = -f/(s - f) = 1 - s'/f'. \quad (2.8)$$

Характер, положение и увеличение изображения зависят от расположения объекта относительно линзы. Положение и размеры идеального изображения можно найти графически, путем построения хода каких-либо двух лучей. Подобное построение выполнено для собирающей линзы на рис. 2.5,б, а для рассеивающей линзы – на рис. 2.5,в. Практически удобно воспользоваться двумя из следующих лучей:

- лучом 1–1', идущим параллельно оси линзы и проходящим через точку F' после нее;
- лучом 2–2', проходящим через точку F до линзы и идущим параллельно оси после линзы;
- лучом 3–3', проходящим через центр линзы без изменения направления.

Линзы конечной толщины. Если линза не может считаться тонкой, то при расчетах должна быть учтена ее толщина. При этом удобно пользоваться так называемыми главными плоскостями H и H' (рис. 2.6).

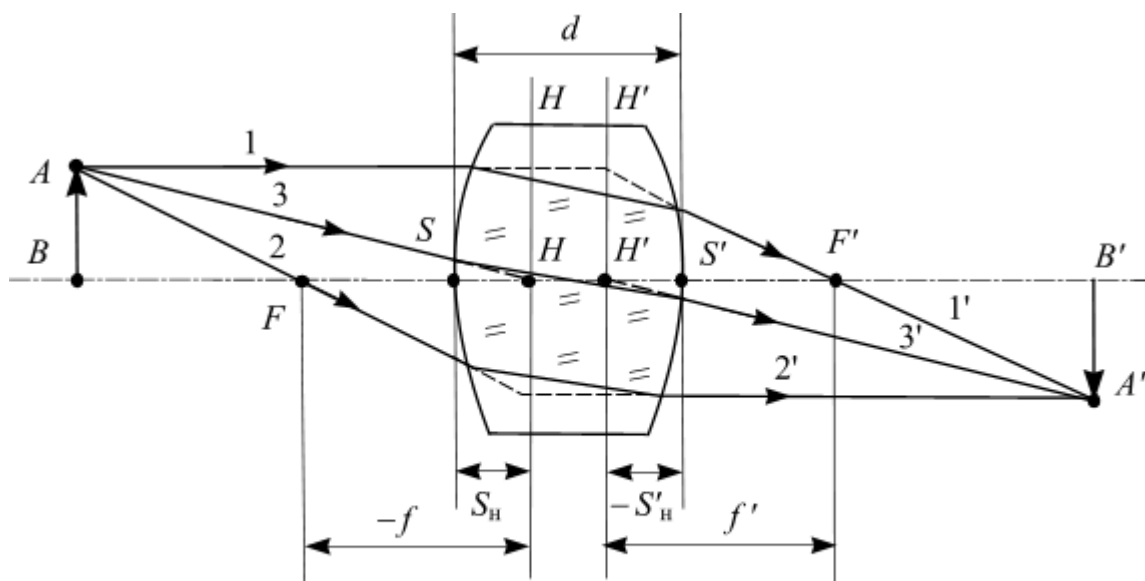


Рис. 2.6. Линза конечной толщины

При геометрических построениях считается, что преломление лучей происходит на главных плоскостях линзы. Задняя главная плоскость H' определяется множеством точек пересечения продолжений лучей 1, идущих в пространстве предметов параллельно оптической оси, и сопряженных с ними лучей 1', проходящих в пространстве изображений через задний фокус F' . Передняя главная плоскость H определяется множеством точек пересечения продолжений лучей 2, проходящих в пространстве предметов через передний фокус F , и сопряженных с ними

лучей $2'$, идущих в пространстве изображений параллельно оптической оси. Точки пересечения главных плоскостей с оптической осью называются главными точками. Для линзы в воздухе луч 3, проходящий через переднюю главную точку, выйдет из задней главной точки под тем же углом. Таким образом, зная положение главных плоскостей и фокусов, можно построить изображение (в парапаксиальном приближении), не прибегая к построению реального хода лучей в линзе.

Основное уравнение линзы (2.7) и формула увеличения (2.8) справедливы и для линз конечной толщины, но фокусные расстояния в этом случае вычисляются по формуле [2]

$$f' = -f = rr' / (n - 1) [r' - r + d(n - 1) / n]. \quad (2.9)$$

Фокусные расстояния откладываются от соответствующих главных плоскостей. Положение главных плоскостей определяется относительно соответствующих вершин сферических поверхностей линзы (точек S и S'):

$$\begin{aligned} s_H &= rd / [n(r' - r) + (n - 1)d], \\ s'_H &= -r'd / [n(r' - r) + (n - 1)d]. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Система линз. Реальные ОС обычно состоят из нескольких линз, разделенных воздушными промежутками. С оптической точки зрения такая система действует как единое целое. Ее оптические свойства (в парапаксиальной области) полностью определяются положением двух главных плоскостей и двух фокусов. Положение главных и фокальных плоскостей ОС может быть рассчитано, если известны расстояния между линзами, толщины линз и фокусное расстояние каждой линзы.

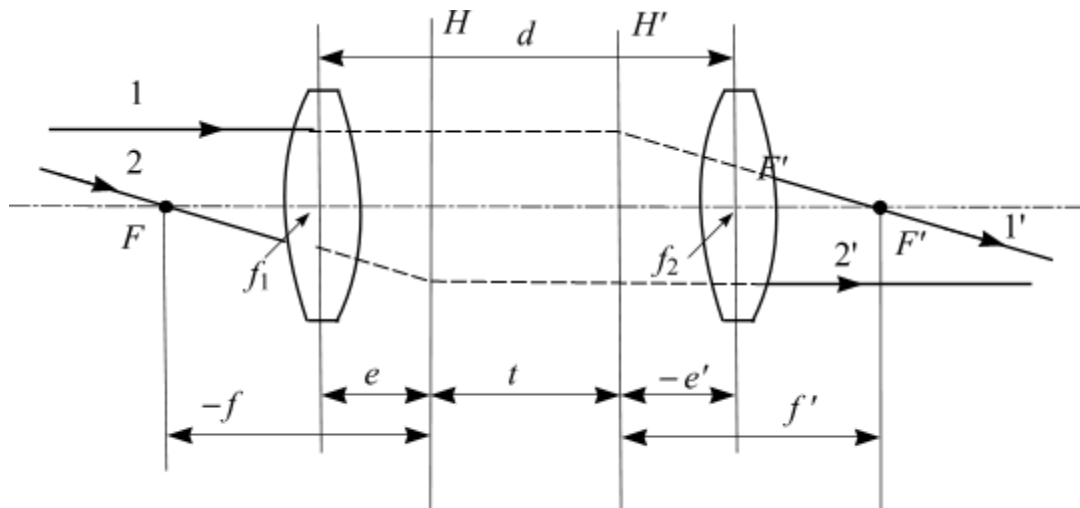


Рис. 2.7. Система двух линз

Рассмотрим двухлинзовую систему, состоящую из двух тонких линз, находящихся друг от друга на расстоянии d и имеющих фокусные расстояния f_1 и f_2 соответственно (рис. 2.7).

Положение главных плоскостей относительно центров линз определяется по формулам

$$e = \frac{f_1 d}{f_1 + f_2 - d}; \quad e' = \frac{f_2 d}{f_1 + f_2 - d} \quad (2.11)$$

При положительных значениях e и e' расстояние e отсчитывается вправо от центра первой линзы, а e' – влево от центра второй. При отрицательных значениях эти расстояния отсчитываются в противоположных направлениях.

Фокусные расстояния системы определяются по формуле

$$f' = -f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d} \quad (2.12)$$

и отсчитываются относительно соответствующих главных плоскостей.

Расстояние между главными плоскостями t , носящее название эквивалентной толщины (оптического интервала) системы, определяется как

$$t = d - (e + e') = -\frac{d^2}{f_1 + f_2 - d} \quad (2.13)$$

Данные соотношения справедливы и для линз конечной толщины, при этом положение главных плоскостей системы определяется относительно главных плоскостей линз, ее составляющих.

Последовательно применяя формулы (2.11) и (2.12), можно рассчитать эквивалентные параметры ОС, содержащей три линзы и более.

2.4. Аберрации оптической системы

Изложенные ранее основы построения изображения в центрированной оптической системе справедливы для идеальных оптических систем. Следовательно, должны выполняться следующие условия:

- свет поступает в систему в виде параксиальных пучков;
- показатель преломления постоянен для всех лучей, или световой поток, входящий в систему, является монохроматическим.

В реальных оптических системах эти условия не соблюдаются. Несоблюдение этих условий приводит к тому, что появляются искажения изображения (абберации) [2]:

- сферическая аберрация;
- кома;
- астигматизм;
- кривизна поля изображения;

- дисторсия;
- хроматическая aberrация.

Первые пять aberrаций объединяются под общим названием геометрических aberrаций, так как они могут быть объяснены с помощью чисто геометрических соображений. Пользуясь другой классификацией, их можно назвать монохроматическими aberrациями, так как они возникают даже при монохроматическом световом потоке. Последняя, хроматическая aberrация является следствием сложного спектрального состава светового потока и дисперсии света в преломляющих средах.

Сферическая aberrация. Сферическая aberrация заключается в том, что лучи, исходящие из одной точки, расположенной на оптической оси в пространстве предметов, собираются не в одной точке, а на отрезке оси (рис. 2.8). Это явление объясняется тем, что наиболее удаленные от оптической оси лучи, падающие на поверхность линзы под значительными углами, преломляются сильнее параксиальных и образуют точку схода, удаленную от фокальной плоскости.

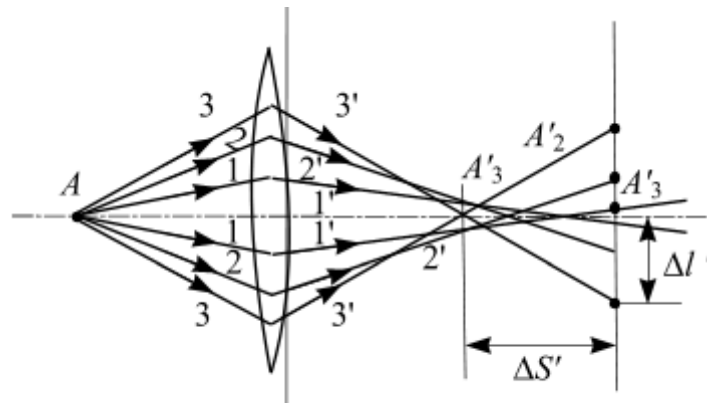


Рис. 2.8. Ход лучей при сферической aberrации

Расстояние между точками схождения параксиальных и краевых лучей $\Delta S'$ определяет продольную aberrацию. Поперечная сферическая aberrация оценивается радиусом кружка нерезкости $\Delta l'$. Если точка пересечения параксиальных лучей с осью располагается дальше от линзы по ее оси, чем точка пересечения краевых лучей, то aberrация считается отрицательной. Если точка пересечения параксиальных лучей с осью располагается ближе к линзе, чем точка пересечения краевых лучей, то aberrация считается положительной. В результате сферической aberrации изображение точечного объекта, расположенного на оси, получается в виде кружка с нерезкой границей (кружка рассеяния), диаметр которого тем больше, чем больше диаметр линзы. Собирающие линзы имеют отрицательную сферическую aberrацию, рассеивающие – положительную. Комбинируя собирающие и рассеивающие линзы, можно значительно уменьшить сферическую aberrацию.

Кома. Кома представляет собой подобие внеосевой сферической aberrации. Она возникает при падении на линзу широкого пучка косых лучей (рис. 2.9). Лучи, проходящие через центральную зону, образуют изображение в точке $0'$; лучи, проходящие через крайнюю зону, образуют изображение дальше от оси с центром в точке $2'$. Увеличение V для крайних зон оказывается большим, чем для осевой зоны.

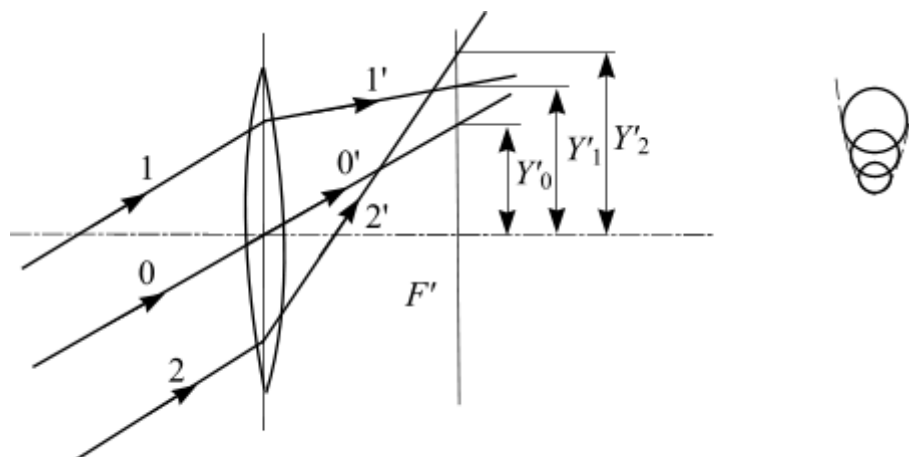


Рис. 2.9. Кома

Изображение точки, формируемой каждой зоной линзы, будет иметь вид кружков, причем с возрастанием диаметра зоны их диаметр возрастает, а центры располагаются дальше от оптической оси. Сходство получающегося изображения точки с кометой явилось причиной выбора названия этой aberrации.

Мерой комы является величина

$$k = (Y'_1 + Y'_2) / 2 - Y'_0, \quad (2.14)$$

где Y'_1, Y'_2, Y'_0 – отрезки от оси до точек пересечения крайних и центрального лучей с плоскостью изображения.

Устранение комы производится одновременно с коррекцией сферической aberrации. Оптические системы, у которых значительно уменьшены сферическая aberrация и кома, называются апланатами.

Астигматизм. Явление астигматизма наблюдается для лучей (даже в узких пучках), падающих на линзу под большими углами к оптической оси. Причина астигматизма – различие в условиях преломления лучей, проходящих в различных плоскостях. На рис. 2.10 показан ход лучей, исходящих из точки A , в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: меридиональной, проходящей через ось пучка AO и оптическую ось, и сагиттальной, проходящей через ось пучка перпендикулярно меридиональной. В меридиональной плоскости лучи сходятся в точке A'_m , в сагиттальной плоскости – в точке A'_s . При перемещении плоскости изоб-

ражения, перпендикулярной оптической оси, вдоль этой оси изображение точки A будет изменяться от горизонтально расположенной в A'_m до вертикально расположенной в A'_s линии, принимая в промежуточных положениях форму эллипсов. Примерно посередине между точками A'_m и A'_s изображение будет иметь форму кружка, называемого кружком наименьшего рассеяния.

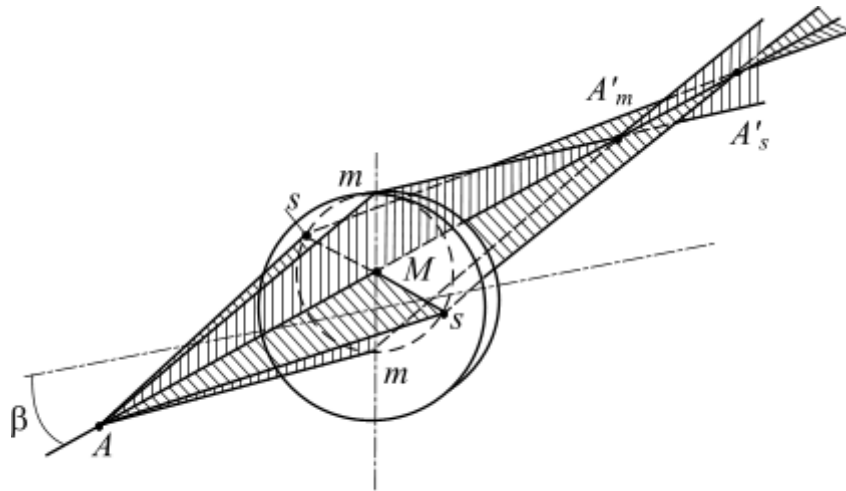


Рис. 2.10. Ход лучей при астигматизме

Величина астигматизма в значительной мере зависит от удаления точки от оси и в меньшей степени от ширины пучка. Для характеристики астигматизма используются кривые зависимости положения меридионального A'_m и сагиттального A'_s фокусов от угла наклона пучков. На оптической оси меридиональные и сагиттальные изображения соприкасаются. При увеличении угла, под которым пучок падает на поверхность, меридиональные и сагиттальные изображения расходятся, перемещаясь по криволинейным поверхностям. Расположение меридиональных и сагиттальных фокусов у собирающих и рассеивающих линз неодинаково. Комбинируя собирающие и рассеивающие линзы, можно значительно уменьшить aberrацию астигматизма.

Кривизна поля изображения. Кривизной поля называется aberrация, выражающаяся в том, что поверхность резкого изображения не является плоскостью. Кривизна поля связана с астигматизмом, но является самостоятельным видом aberrации. Точки, соответствующие кружкам наименьшего рассеяния, находятся на некоторой поверхности вращения F'_0 , расположенной между поверхностями меридионального F'_m и сагиттального F'_s изображений (рис. 2.11). Если эта поверхность отличается от плоскости, то оптическая система имеет aberrацию типа кривизны поля.

Для устранения кривизны поля изображения, так же, как и для устранения астигматизма, применяют комбинации линз с различными показателями преломления и радиусами кривизны, число которых может достигать 10. Оптические системы, у которых устранены астигматизм и кривизна поля изображения, называются анастигматами. Они обычно свободны и от других видов aberrаций.

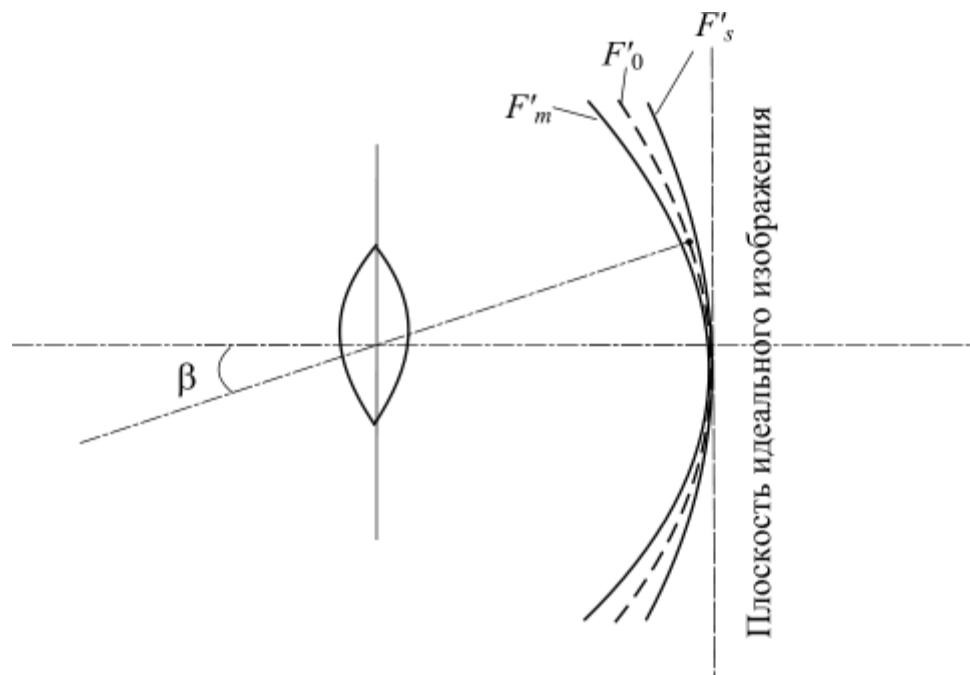


Рис. 2.11. Кривизна поля изображения

Дисторсия. Дисторсия – aberrация, вызывающая нарушение геометрического подобия между объектом и его изображением. При дисторсии линейное увеличение для точек, различно удаленных от оси, неодинаково (рис. 2.12). Неодинаковость увеличения возрастает по мере удаления от оптической оси. Дисторсия считается положительной, если линейное увеличение по мере удаления точки от оси увеличивается. В этом случае изображение квадратной сетки принимает подушкообразный вид (рис. 2.12,а). Если линейное увеличение по мере удаления точки от оси уменьшается, то дисторсия отрицательна, а изображение квадратной сетки принимает бочкообразный вид (рис. 2.12,б). Дисторсия $\Delta, \%$ оценивается по формуле

$$\Delta = [(l - l_0) / l_0] 100, \quad (2.15)$$

где l_0 – идеальный размер отрезка, перпендикулярного оптической оси; l – размер изображения того же отрезка, искаженного дисторсией.

Дисторсия оптической системы может быть уменьшена применением комбинации линз, имеющих дисторсию различных знаков. Оптическая система, свободная от дисторсии, называется ортоскопической.

Все геометрические aberrации нескорректированных оптических систем возрастают при увеличении угла между направлением луча и оптической осью системы. Коррекция геометрических aberrаций возможна в определенных пределах угла падения лучей.

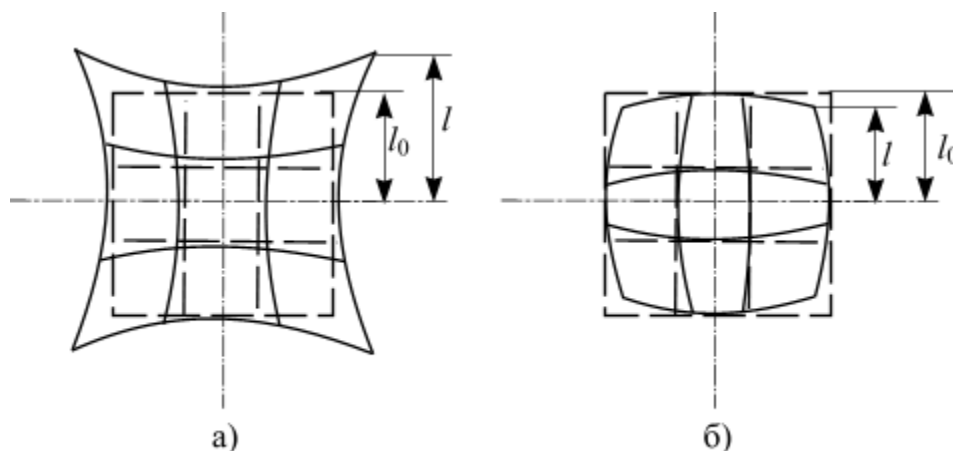


Рис. 2.12. Искажение изображения при дисторсии

Хроматическая aberrация. Причиной хроматических aberrаций является зависимость показателя преломления стекла от длины волны излучения. Основные виды хроматических aberrаций – хроматизм положения и хроматизм увеличения. Хроматизм положения проявляется в том, что лучи различных длин волн, исходящие из одной точки, расположенной на оптической оси, после преломления собираются не в одной точке, а на отрезке оси (рис. 2.13). Показатель преломления стекла увеличивается при уменьшении длины волны, поэтому преломляющее действие линзы для фиолетовых лучей будет более сильным, чем для красных, и фиолетовые лучи соберутся на оси ближе к линзе, чем красные.

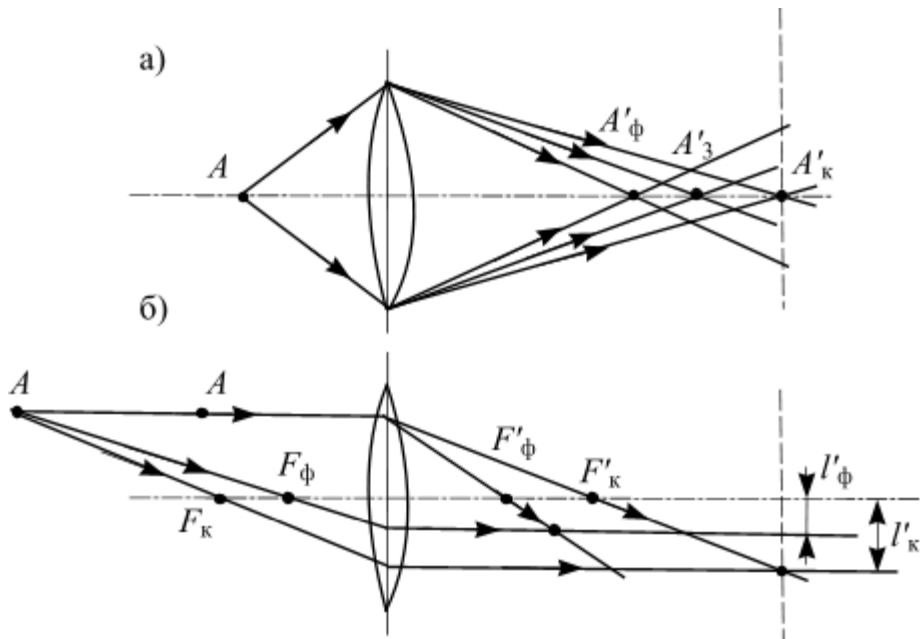


Рис. 2.13. Ход лучей при хроматической аберрации:
 а) хроматизм положения; б) хроматизм увеличения

На плоскости, проходящей через точку схода красных лучей $A'_к$ (рис. 2.13,а), изображение точки A будет иметь вид радужного кружка рассеяния, имеющего красный центр и фиолетовый край. Если переместить плоскость в точку $A'_φ$, то получим радужный кружок с обратным расположением цветов.

Вследствие различия коэффициентов преломления, увеличение изображения, образуемого лучами различных длин волн, будет разным (рис. 2.13,б). Получающееся различие в размерах изображения называется хроматизмом увеличения. В результате предметы, расположенные вне оси, окружены цветной каймой. Хроматизм увеличения прямо пропорционален расстоянию от точки объекта до оси. Для собирающих и рассеивающих линз хроматизм положения имеет разные знаки.

Хроматические aberrации уменьшаются соответствующим подбором конфигурации и материала линз, входящих в оптическую систему. Полностью устранить хроматические aberrации невозможно. В зависимости от расчета можно совместить точно фокусы лишь для двух или трех длин волн. Такие ОС называются соответственно ахроматическими и апохроматическими. Остаточная хроматическая aberrация называется вторичным спектром.

2.5. Основные характеристики оптических систем

Оптической системой, наиболее часто встречающейся в телевизионной аппаратуре, является объектив. Объектив – это оптическая система, образующая изображение плоских или протяженных предметов на

плоской поверхности фотоприемника. Он является неотъемлемой частью каждой телевизионной камеры.

Основными оптическими характеристиками телевизионного объектива являются: фокусное расстояние, относительное отверстие, поле зрения, светораспределение по полю изображения, разрешающая способность, частотно-контрастная характеристика, спектральное пропускание.

Рассмотрим некоторые из этих характеристик.

Фокусное расстояние. Оптическая сила. Основными компонентами объективов являются линзы, как собирающие, так и рассеивающие, разделенные воздушными промежутками. Соотношения, позволяющие определить фокусное расстояние системы линз, приведены в подразд. 2.3. Фокусное расстояние или его обратная величина являются мерой оптического действия системы. Оптическое действие проявляется двояко. Во-первых, чем больше оптическая сила, тем ближе к системе расположено изображение. Во-вторых, чем больше оптическая сила, тем меньше величина изображения.

За оптическую силу системы линз, расположенных в воздухе, принимают величину, обратную заднему фокусному расстоянию системы,

$$\varphi = 1/f'. \quad (2.16)$$

Единицей оптической силы является диоптрия. Одна диоптрия (дптр) есть оптическая сила системы (линзы) в воздухе с фокусным расстоянием, равным 1 м. Однако сложные оптические системы, к которым относятся объективы, характеризовать оптической силой в диоптриях не принято. Характеристика линз в диоптриях принята в очковой оптике.

Диафрагмы в оптической системе. Относительное отверстие. Всякий объектив содержит ряд круглых отверстий (диафрагм), либо образуемых самими линзами и их оправками, либо установленных специально для ограничения пучка лучей в виде непрозрачных пластин с отверстиями. Это ограничение необходимо для регулирования освещенности на фотоприемнике и изменения глубины резкости. Ограничение размера пучков – результат совместного действия всех имеющихся в оптической системе диафрагм. Однако можно выделить одну (наименьшую) диафрагму и считать, что остальные не ограничивают ход лучей. Такая диафрагма называется апертурной [2].

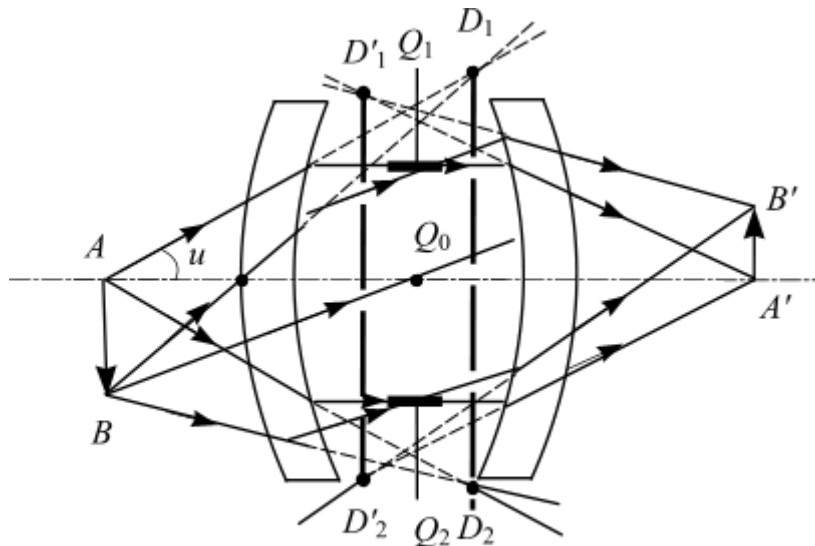


Рис. 2.14. Апертурная диафрагма

Рассмотрим пучок лучей, идущих из точки A объекта, расположенной на оси (рис. 2.14). Его размер будет ограничен апертурной диафрагмой Q_1Q_2 , отверстие которой видно из этой точки под наименьшим углом $2u$. Угол $2u$, под которым видно изображение D этой диафрагмы называется апертурным углом, а луч, идущий из осевой точки предмета и проходящий через край апертурной диафрагмы, называется апертурным лучом. Апертурная диафрагма ограничивает также и наклонные пучки, исходящие из внеосевых точек объекта. На рис. 2.14 показано построение изображения апертурной диафрагмы со стороны пространства предметов D на пересечении продолжений апертурных лучей AD_1 и AD_2 с продолжением верхнего и нижнего лучей внеосевого пучка BD_1 и BD_2 соответственно. Средний луч BQ_0 внеосевого пучка, проходящий через центр апертурной диафрагмы называется главным лучом.

Изображение D апертурной диафрагмы носит название входного зрачка оптической системы, так как свет входит в систему через это отверстие.

Аналогично может быть построено изображение апертурной диафрагмы со стороны пространства изображений D' , как показано на рис. 2.14. Изображение D' называется выходным зрачком оптической системы, так как пучок света опирается на это отверстие, выходя из системы.

Освещенность изображения, сформированного объективом, определяется апертурным углом, однако использование этого параметра затруднено, так как объект может быть расположен на различных расстояниях от телевизионной камеры. С учетом этого для оценки освещенности изображения пользуются понятием относительного отверстия

$$O=D/f', \quad (2.17)$$

где D – диаметр входного зрачка, а f' – заднее фокусное расстояние объектива.

Следует помнить, что относительное отверстие объектива нельзя определить через диаметр объектива или его первой линзы.

Более универсальной характеристикой, чем относительное отверстие, является светосила H [3].

$$H = \tau O^2 = \tau(D/f')^2, \quad (2.18)$$

где τ – коэффициент пропускания объектива, учитывающий потери светового потока в объективе за счет поглощения в оптических средах и за счет отражений на поверхностях раздела сред.

Для объекта, расположенного на большом расстоянии, освещенность изображения равна [3]

$$E_0 = 0,25\pi L\tau(D/f')^2 = 0,25\pi LH, \quad (2.19)$$

где E_0 – освещенность в центре изображения, лк; L – яркость предмета, кд/м²; H – светосила объектива.

Величина прошедшего через объектив светового потока прямо пропорциональна светосиле объектива (или квадрату относительного отверстия). С этой точки зрения желательно увеличение H и D/f' . Однако увеличение относительного отверстия связано с возрастанием геометрических aberrаций и усложнением их коррекции, поэтому объективы с большим относительным отверстием (светосильные объективы) всегда содержат большое число линз и обладают меньшим углом зрения.

Для изменения освещенности изображения объектив снабжается специальной диафрагмой, позволяющей оперативно изменять величину относительного отверстия. Международными нормами установлена шкала диафрагм в зависимости от диафрагменного числа $F = 1: (D/f')$. Основной ряд номинальных значений диафрагменных чисел строится по закону

$$F = 0,5(\sqrt{2})^{N-1},$$

где N – порядковый номер.

Принят следующий основной ряд шкалы диафрагм:

0,5; 0,7; 1,0; 1,4; 2,0; 2,8; 4,0; 5,6; 8,0; 11; 22; 32; 45; 64; 90; 128.

Принципиальным пределом относительного отверстия является величина 1:0,5.

Диафрагма поля зрения (полевая диафрагма). Всякая оптическая система изображает только часть пространства, расположенного вокруг

ее оптической оси. Эта часть называется полем зрения оптической системы. Поскольку габариты ОС всегда ограничены, поле зрения системы имеет вполне определенные размеры. Как было показано ранее, в параксиальной области ширина как осевых, так и наклонных световых пучков и, следовательно, освещенность изображения определяется апертурной диафрагмой. По мере удаления точки от оптической оси ширина светового пучка ограничивается не только входным зрачком, но и оправками линз, играющими роль диафрагмы. Такая диафрагма называется диафрагмой поля зрения [2]. На рис. 2.15 показано влияние диафрагмы поля зрения на ход световых пучков. Пусть из точки A_1 во входной зрачок 3 падает пучок лучей. Диафрагма 1, расположенная перед зрачком, не влияет на прохождение этого пучка. Если пучок лучей будет поступать из точки A_2 , то часть светового потока будет задерживаться диафрагмой. Чем более удалена точка от оси, тем меньше попадает во входной зрачок света и менее ярким будет образуемое ОС изображение. Это явление называется геометрическим виньетированием. Виньетирование приводит к уменьшению освещенности на краях изображения. Кроме того, по мере удаления от центра возрастают aberrации и, следовательно, ухудшается качество изображения, поэтому поле зрения системы ограничивают путем установки полевой диафрагмы, которая располагается обычно в плоскости, сопряженной с плоскостью предмета.

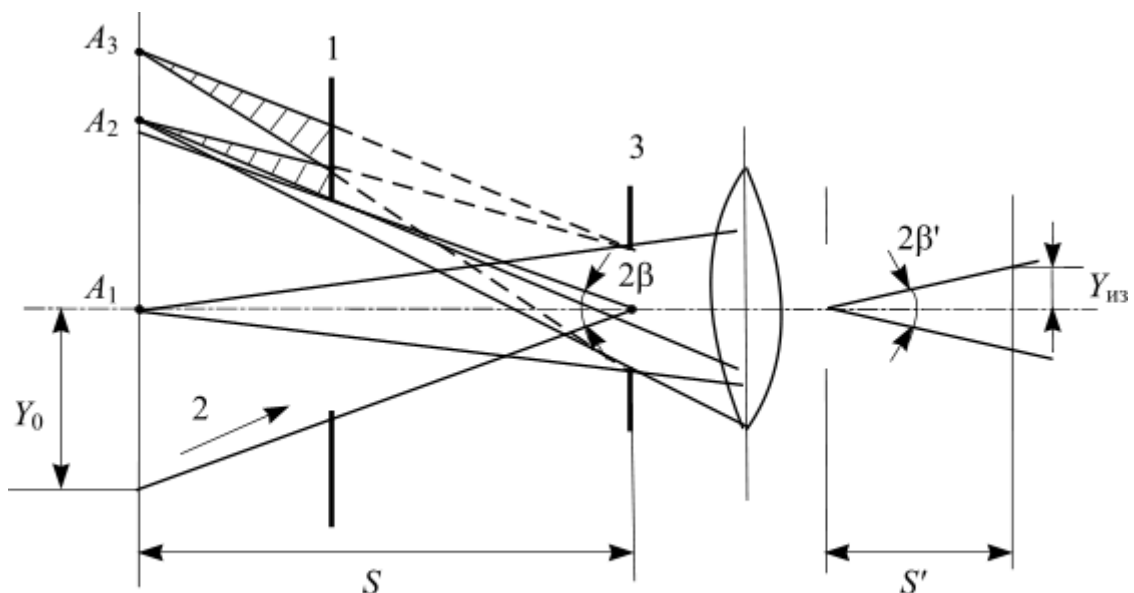


Рис. 2.15. Влияние диафрагмы поля зрения на ход световых пучков

Изображение диафрагмы поля зрения 1 со стороны пространства предметов называется входным люком 2. Поле зрения объективов принято характеризовать в угловой мере. Угол 2β , под которым из центра входного зрачка видны края входного люка, называется углом поля зре-

ния ОС в пространстве предметов. В этом случае $2Y_{об}$ является максимальным линейным размером изображаемого объекта, и справедливо

$$\operatorname{tg} \beta = Y_{об} / S, \quad (2.20)$$

где S – расстояние от объекта до передней главной плоскости объектива.

Величина угла поля изображения $2\beta'$ связана с размерами изображения на фотоприемнике $2Y_{из}$ и расстоянием S' между задней главной плоскостью объектива и плоскостью изображения (поверхностью фотоприемника) соотношением

$$\operatorname{tg} \beta' = Y_{из} / S' \quad (2.21)$$

Глубина резкости. Каждой плоскости в пространстве предметов соответствует только одна плоскость в пространстве изображений, положение которой определяется в соответствии с (2.7). Следовательно, на поверхности фотоприемника можно получить четкое изображение только тогда, когда объект расположен в сопряженной плоскости, перпендикулярной оптической оси. В действительности объекты чаще всего имеют протяженность вдоль оптической оси. Точки объекта, не лежащие в сопряженной плоскости, будут изображаться кружками рассеяния. Например, как показано на рис. 2.16, изображением точки A объекта, расположенной в плоскости Q_1 на расстоянии S от объектива, будет точка A' , лежащая в сопряженной плоскости изображения Q'_1 . Точка B объекта, находящаяся ближе к объективу, изобразится точкой B' в плоскости Q'_2 , а точка C , находящаяся дальше, – точкой C' в плоскости Q'_3 . В плоскости изображения Q'_1 точки B и C изобразятся кружками рассеяния.

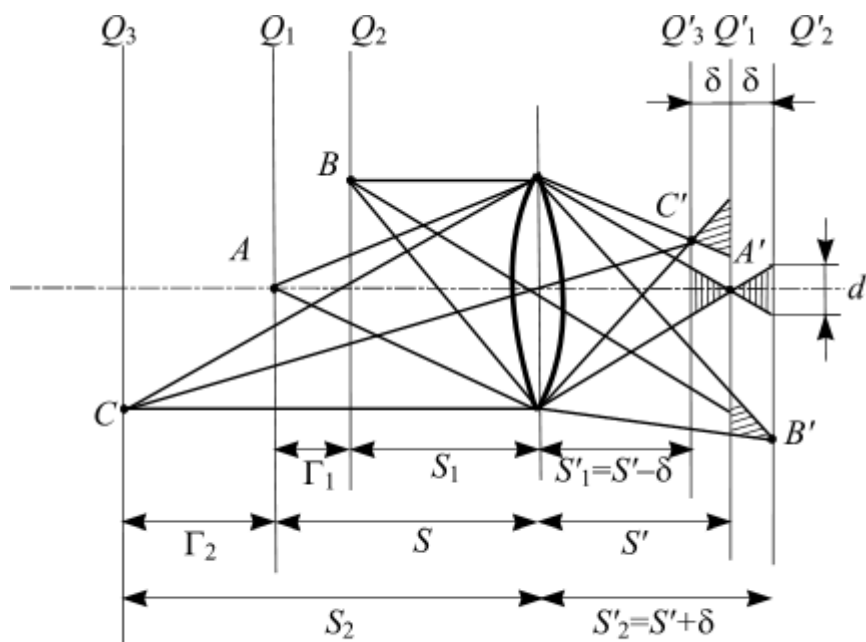


Рис. 2.16. Определение глубины резкости

Если диаметр кружка рассеяния не превышает допустимую величину, которая для телевизионных камер определяется размерами элемента изображения, то изображение точки кружком рассеяния не повлияет на визуальную резкость изображения.

Свойство оптической системы изображать в одной плоскости и практически одинаково резко предметы, удаленные от объектива на различные расстояния, называется глубиной резкости [2]. Мерой глубины резкости в пространстве предметов служит расстояние, на которое может переместиться объект без заметного нарушения резкости его изображения, а в пространстве изображений – расстояние, на которое может переместиться плоскость изображения при неподвижном объекте.

Если задаться допустимым диаметром кружка рассеяния d и считать, что при перемещении фотоприемника в пределах, ограниченных плоскостями Q_2' и Q_3' , диаметр сечения светового пучка не превысит эту величину, то две сопряженные плоскости в пространстве предметов Q_2 и Q_3 , расположенные от объектива на расстояниях $S_1 = S - \Gamma_1$ и $S_2 = S + \Gamma_2$ соответственно, определяют глубину резко отображаемого пространства. Это означает, что все точки пространства, лежащего между ними, будут изображаться в виде кружков рассеяния с диаметром, не превосходящим d .

Точное значение расстояния от объектива до передней границы пространства, резко изображаемого объективом, определяется следующим образом:

$$S_1 = \frac{S f^2}{f^2 + (S - f)Fd}, \quad (2.22)$$

где S – расстояние установки на резкость; f – фокусное расстояние; F – знаменатель относительного отверстия (диафрагменное число); d – диаметр допустимого кружка рассеяния.

Расстояние от объектива до задней границы определяется формулой

$$S_1 = \frac{S f^2}{f^2 - (S - f)Fd}. \quad (2.23)$$

Принимая во внимание, что фокусное расстояние f объектива обычно значительно меньше расстояния установки, формулы (2.22) и (2.23) можно упростить:

$$S_1 \approx \frac{S f^2}{f^2 + SFd}; \quad S_1 \approx \frac{S f^2}{f^2 - SFd}. \quad (2.24)$$

Еще проще формулы глубины резкости, если они выражены через гиперфокальное расстояние. Гиперфокальным расстоянием H называется расстояние от самого близкого к объективу плана, еще изображаемого резко при установке объектива на ∞ ($S_2 = \infty$; $S_1 = H$).

При этом границы глубины резкости

$$S_1 = \frac{HS}{H + S}; \quad S_2 = \frac{HS}{H - S}. \quad (2.25)$$

Анализ приведенных соотношений позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, глубина резкости возрастает при уменьшении относительного отверстия объектива, т. е. при увеличении F , следовательно, ее можно увеличить, задиафрагмировав объектив. Во-вторых, глубина резкости тем больше, чем меньше фокусное расстояние f объектива.

Кроме того, если заданы расстояния от объектива до переднего плана S_1 и заднего плана S_2 , то расстояние до плоскости наилучшей установки может быть определено так:

$$S = 2 \frac{S_1 S_2}{S_1 + S_2}, \quad (2.26)$$

из чего следует, что плоскость наиболее выгодной установки расположена ближе к переднему плану.

Если резко отображаемое пространство должно простираться от переднего плана S_1 до бесконечности, то объектив следует устанавливать на плоскость, отстоящую вдвое дальше переднего плана:

$$S = 2 S_1 \quad (2.27)$$

Величину F , обеспечивающую резкое отображение в пределах требуемой глубины, можно вычислить по приближенной формуле

$$F = \frac{S_2 - S_1}{S_1 S_2} f^2, \quad (2.28)$$

где S_1 и S_2 измеряются в метрах, а f – в сантиметрах.

Разрешающая способность. Разрешающая способность оптических систем характеризует их способность давать раздельное изображение двух близких точек объекта. Угловая разрешающая способность – это минимальный угол между направлением на две точки, при котором они воспринимаются как раздельные. То минимальное расстояние, при котором точки на изображении еще видны как раздельные, называется линейной разрешающей способностью (или линейным пределом разрешения) δ . Часто в качестве меры разрешающей способности объектива принимают величину $N = 1/\delta$, определяющую число изображений простейших элементов (точек, полос), различаемых раздельно на отрезке изображения в 1 мм. Если aberrации в системе полностью отсутствуют, то предел разрешению устанавливает дифракция света. Линейный предел разрешения [3]:

$$\delta = \frac{1,22\lambda}{D/f'}, \quad (2.29)$$

где λ – длина волны излучения; D – диаметр входного зрачка; f' – фокусное расстояние.

Для реальных объективов, обладающих остаточными aberrациями, разрешающая способность оказывается в несколько раз меньше теоретической.

2.6. Объективы телевизионных передающих камер

Для получения изображений объектов на поверхности фотоприемников в телевизионных передающих камерах используются объективы, относящиеся к классу фотографических [2].

Телевизионные объективы с фиксированными фокусными расстояниями. Объективы телевизионных камер характеризуются прежде всего величиной фокусного расстояния f . Объективы с фиксированным фокусным расстоянием по величине фокусного расстояния подраз-

деляются на короткофокусные ($f < 40$ мм), нормальные ($f = 40 \dots 80$ мм) и длиннофокусные ($f > 80$ мм).

Не менее важной характеристикой объектива является его светосила H или относительное отверстие O . Различают объективы сверхсветосильные ($O > 1:2$), светосильные ($O = 1:2 \dots 1:2,8$) и малосветосильные ($O < 1:2,8$).

В зависимости от угла поля зрения различают объективы с малым углом ($2\beta < 15 \dots 20^\circ$), универсальные ($2\beta = 20 \dots 60^\circ$) и широкоугольные объективы ($2\beta > 60^\circ$).

Очевидно, что все эти характеристики связаны друг с другом. Выбор параметров объектива определяется характером изображаемых объектов.

Универсальные объективы удовлетворяют требованиям большинства передач и, как правило, относятся к группе светосильных. Широкоугольные объективы применяют, когда необходимо передать общим планом с небольшого расстояния изображения широко расположенных объектов. Объективы с малым углом поля зрения (длиннофокусные) позволяют получать в крупном масштабе изображения удаленных объектов.

Объективы с переменным фокусным расстоянием. Долгое время в киносъёмочной и телевизионной технике использовались объективы с постоянными фокусными расстояниями. Различные виды съёмок обеспечивались набором сменных объективов. Современное развитие техники позволило разработать и ввести в практику объективы с переменным фокусным расстоянием.

Объективы с переменным фокусным расстоянием характеризуются тем, что их фокусное расстояние, а соответственно и масштаб изображения могут изменяться в широких пределах. Положение плоскости резкого изображения при этом остается неизменным и совмещенным с плоскостью фотоприемника. Изменять фокусное расстояние можно и дискретно, и плавно. Наибольшее распространение получили объективы с плавно изменяемым фокусным расстоянием (панкратические объективы). Во всех панкратических объективах изменение масштаба изображения производится перемещением компонентов (групп линз) вдоль оптической оси. По своему устройству панкратические объективы можно разделить на две группы:

– вариообъективы, имеющие единую оптическую систему. При взаимном строго согласованном перемещении ее составляющих частей в небольших пределах непрерывно изменяется фокусное расстояние всей системы;

– трансфокаторы, состоящие из обычного объектива и телескопической насадки, в которой передвижением отдельных составляющих изменяется увеличение и, тем самым, изменяется фокусное расстояние всей системы.

Вариообъективы и трансфокаторы различаются по методам коррекции аберраций: в вариообъективах коррекция всех аберраций выполняется для всей системы как единого целого, тогда как для трансфокатора, представляющего собой систему «насадка – объектив», аберрации составляющих исправляются независимо друг от друга.

Основные требования, предъявляемые к панкратическим объективам таковы: большой диапазон изменения фокусных расстояний, высокая стабильность положения плоскости резкого изображения, возможность фокусировки на объекты различного удаления, постоянство относительного отверстия при изменении фокусного расстояния.

В большинстве известных систем такого типа используется четырехкомпонентная схема, позволяющая реализовать свойства как широкоугольного (короткофокусного) объектива, так и телеобъектива (длиннофокусного объектива) [3]. На рис. 2.17 приведена оптическая схема такого объектива. Согласно этой схеме объектив состоит из 4 компонентов (групп линз). Компоненты 1 и 4 должны быть положительными, компонент 2 – отрицательным, а компонент 3 может быть как положительным, так и отрицательным. Входной компонент (1) – фокусирующая часть. Подвижкой этого компонента или его части осуществляется фокусировка объектива на конечное расстояние. При изменении фокусного расстояния компонент 1 остается неподвижным. Основой системы является переменная часть – компоненты 2 и 3. Компонент 2 – вариатор – подвижная группа линз, управляющая фокусным расстоянием системы и обеспечивающая требуемую кратность. Когда вариатор находится в крайнем левом положении, фокусное расстояние минимально, а угол зрения максимален. В крайнем правом положении вариатора фокусное расстояние максимально. Промежуточное положение вариатора соответствует средним значениям фокусного расстояния. Фокусирующая группа 1 и вариатор 2 формируют изображение, плоскость которого перемещается синхронно с перемещением вариатора. Подвижный компонент 3 – компенсатор – обеспечивает неподвижное положение плоскости изображения при всех фокусных расстояниях. Компонент 4 – корректор. Его параметры определяют крайние значения фокусных расстояний всего объектива, кроме того, на этот компонент возложена функция коррекции аберраций.

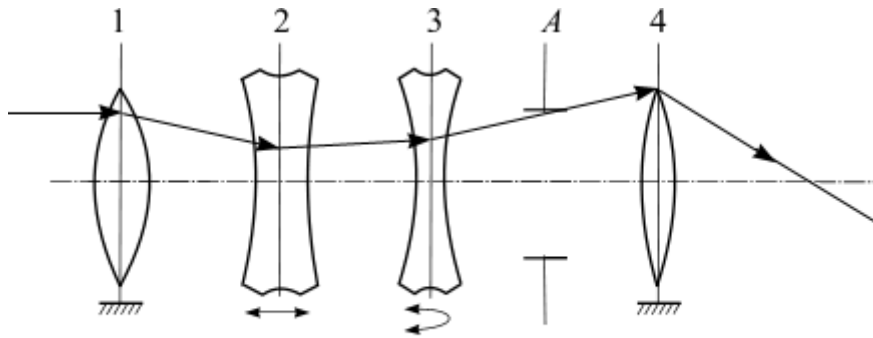


Рис. 2.17. Оптическая схема 4-компонентного панкратического объектива

Для сохранения постоянства относительного отверстия объектива при изменении фокусного расстояния необходимо располагать апертурную диафрагму A за его переменной частью, перед последним неподвижным компонентом 4 или внутри него.

В настоящее время созданы панкратические объективы с весьма высокими оптическими характеристиками: кратностью изменения фокусного расстояния до 50, относительным отверстием O до 1:1,2, полем зрения 2β до 90° .

3. КОЛОРИМЕТРИЯ

3.1. Понятие о цвете

Ощущение цвета есть результат субъективного восприятия зрительным аппаратом объективно существующих световых излучений. Оно определяется двумя основными факторами: раздражителем – объективно существующим и действующим на глаз излучением; результатом раздражения – ощущением цвета, зависящим от свойств световоспринимающего аппарата. Световые излучения, которые воспринимает зрительный аппарат человека, лежат в диапазоне длин волн от 380 до 780 нм. Этот диапазон излучения принято считать видимым спектром.

Глаз является селективным приемником излучения. Это значит, что в видимом диапазоне он воспринимает различные длины волн неодинаково. Ощущение цвета зависит от спектрального состава воздействующего на глаз излучения. Если излучение содержит все длины волн видимого диапазона и является равноинтенсивным, т. е. все составляющие спектра излучения имеют одинаковую мощность, то в зрительном аппарате возникает ощущение белого цвета. Ощущение цвета, отличное от белого, возникает лишь в том случае, если излучение содержит не все длины волн указанного диапазона, либо является существенно неравномерным. Предельным случаем неравномерного излучения можно считать излучения в малом интервале длин волн $\Delta\lambda$, так называемые монохроматические излучения. Монохроматические излучения разной длины волны вызывают у человека ощущение различных спектральных цветов, обладающих максимальной (100 %) насыщенностью. Насыщенность – характерное свойство цвета – цветовой параметр, обозначающий степень разбавленности монохроматического цвета белым (см. цветную вклейку рис. 2). Насыщенность белого цвета равна нулю. Спектр монохроматических излучений условно разбит на семь главных цветов (табл. 3.1), названия которых могут служить приблизительным обозначением цветового тона. Под цветовым тоном понимают характерное свойство цвета, позволяющее обозначить его как красный, зеленый, желтый и т. д., в зависимости от спектрального состава воздействующего излучения (см. цветную вклейку рис. 3). Цветовой тон и насыщенность не зависят от интенсивности излучения и характеризуют качество цвета, которое называется цветностью. Количество цвета связано с величиной лучистого потока, воздействующего на орган зрения излучения.

Перечисленные параметры: светлота, цветовой тон, насыщенность являются субъективными, так как не могут быть объективно измерены.

Однако им соответствуют физические параметры излучения: яркость L , доминирующая (преобладающая) длина волны λ_d и чистота цвета P . Субъективные и физические параметры связаны между собой; так, яркость определяет светлоту, доминирующая длина волны – цветовой тон, а чистота цвета – насыщенность. Таким образом, цвет характеризуется тремя параметрами: светлотой или яркостью, цветовым тоном и насыщенностью – и в силу этого является трехмерной величиной. Во многих случаях оказывается удобным отдельно оценивать качественную и количественную характеристики цвета, определяя соответственно его через цветность и яркость.

Таблица 3.1

Длина волны, нм	780–605	605–590	590–560	560–500	500–470	470–430	430-380
Цвет	красный	оранжевый	желтый	зеленый	голубой	синий	фиолетовый

Для каждого из приведенных в табл. 3.1 главных цветов можно подобрать дополнительный цвет, который при смешении в определенной пропорции со световым потоком данного цвета дает белый цвет. Так, для желтых, оранжевых, зеленых цветов дополнительными цветами будут синий, голубой и пурпурный соответственно. Пурпурный цвет не является спектральным цветом, а получен от смешения синего и красного цветов.

Воздействующее на глаз излучение определенного спектрального состава и интенсивности дает ощущение одного присущего ему цвета, т. е. известный спектральный состав и интенсивность излучения полностью определяют цвет излучения. Однако по цвету излучения нельзя судить о его спектральном составе, так как ощущение одного и того же цвета может быть получено при различных спектральных составах воздействующих излучений. Зрительный аппарат человека не в состоянии, например, отличить оранжевый цвет монохроматического излучения с длиной волны около 600 нм от цвета смеси источников излучения красного ($\lambda_k=700$ нм) и зеленого ($\lambda_3=500$ нм). Два различных по спектральному составу излучения, создающих ощущение одного и того же цвета, называются метаметрической парой.

Количество различимых глазом цветов очень велико и зависит от многих факторов, таких как условия наблюдения, тренированность наблюдателя и др. Наш глаз способен различать около 10 млн различных цветов, отличающихся один от другого по трем параметрам: светлоте, цветовому тону и насыщенности. Описание такого множества цве-

товых оттенков невозможно без их классификации и символического обозначения. С этой целью разрабатываются системы цветовых шкал в виде таблиц и цветовых атласов, которые служат для безынструментального определения цвета рассеивающей поверхности.

Наиболее известны цветовые атласы Оствальда, Менселла и Рабкина [4]. Их общим недостатком является неточность. Цветовая система, позволяющая дать наиболее точное численное описание цвета, была создана на основе теоретических и экспериментальных работ многих поколений ученых, осветивших природу цветового зрения и положивших в основу построения науки об измерении цвета – колориметрии – теорию трехкомпонентного цветового зрения и понятие о трехмерном цветовом пространстве.

3.2. Колориметрическое определение цвета

Физиологические основы цветового зрения базируются на теории трехкомпонентного зрения, выдвинутой впервые М.В. Ломоносовым в 1756 г. Согласно этой теории допускаем существование на сетчатке глаза трех видов нервных аппаратов, каждый из которых обладает преимущественной чувствительностью к определенному участку видимого спектра – коротковолновому (синему), средневолновому (зеленому), длинноволновому (красному).

Изолированное возбуждение одного из этих аппаратов дает ощущение одного из трех насыщенных цветов – синего, зеленого, красного. Обычно (при наблюдении малонасыщенных цветов) воздействующее излучение содержит весь спектр видимого диапазона волн, но с разной спектральной интенсивностью. Это приводит к раздражению не одного, а двух или трех световоспринимающих аппаратов одновременно. При этом волны различной длины возбуждают эти аппараты в различной степени. Различное соотношение возбуждений световоспринимающих аппаратов вызывает ощущение цвета. Таким образом, анализ воздействующего излучения тремя селективными светочувствительными аппаратами глаза и последующий синтез результатов их возбуждений корой головного мозга вызывает ощущение большого числа цветовых оттенков окружающих нас предметов. Теория эта хорошо согласуется с законами смешения цветов, которые косвенно ее подтверждают.

В телевидении используется локальное, пространственное и бинокулярное смешение цветов. Локальное смешение может быть одновременным (оптическим), когда на одну поверхность проецируются два или несколько излучений, вызывающие каждый в отдельности ощущение разных цветов (см. цветную вклейку рис. 4), и последовательным, когда аналогичные излучения воздействуют на глаз последовательно одно за

другим с помощью диска с цветными светофильтрами (см. цветную вклейку рис. 5). При быстрой смене излучений в зрительном аппарате возникает ощущение единого результирующего цвета. При пространственном смешении участки, окрашиваемые смешиваемыми цветами, имеют достаточно малые размеры и глаз воспринимает их как единое целое (см. цветную вклейку рис. 6). Примером этому могут служить мелкие штрихи, мозаика и др. Воспроизведение цветного изображения на телевизионном экране в большинстве случаев основано на пространственном смешении цветов. Биноккулярным смешением называется смешение двух или нескольких цветов путем раздельного раздражения левого и правого глаза разными цветами, в результате чего возникает ощущение нового цвета.

В основном законе смешения утверждается, что любые четыре цвета находятся в линейной зависимости. Иначе говоря, любой цвет может быть выражен через любые три взаимно независимых цвета:

$$fF = r'R + g'G + b'B, \quad (3.1)$$

где fF – излучение произвольного состава, единица которого обозначена через F , а количество единиц – через f ; R, G, B – единичные количества основных цветов; r', g', b' – множители, указывающие количества излучений, соответствующих цветам R, G, B , – или «модули этих цветов».

Основными цветами называются взаимно независимые цвета, которые нельзя получить смешением двух других, т. е. они не могут быть связаны уравнениями типа

$$r'R = g'G + b'B; g'G = r'R + b'B; b'B = r'R + g'G. \quad (3.2)$$

Примером взаимно независимых цветов являются красный (R), зеленый (G) и синий (B).

Необходимо отметить, что для чистых спектральных цветов нельзя получить цветового равенства (3.1) ни при каких значениях основных цветов R, G, B . Согласование для этих цветов наступает лишь тогда, когда один из основных цветов переносится на сторону исследуемого цвета.

В случае переноса в сторону исследуемого цвета, например красной составляющей, цветовое уравнение принимает следующий вид

$$fF + r'R = g'G + b'B \quad (3.3)$$

или

$$fF == -r'R + g'G + b'B. \quad (3.4)$$

Таким образом, при описании некоторых цветов с помощью (3.1) коэффициенты r' , g' , b' могут иметь отрицательные значения. Это позволяет расширить применимость формулы цветового уравнения (3.1), показывающего, что в общем случае цвет определяется тремя независимыми переменными r' , g' , b' , что подтверждает его трехмерность.

Знание численных значений цветовых коэффициентов r' , g' , b' полностью определяет воздействующее на глаз излучение и количественно и качественно. Для определения только качественной характеристики светового потока цветности F достаточно знать не абсолютные, а относительные количества основных цветов r , g , b , определяемые из выражений

$$\begin{aligned} r &= \frac{r'}{r' + g' + b'} = \frac{r'}{m}; \\ g &= \frac{g'}{r' + g' + b'} = \frac{g'}{m}; \\ b &= \frac{b'}{r' + g' + b'} = \frac{b'}{m}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где $m = r' + g' + b'$ – цветовой модуль.

Очевидно, что

$$r + g + b = 1. \quad (3.6)$$

Символы r , g , b носят название координат цветности. В (3.1) множитель f' указывает количество цвета F , необходимое для обеспечения цветового равенства. Известно, что яркость смеси равна сумме яркостей смешиваемых цветов, т. е.

$$f' = r' + g' + b' = m. \quad (3.7)$$

Тогда, разделив (3.1) на цветовой модуль, получим

$$F = rR + gG + bB. \quad (3.8)$$

Цвет F носит название единичного цвета, сумма его координат равна единице.

Координаты цветности являются зависимыми величинами, так как, зная две из них, третью находим из (3.6). Это подтверждает двумерность параметра цвета – цветности и позволяет отобразить ее точкой в плоскости треугольника основных цветов.

3.3. Геометрическое представление цвета

Вследствие 3-компонентности цветового зрения полная характеристика цвета определяется тремя числами, которыми в выбранной коло-

риметрической системе, например ABC , являются модули трех основных цветов a' , b' , c' . Необходимость и достаточность трех чисел для полной характеристики цвета позволяет рассматривать его как точку в трехмерном цветовом пространстве или как вектор, проводимый в эту точку из начала координат. Если основные цвета A , B , C представить в виде векторов A , B , C , то уравнение цвета может быть записано в виде

$$D = a'A + b'B + c'C. \quad (3.9)$$

В этом уравнении цвет смеси определяется суммарным вектором D , имеющим координаты a' , b' , c' в системе координат ABC . Координаты каждой точки цветового пространства численно равны проекции вектора цвета на координатные оси. Начало всех векторов цвета расположено в общей точке O , являющейся началом системы координат цветового пространства, которому соответствует черный цвет (рис. 3.1). В качестве координат цветового пространства могут быть выбраны направления векторов любых трех линейно независимых цветов. Для обеспечения этого условия векторы выбранных основных цветов не должны лежать в одной плоскости, и следовательно, объем параллелепипеда, построенного на них, не равен нулю. Вследствие того, что все векторы цвета имеют общее начало, их можно рассматривать

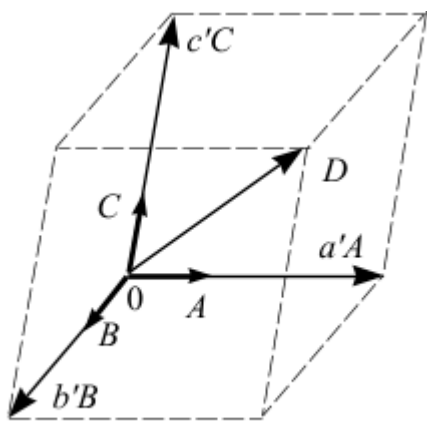


Рис. 3.1. Вектор цвета и его компоненты

как радиусы – векторы точек, каждая из которых будет однозначно определять цвет. Тогда каждой точке цветового пространства будет соответствовать определенное значение яркости и цветности. При этом длина вектора характеризует количество цвета – яркость, а направление – его качество – цветность.

Пространство, в котором находятся цветовые векторы, называется цветовым. Совокупность цветовых векторов в цветовом пространстве занимает телесный угол менее 2π , так как в противном случае суммирование двух цветов, представленных соответствующими векторами, может привести к уменьшению длины результирующего вектора, т. е. яркости смеси, что физически невозможно. Сказанное иллюстрирует рис. 3.2, где в колориметрической системе, построенной на векторах трех основных цветов ABC , изображена коническая поверхность, образованная векторами цветов монохроматических излучений. Поверхность имеет выпуклую форму, так как не один спектральный цвет не может

быть получен смешением двух других. Видимый спектр ограничен, с одной стороны, красным ($\lambda = 700$ нм), а с другой – синим ($\lambda = 400$ нм) излучением, поэтому поверхность спектральных цветов незамкнута. Проведя плоскость через векторы монохроматических цветов с $\lambda = 400$ нм и $\lambda = 700$ нм, получим плоскость, в которой расположены векторы всех возможных смесей этих цветов, которые принято называть пурпурными цветами.

Поскольку цветов более чистых, чем спектральные, не существует, векторы всех реальных цветов расположены в пределах части цветового пространства, которое ограничено конической поверхностью, образованной векторами цветов монохроматических излучений и плоскостью чистых пурпурных цветов. Совокупность направлений векторов реальных цветов принято называть конусом реальных цветов. Цвета, векторы которых лежат вне конуса реальных цветов, в природе не существуют, вследствие чего их принято называть нереальными цветами. При пересечении цветового пространства плоскостью образуется цветовой треугольник ABC , в котором координаты цветности монохроматических излучений изображаются точками на кривой, называемой спектральным локусом.

Единичная плоскость в цветовом пространстве. Выше указывалось, что качественная характеристика цвета – цветность – является двумерной величиной и, следовательно, может быть определена точкой на плоскости. Одной из характерных плоскостей цветового пространства является плоскость единичных цветов. Единичным цветом в колориметрии называют любой цвет, сумма координат (модулей) которого равна единице. Поскольку отношение модуля каждого основного цвета к сумме модулей основных цветов представляет собой соответствующие трехцветные коэффициенты или координаты цветности

$$a'/m' = a; \quad b'/m' = b; \quad c'/m' = c, \quad \text{где } m' = a' + b' + c',$$

а сумма трехцветных коэффициентов $a+b+c=1$, координаты любого единичного цвета равны его соответствующим трехцветным коэффициентам, или, что то же самое, координатам цветности. Положение плоскости единичных цветов в цветовом пространстве определяется единичными значениями их отрезков, отсекаемых плоскостью на координатных осях ABC . Следовательно, плоскость, пересекающая оси координат в точках A_0 ($a' = 1; b' = 0; c' = 0$), B_0 ($a' = 0; b' = 1; c' = 0$), C_0 ($a' = 0; b' = 0; c' = 1$) (рис. 3.2), является геометрическим местом точек единичных цветов в цветовом пространстве ABC , так как сумма координат любой точки этой плоскости равна единице. Каждой точке плоскости еди-

ничных цветов соответствует определенное направление цветового вектора, пронизывающего в этой точке плоскость.

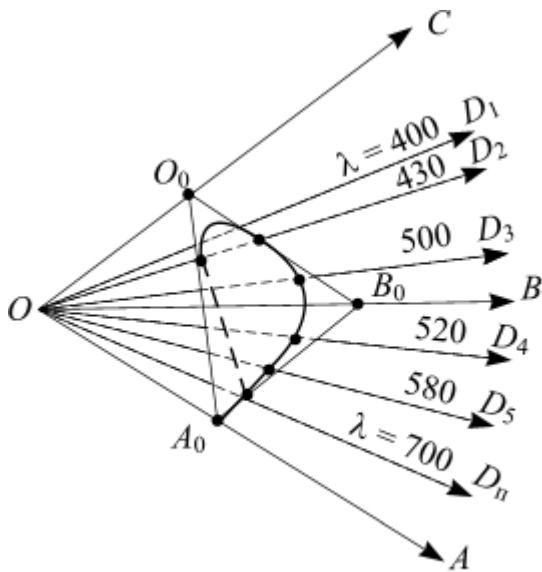


Рис. 3.2. Цветовое пространство

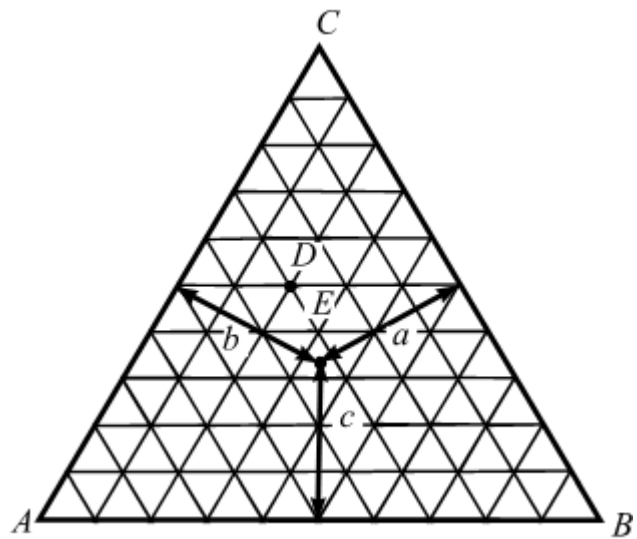


Рис. 3.3. Цветовой треугольник ABC

Следовательно, цветности любого излучения соответствует единственно возможная точка этой плоскости. Треугольник $A_0B_0C_0$, образованный следами пересечения единичной плоскости с координатными плоскостями системы, называется цветовым треугольником и является равносторонним, а положение точки в треугольнике определяет цветность описываемого цвета. Если положение точки внутри равностороннего треугольника задано, то перпендикуляры, опущенные из нее на противоположные стороны вершин ABC , дадут непосредственно трехцветные коэффициенты (координаты цветности) a, b, c , сумма которых равна единице (рис. 3.3). Если же наоборот, заданы координаты цветности a, b, c , то положение точки в треугольнике найдется по правилу определения центра тяжести. Удобно для нахождения точки цветности по известным трехцветным коэффициентам пользоваться равномерной сеткой, нанесенной на цветовом треугольнике. Пользуясь сеткой, легко определить, что цветность равноинтенсивного цвета E (точка E) описывается уравнением $\Phi_E = 1/3A + 1/3B + 1/3C$, а, например, в точке D цветность $\Phi_D = 0,3A + 0,5C + 0,2B$.

3.4. Система RGB

Сопоставление результатов измерения цвета возможно лишь при единой колориметрической системе, оперирующей вполне определенными, заранее согласованными основными цветами. В связи с этим в целях устранения неопределенности измерения цвета в 1931 г. Международная комиссия по освещению (МКО) стандартизовала в качестве

основных цветов – основных стимулов – три монохроматических излучения с длинами волн $\lambda_R = 700$ нм, $\lambda_G = 546,1$ нм и $\lambda_B = 435,8$ нм. Выбранные основные цвета удобны тем, что два из них R и B близки к краям видимого спектра, а третий G – к его середине, поэтому каждый из них действует преимущественно на свой цветочувствительный аппарат. Кроме того, излучение λ_G и λ_B с большой интенсивностью испускается парами ртути, что упрощает проведение колориметрических измерений.

Любой цвет в системе R, G, B определяется по аналогии с (3.1) выражением

$$fF = r'R + g'G + b'B, \quad (3.10)$$

где R, G, B – обозначения выбранных основных цветов, а r', g', b' – их количества, т. е. координаты цвета. Координаты цвета r', g', b' могут быть выражены в энергетических или световых единицах, но удобнее их выражать в количествах единичных цветов R, G, B . При этом символы R, G, B являются наименованием единиц измерения цвета. Абсолютные (количественные) значения единичных цветов колориметрической системы не устанавливаются, нормируют лишь их соотношение. Его выбирают таким, чтобы при сложении единичных цветов в численно равных количествах получилось ощущение равноэнергетического белого цвета E :

$$E = 1R + 1G + 1B. \quad (3.11)$$

Такое соотношение основных цветов для белого цвета E , как будет показано ниже, оказывается удобным при представлении цвета точкой в трехмерном пространстве или вектором. Из опыта смешения цветов известно, что для получения цветового ощущения белого от равноэнергетического излучения – источника типа E необходимо к единице цвета R прибавить 4,5907 единицы цвета G и 0,0601 единицы цвета B . Тогда если через L_R, L_G, L_B обозначить относительные яркостные коэффициенты основных цветов, то количественное соотношение компонентов смеси можно записать как

$$L_R r'_E : L_G g'_E : L_B b'_E = 1 : 4,5907 : 0,0601, \quad (3.12)$$

где r'_E, g'_E, b'_E – координаты белого цвета равноэнергетического излучения E , которые в системе RGB будут:

$$r'_E = g'_E = b'_E = 1/3. \quad (3.13)$$

Координаты цвета r', g', b' любого сложного излучения могут быть определены, если известен спектральный состав этого излучения

$$\begin{aligned}
 r' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda; \\
 g' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda; \\
 b' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda.
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

Величины $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ представляют собой цветовые свойства среднего наблюдателя, фиксирующего достижения цветового равенства (3.10), которые были стандартизованы в 1931 г. МКО на основе экспериментальных результатов, полученных Райтом и Гилдом. Цветовые свойства наблюдателей были стандартизованы для монохроматического излучения мощностью 1 Вт во всем видимом диапазоне длин волн. В результате были получены удельные координаты или удельные цветовые коэффициенты, которыми называются коэффициенты цветового уравнения (3.10), необходимые для получения ощущения цвета, соответствующего монохроматическому излучению мощностью в 1 Вт.

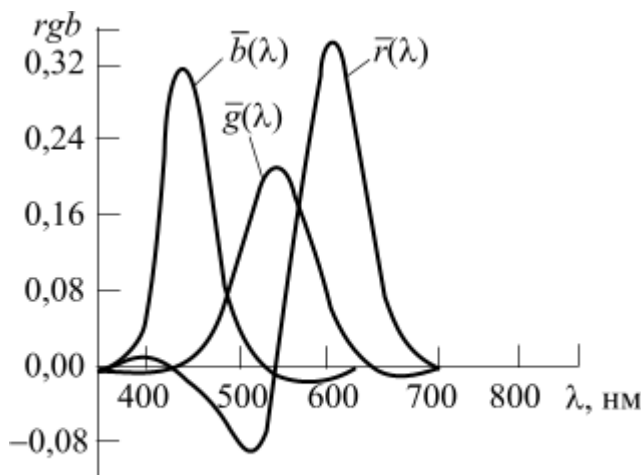


Рис. 3.4. Удельные координаты цвета в системе RGB

Графическая зависимость удельных координат длины волны, или кривые смещения, изображены на рис. 3.4. Они связывают воздействующее на глаз излучение данного спектрального состава с результатом этого воздействия – ощущением цвета, выраженным в цветовых координатах r' , g' , b' .

Для равноэнергетического белого цвета E и $P_E(\lambda) = \text{const}$ и $r'_E = g'_E = b'_E$, откуда

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{r}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{g}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{b}(\lambda) d\lambda,
 \tag{3.15}$$

а следовательно, площади под кривыми $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ равны.

Отрицательные участки ординат кривых смещения показывают, что в цветовом уравнении (3.10) величины r' , g' , b' для чистых спектральных цветов имеют отрицательные значения. Это подтверждает невозмож-

ность получения чистых спектральных цветов смешением основных реальных цветов RGB .

На рис. 3.5 представлен конус реальных цветов – цветовое тело, построенное на векторах основных цветов колориметрической системы RGB (см. цветную вклейку рис. 7). Плоскость Q пересекает координатные оси RGB в точках, соответствующих единичным количествам основных цветов, и, следовательно, является единичной плоскостью. Вектор равноэнергетического белого цвета E равноудален от векторов основных цветов, чем достигается равномерность заполнения цветового пространства.

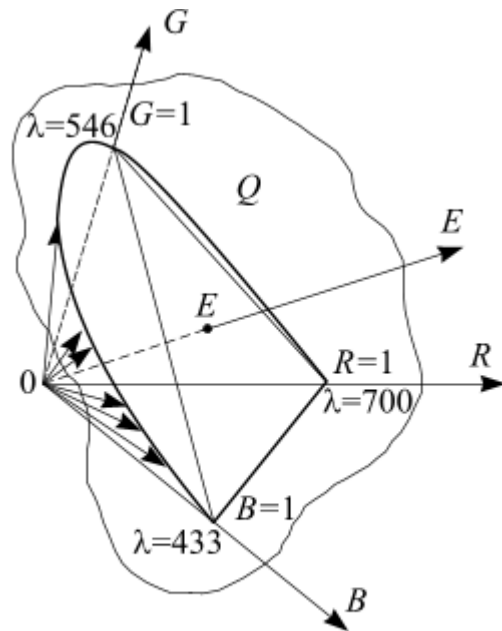


Рис. 3.5. Цветовое тело, построенное на векторах реальных цветов RGB

След пересечения плоскости Q с конической поверхностью цветового тела образует locus чистых спектральных цветов. Следы пересечения этой плоскости с координатными плоскостями образуют цветовой треугольник RGB . Любой точке в плоскости треугольника RGB соответствует вполне определенная цветность, координаты которой определяются путем деления модулей цвета r', g', b' на их сумму в соответствии с (3.5).

Для опорного равносигнального цвета E координаты цветности

$$r_E = g_E = b_E = 1/3.$$

Следовательно, точка белого цвета E является центром тяжести треугольника RGB и лежит на пересечении его медиан. Рассматривая положение цветового конуса в пространстве координат RGB , видим, что значительная часть цветового тела, содержащая векторы монохроматических зеленых, голубых, синих и фиолетовых цветов, выходит за пределы пирамиды $OBGR$, т. е. оказывается с внешней стороны плоскости GOB . Соответственно и след сечения цветового конуса плоскостью Q – спектральный locus – выходит за пределы цветового треугольника RGB . Следовательно, чистые спектральные цвета не могут быть получены смешением основных цветов RGB и входящие в цветовые уравнения модули r', g', b' для этих цветов могут иметь отрицательные значения. Кривые смешения (рис. 3.4) подтверждают это положение.

Колориметрическая система RGB удобна для проведения экспериментальных исследований, так как система ее основные цвета являются

реальными физически существующими цветами. Однако наличие в кривых смещения RGB (см. рис. 3.4) положительных и отрицательных ветвей значительно затрудняет их реализацию при создании цветоизмерительных приборов – колориметров. Вторым недостатком системы RGB является необходимость расчета всех трех компонентов цвета при определении его яркости:

$$L = 683 (L_R R + L_G G + L_B B),$$

где R, G, B – координаты цвета; L_R, L_G, L_B – яркостные коэффициенты основных цветов системы RGB . В связи с этим в 1931 г. МКО была принята более удобная колориметрическая нереальных цветов XYZ .

3.5. Цветовая система XYZ

В основу построения системы XYZ были положены следующие условия.

1. Удельные координаты – кривые смещения не должны иметь отрицательных ординат, т. е. все реальные цвета должны определяться положительными значениями модулей основных цветов выбранной координатной системы, и, следовательно, координаты цветности всех реальных цветов должны лежать внутри координатного треугольника основных цветов.

2. Количественная характеристика цвета – яркость – должна полностью определяться одним его компонентом.

3. Координаты белого цвета равноэнергетического излучения должны быть равными, т. е. точка цветности этого излучения должна лежать в центре тяжести треугольника основных цветов.

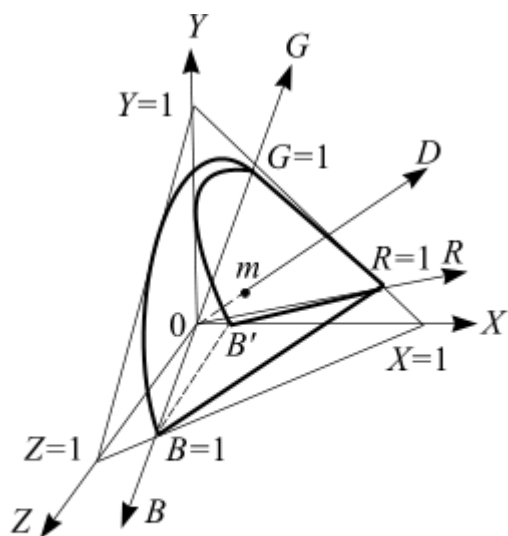


Рис. 3.6. Цветовое пространство XYZ и получение диаграммы цветности МКО

Для обеспечения первого требования в качестве основных цветов были выбраны три теоретических (реально не воспроизводимых) цвета XYZ . Координатная система XYZ выбрана так, чтобы векторы основных цветов находились в цветовом пространстве вне тела реальных цветов, т. е. тело реальных цветов находилось бы внутри координатной системы XYZ , которая может быть пояснена с помощью рис. 3.6. Оси X, Y, Z являются ортогональной декартовой системой координатных осей в цветовом пространстве, и координата Y

полностью определяется яркостью цвета, а два других основных цвета X и Z лежат в плоскости нулевой яркости. Вектор координаты Y перпендикулярен равноярким плоскостям, и в частности, плоскости нулевой яркости XOZ , что обеспечивает выполнение второго условия.

Любой цвет в системе XYZ описывается следующим выражением:

$$fF = x'X + y'Y + z'Z \quad (3.16)$$

и изображается в цветовом пространстве точкой с координатами x' , y' , z' или вектором, проведенным в эту точку из начала координат. Модули основных цветов x' , y' , z' определяются выражениями, аналогичными (3.14):

$$\begin{aligned} x' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda; \\ y' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda; \\ z' &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Графики удельных координат (кривые смещения) в системе XYZ показаны на рис. 3.7. Кривая $y(\lambda)$ тождественна кривой стандартной относительной видимости глаза $V(\lambda)$. Две другие кривые $\bar{x}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ получены в результате пересчета удельных координат $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ системы RGB в координатную систему XYZ . Подынтегральные площади всех трех кривых равны между собой, что обеспечивает выполнение третьего условия построения системы.

Цветовое пространство XYZ (рис. 3.6) рассечено единичной плоскостью, определяемой уравнением

$$X + Y + Z = 1$$

и отсекающей на осях координат отрезки, равные $X = 1$, $Y = 1$, $Z = 1$. Линии пересечения координатных плоскостей с единичной плоскостью образуют на последней равносторонний треугольник. Точка m пересечения вектора D с единичной плоскостью характеризует направление этого вектора, а следовательно, и цветность описываемого цвета. Координаты точки m определяются выражениями

$$x = x'/M; \quad y = y'/M; \quad z = z'/M,$$

где $M = x' + y' + z'$ – модуль цвета, а x , y , z – координаты цветности. Координаты цветности чистых спектральных цветов вычислены и стандар-

тизованы МКО. Значения x , y , z для монохроматических излучений изображены графически на рис. 3.8.

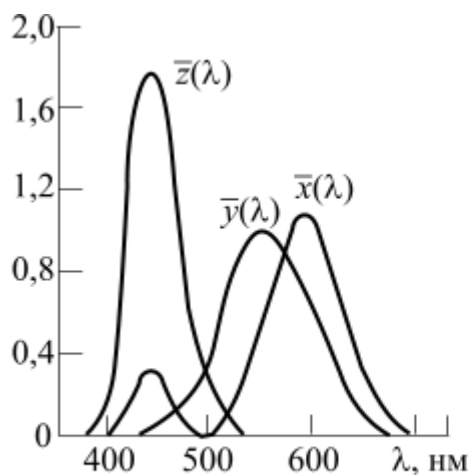


Рис. 3.7. Удельные координаты цвета в системе XYZ

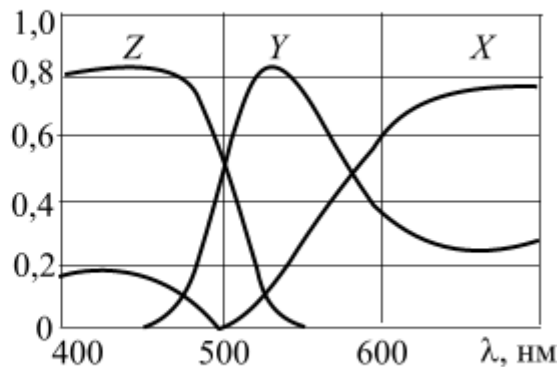


Рис. 3.8. Координаты цветности в системе XYZ

Геометрическое место координат цветности чистых спектральных цветов представляет собой кривую, лежащую на единичной плоскости и именуемую спектральным локусом (рис. 3.6). Прямолинейный участок, замыкающий эту кривую в точках B и R , представляет цветности пурпурных цветов. Изображение цветностей на единичной плоскости или ее проекции называется диаграммой цветности – цветовым графиком. Таким образом, в единичной плоскости можно получить диаграмму цветности, показанную на рис. 3.9, и представить на ней цветность любого цвета его координатами цветности.

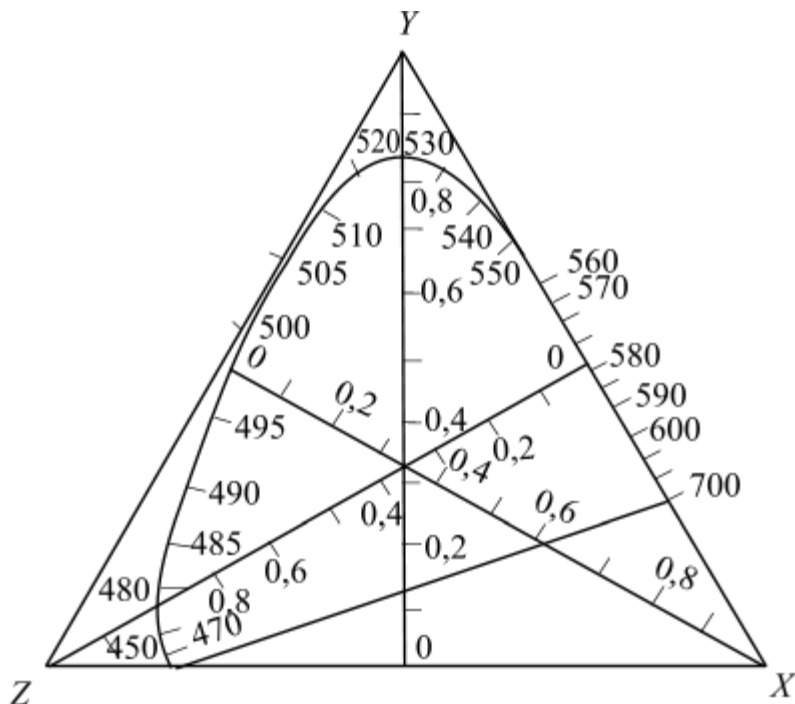


Рис. 3.9. Диаграммы цветности в единичной плоскости XYZ

Замкнутая коническая поверхность (рис. 3.6), образуемая векторами чистых спектральных и пурпурных цветов, включает в себе ту часть цветового пространства, где располагаются векторы всех реальных цветов, визуально воспринимаемых глазом. Все остальные векторы, расположенные за пределами этой конической поверхности, представляют формальные цвета, которые не могут быть визуально восприняты. Такими являются и сами первичные цвета XYZ МКО. Благодаря такому выбору первичных цветов цветовые компоненты всех реальных цветов в системе XYZ выражаются только положительными величинами. Соответственно на диаграмме цветности все точки, заключенные внутри спектрального локуса, представляют реальные цветности. Все точки вне спектрального локуса соответствуют формальным цветностям.

Так как одна из координат цветности является зависимой от двух других ($x + y + z = 1$), то для определения цветности достаточно двух координат, например x и y . Тогда, проектируя диаграмму цветности единичной плоскости на плоскость xu в направлении оси z (см. рис. 3.6 и цветную вклейку рис. 8), получим известную диаграмму цветности МКО (рис. 3.10). Анализируя цветовой график МКО, необходимо отметить следующее.

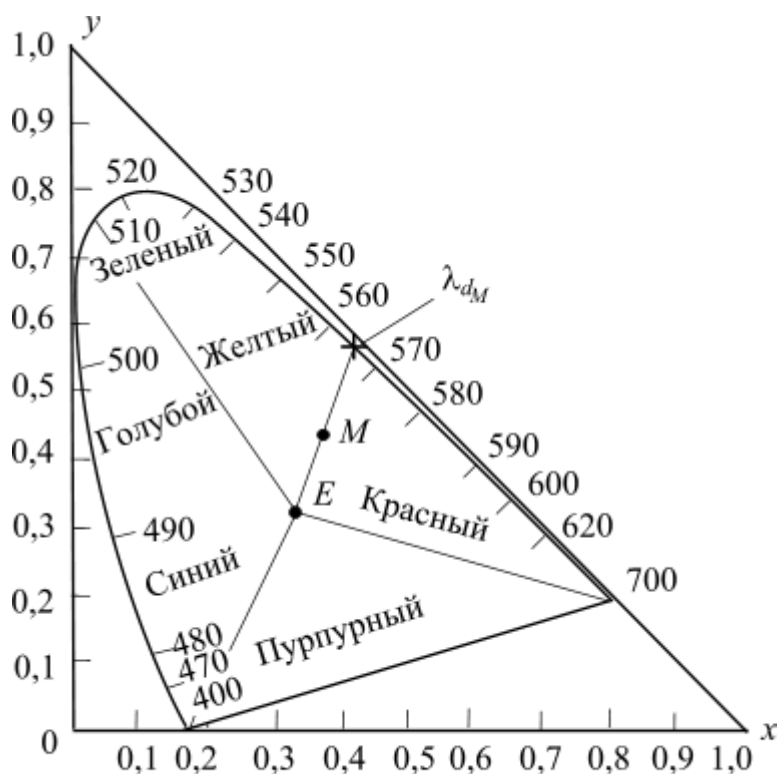


Рис. 3.10. Диаграмма цветности МКО

1. Координаты цветности всех реальных цветов находятся внутри спектрального локуса и определяются положительными значениями x и y .

2. Равноэнергетический белый цвет E находится в центре тяжести треугольника $хоу$. Его координаты цветности будут $x=1/3, y=1/3$.

3. Дополнительные цвета лежат на отрезке прямой, проходящей через точку E с кривой спектральных цветов.

4. Цветность смеси двух цветов отображается точкой, лежащей на прямой, соединяющей смешиваемые цвета.

5. Цветность смеси трех цветов отображается точкой внутри треугольника, вершины которого образованы смешиваемыми цветами.

Выше указывалось, что цветность сложного излучения помимо координат цветности может быть охарактеризована цветовым тоном и насыщенностью. Цветовой тон любого цвета на диаграмме цветности МКО определяется длиной волны монохроматического излучения (доминирующей длиной волны λ_d), соответствующей пересечению кривой спектральных цветов – спектрального локуса с прямой, проходящей через точку E и точку, отображающую цветность искомого цвета, например точку M . Насыщенность численно характеризуется чистотой цвета P , т. е. относительным содержанием в нем спектрального цвета (монохроматического светового потока F_λ).

$$P = \frac{F_\lambda}{F_\lambda + F_b} \cdot 100\% ,$$

где F_b – световой поток, вызывающий ощущение белого цвета. Насыщенность максимальна ($P = 100\%$) для чистых спектральных и пурпурных цветов и минимальна ($P = 0$) для белого цвета.

3.6. Равноконтрастная цветовая диаграмма

Для определения точности воспроизведения цвета на телевизионном экране необходимо выбрать правильную меру оценки разности сравниваемых цветов. Различие между цветами целесообразно оценивать в порогах цветоразличения, которые наблюдатель в состоянии заметить. Экспериментальные данные о чувствительности зрения к изменению цветности для разных точек цветового графика представлены на рис. 3.11 в виде эллипсов различной величины и ориентации, внутри которых глаз не ощущает разницы в цвете. Полуоси эллипсов пропорциональны порогам цветоразличения. Для большей наглядности эллипсы на рисунке изображены с десятикратным увеличением

Пороги в разных участках цветовой диаграммы XU резко различны, что затрудняет использование ее при оценке разницы цветов. Для устранения этого недостатка была разработана и рекомендована МКО равноконтрастная диаграмма цветности (рис. 3.12 и цветная вклейка рис. 9), полученная из диаграммы цветности XU го белого и оцениваемых цветов соответственно в системе $U^*V^*W^*$. Разность путем проекции ее на новую плоскость UV . Координаты цветности в новой системе цветов определяются из соотношения

$$U = \frac{2x}{6y - x + 1,5}, \quad V = \frac{3y}{6y - x + 1,5}.$$

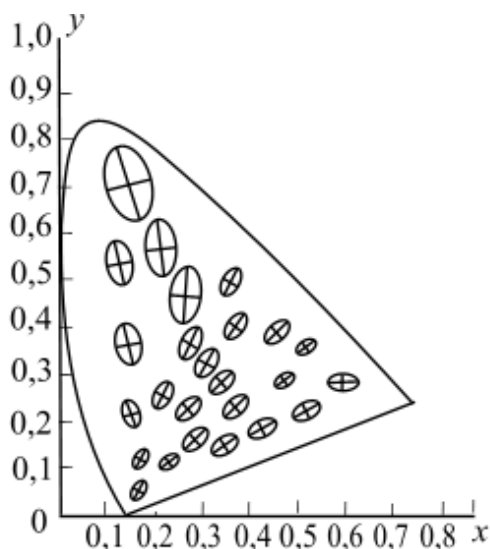


Рис. 3.11. Пороги различимости цветов на графике МКО

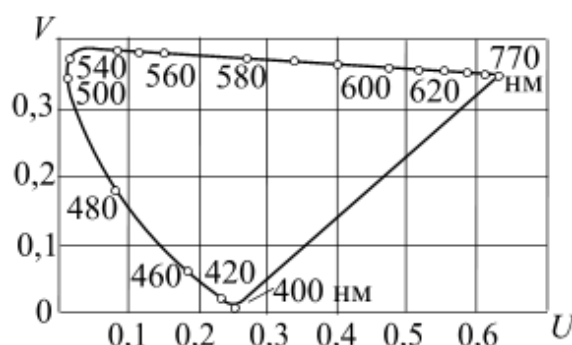


Рис. 3.12. Равноконтрастная диаграмма цветности U, V

В результате такого преобразования на равноконтрастном графике пороги цветоразличения представляют собой равные окружности, а величина порога составляет 0,0038 единиц UV .

В телевидении для оценки цветовых различий, обусловленных искажениями не только цветности, но и яркости, используют рекомендованное МКО в 1964 г. равноконтрастное цветовое пространство. Координатами пространства являются индексы яркости W^* и цветности U^* и V^* , определяемые из следующих соотношений:

$$W^* = 25(Y')^{1/3} - 17; \quad U^* = 13W^*(U - U_0); \quad V^* = 13W^*(V - V_0), \quad (3.18)$$

где Y' – относительная яркость исследуемого цвета к яркости белого в процентах; U_0, V_0 и U, V – координаты цветности опорного белого меж-

ду двумя цветами определяется в равноконтрастном цветовом пространстве МКО как расстояние между двумя точками:

$$\Delta E = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2}, \quad (3.19)$$

где ΔU^* , ΔV^* , ΔW^* – разности соответствующих координат сравниваемых цветов в системе U^* , V^* , W^* . Выражение для ΔE дает только разность между цветами в равномерном цветовом пространстве. Для количественной оценки качества цветопередачи введен индекс цветопередачи

$$R = 100 - 4,6\Delta E. \quad (3.20)$$

Для оценки качества цветопередачи по совокупности испытательных цветов используют общий индекс цветопередачи R_a

$$R_a = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i; \quad R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (100 - 4,6\Delta E_i) \quad (3.21)$$

где i – номер испытательного цвета из набора m цветов, ΔE_i – цветовое различие, определяемое по формуле (3.19). Экспериментально установлено, что расчетным значениям R_a соответствуют следующие оценки качества цветопередачи:

R_a	Оценка
80–100	«отлично»
65–80	«очень хорошо»
50–65	«хорошо»
30–50	«удовлетворительно»

3.7. Способы получения цветного телевизионного изображения

Для получения цветного телевизионного (ЦТ) изображения датчик ТВ сигнала (ЦТ камера, диапроектор, эпипроектор), кроме поэлементного анализа должен осуществлять спектральное разложение воздействующего излучения на три составные части аналогично тому, как это делает наш зрительный аппарат. На приемной стороне должно совершаться обратное действие – синтез ЦТ изображения из трех основных цветов. Анализ воздействующего излучения на три составляющие и синтез ЦТ изображения могут быть осуществлены одновременным либо последовательным способом.

Последовательный способ. Способность зрительного аппарата воспринимать чередующиеся во времени цвета как цвет смеси при достаточной скорости чередования позволяет разлагать натуральные цвета на основные и осуществлять синтез ЦТ изображения из трех основных

цветов последовательным способом, упрощенная структурная схема которого изображена на рис. 3.13.

Изображение передаваемого объекта при помощи объектива проецируется на фотокатод передающей телевизионной трубки последовательно в трех цветах – красном, зеленом и синем. Для разложения светового потока на три основных цвета используется вращающийся диск со светофильтрами, устанавливаемый между объективом и передающей трубкой. На приемном конце наблюдатель видит изображение на экране приемной трубки также через вращающиеся светофильтры. При этом оба диска должны вращаться с одинаковой скоростью (синхронно) и фильтры одного и того же цвета должны проходить перед обеими трубками одновременно (должна соблюдаться синфазность вращения дисков). Таким образом, наблюдатель видит последовательно телевизионное изображение в трех разных цветах. Благодаря инерции зрительного восприятия возникает впечатление слитного изображения в натуральных цветах.

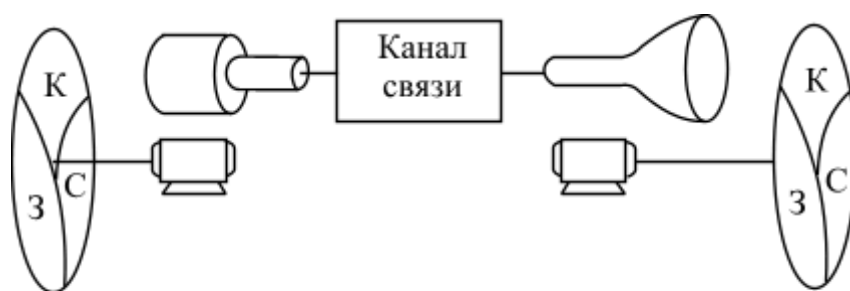


Рис. 3.13. Схема последовательного способа передачи и воспроизведения основных цветов

Для того чтобы мелькания не были заметны, необходимо, чтобы общее время передачи трех цветоделенных изображений, образующих в совокупности полное ЦТ изображение, не превышало времени передачи одного кадра в черно-белом телевидении. В связи с этим в такой системе число элементов изображения, передаваемых за один полный кадр, возрастает в 3 раза. Соответственно в 3 раза возрастает и полоса частот передаваемого видеосигнала.

Последовательному способу присущи недостатки: он не совместим с системой черно-белого телевидения, так как частоты кадровой и строчной разверток, а также спектр частот ТВ сигнала при таком способе передачи увеличены в 3 раза по сравнению с аналогичными параметрами черно-белой системы; при быстром перемещении объектов на изображении наблюдается цветная бахрома, так как следующие друг за другом изображения в трех основных цветах оказываются несовмещенными. Кроме этого, применение диска со светофильтрами ограничивает

размеры экрана кинескопа. По этим причинам последовательная система не могла быть использована в телевизионном вещании.

Основным достоинством последовательного способа является простота передающего и приемного оконечных устройств, в связи с чем он нашел применение в замкнутых телевизионных системах прикладного назначения.

Одновременный способ передачи цветов требует в общем случае трех передающих и трех приемных трубок. Разложение светового потока, воздействующего на ЦТ датчик излучения, на три составляющие может осуществляться непосредственно светофильтрами, установленными перед фотокатодами передающих трубок, либо с помощью специальной цветоделительной системы, содержащей дихроичные зеркала. Упрощенная структурная схема одновременного способа показана на рис. 3.14.

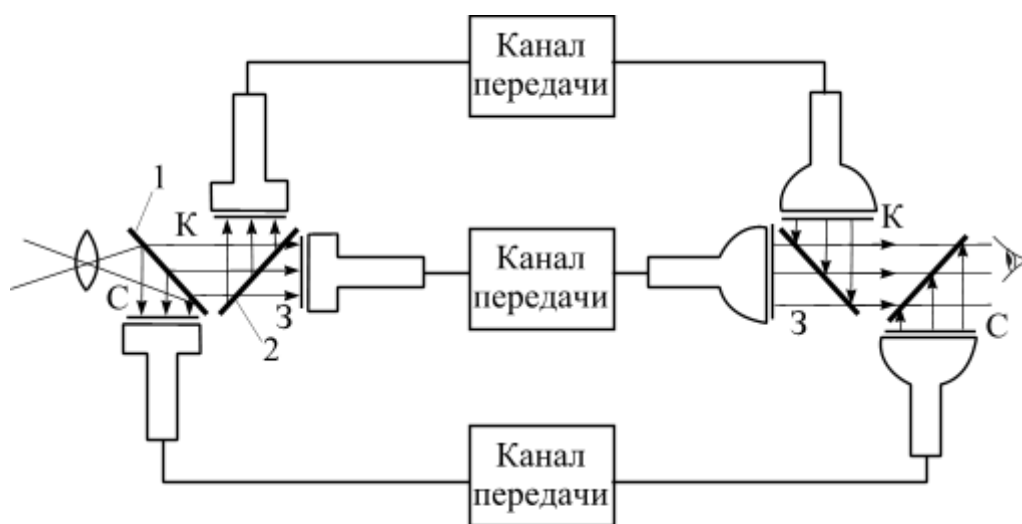


Рис. 3.14. Схема одновременного способа передачи и воспроизведения основных цветов:
1,2 - дихроичные зеркала

Воздействующий на ЦТ датчик световой поток разделяется на три с помощью двух дихроических зеркал, цветоизбирательные свойства которых таковы, что они отражают одну часть спектра и почти без потерь пропускают остальную часть. Так, дихроическое зеркало 1 отражает синюю составляющую светового потока к соответствующей трубке и пропускает остальную часть излучения. Дихроическое зеркало 2 отражает красную составляющую ко второй трубке и пропускает зеленую составляющую к третьей трубке. Полученные от трех трубок видеосигналы передаются к приемному устройству, где три цветоделенных изображения необходимо совместить в одно.

Одновременный способ передачи и воспроизведения основных цветов требует точного оптического и электрического совмещения трех

растров передающих, а также приемных трубок. Недостаточно точное выполнение этого требования может привести к потере четкости и появлению цветных окантовок.

3.8. Особенности восприятия цвета в телевидении

При выборе параметров отдельных звеньев телевизионной системы важно установить, к какому идеалу верности цветовоспроизведения следует стремиться. Качество телевизионного изображения, как и любой репродукции, определяется степенью соответствия этой репродукции оригиналу. Вопрос о точности воспроизведения изображения оригинала детально рассмотрен Н.Д. Ньюбергом, который предложил три критерия точности соответствий изображения оригиналу. Это физическая точность, при которой спектральные составы и мощности излучения оригинала и изображения одинаковы; физиологическая точность, при которой зрительные ощущения, вызываемые оригиналом и его репродукцией, одинаковы; психологическая точность, при которой изображение оценивается наблюдателем как высококачественное, хотя физиологическая точность не соблюдается.

При воспроизведении ЦТ изображения стремиться к выполнению физической точности нет необходимости, так как одинаковые ощущения цвета могут быть получены при воздействии различных спектральных составов. Требование физиологической точности изображения оригиналу не может быть в полной мере выполнено в телевизионной системе из-за ограничений, наложенных синтезирующим воспроизводящим устройством, которые обусловлены двумя основными причинами:

а) диапазон абсолютных значений яркостей $Y_{и}$, воспроизводимых синтезирующим устройством, не может быть столь велик, как диапазон абсолютных значений яркости $Y_{о}$ передаваемых объектов, т. е. телевизионное воспроизводящее устройство не может практически воспроизвести столь большие абсолютные значения яркости, какие имеют место на объекте;

б) телевизионное устройство не может воспроизвести цветности, находящиеся вне треугольника его первичных цветов.

При разработке вещательных систем цветного телевидения следует иметь в виду, что ЦТ изображение имеет меньшие размеры деталей, чем объект, заключено в ограничивающую рамку, которой нет в передаваемом объекте, яркость фона, окружающего изображение, обычно мала по сравнению с яркостью изображения. В этих условиях важную роль играют адаптация глаза и относительность наших зрительных оценок, что и позволяет не воспроизводить абсолютное значение яркостей отдельных элементов изображений, соответствующих оригиналу, и сохранить

лишь соотношение между яркостями отдельных элементов изображения и цветности.

Вышеизложенное позволило ввести в телевизионном вещании понятие колориметрической тождественности изображения оригиналу, которое означает выполнение следующих условий:

цветность каждого элемента изображения не должна отличаться от цветности элемента оригинала, т. е. $x_{и} = x_{о}$; $y_{и} = y_{о}$; $z_{и} = z_{о}$;

отношение яркостей соответствующих элементов изображения и оригинала должно быть величиной постоянной для всех цветностей, т. е. $Y_{и} = nY_{о}$, где $n = \text{const}$ при любой цветности.

Необходимо отметить, что требование колориметрически точного воспроизведения цветности выполнимо лишь в пределах треугольника первичных цветов воспроизводящего устройства. Цветности оригинала, лежащие вне треугольника, будут воспроизведены с искажениями насыщенности и цветового тона. Для качественной оценки допустимости цветовых искажений относительно оригинала пользуются критерием психологической точности цветного изображения. При этом учитывают, что восприятие цветности знакомых предметов (кожи лица и рук, волос, воды, листьев, травы, хорошо известных цветов, фруктов и овощей, мяса, различных белых поверхностей и др.) является более критичным, чем восприятие цветности малознакомых предметов [4]. Эти особенности широко используются при выборе параметров отдельных звеньев телевизионной системы.

Колориметрические требования справедливы для однородно окрашенных цветовых полей при восприятии их углом зрения 2° . При переходе к меньшим углам зрения цветовые свойства глаза существенно меняются. Так, при уменьшении угловых размеров предметов до $10\text{--}25'$ их цвета воспринимаются как цвета смеси оранжевого и голубого цветов. Полная потеря ощущения цветности происходит при углах зрения $6\text{--}10'$. Учитывая, что телевизионное изображение обычно воспринимается в пределах угла ясного зрения ($12\text{--}15^{\circ}$), детали, меньшие чем $4\text{--}6$ элементов, могут воспроизводиться в черно-белом виде. Учет этих особенностей, как будет показано ниже, позволяет уменьшить ширину полосы частот канала связи.

3.9. Условия правильной цветопередачи в телевидении

В подразд. 3.8 были сформулированы необходимые условия верности цветовоспроизведения, которым, учитывая особенности зрительного восприятия и телевизионного цветовоспроизведения, следует считать колориметрическую тождественность изображения оригиналу. Это означает, что цветность каждого элемента изображения не отличается от

цветности соответствующего элемента оригинала, а отношение яркостей соответствующих элементов изображения и оригинала является величиной постоянной для всех передаваемых цветностей, т. е.

$$x'_и = nx'_о, \quad y'_и = ny'_о; \quad z'_и = nz'_о,$$

где n – коэффициент пропорциональности.

Очевидно, что выполнение этих условий определяется всеми звеньями телевизионного тракта от света до света, структурная схема которого изображена на рис. 3.15. Телевизионный тракт включает в себя передающую камеру, преобразующую воздействующий световой поток $F_о$ в сигналы основных цветов E_R, E_G, E_B , канал передачи этих трех сигналов и три кинескопа, преобразующие усиленные сигналы основных цветов в соответствующие световые потоки $F_{Rи}, F_{Gи}, F_{Bи}$, которые с помощью оптической системы совмещаются в одно многоцветное изображение.

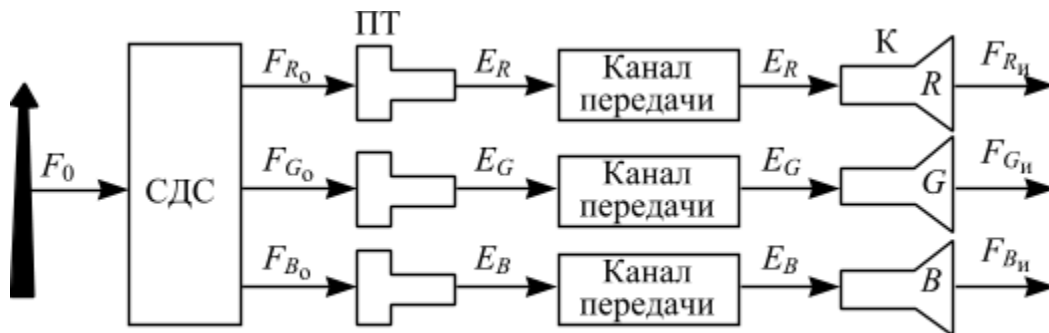


Рис. 3.15. Структурная схема ЦТ тракта от света до света

Передающая камера содержит светоделительную систему (СДС), которая разделяет световой поток $F_о$, отраженный от передаваемой сцены, на три составляющие: красную $F_{R_о}$, зеленую $F_{G_о}$, синюю $F_{B_о}$, образуя на фоточувствительной поверхности передающих трубок ЦТ три оптических изображения в основных цветах. Таким образом, телевизионная камера или любой другой датчик цветных телевизионных сигналов (кинопроектор, диапроектор, эпипроектор), помимо анализа изображения на отдельные элементы, осуществляет еще и трехкомпонентный анализ элементарных излучений, отображая каждый элемент передаваемой сцены электрическими сигналами E_R, E_G, E_B . Совокупность последних должна содержать качественную и количественную характеристики каждого элементарного лучистого потока.

Для того чтобы электрические сигналы на выходе ТВ камеры несли верную информацию о цветах (т. е. о яркостях и цветностях) воздействующих на нее излучений, необходимо обеспечить прямую пропорциональность между величинами этих сигналов и координатами цвета этих излучений, в выбранной колориметрической системе. Тогда в системе RGB величины сигналов основных цветов будут равны:

$$E_R = K_1 r'; \quad E_G = K_2 g'; \quad E_B = K_3 b',$$

где r' , g' , b' – модули основных цветов, а K_1 , K_2 , K_3 постоянные коэффициенты.

Учитывая (3.14), можем записать:

$$E_R = K_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda; \quad E_G = K_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda; \quad E_B = K_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda,$$

где $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ – удельные координаты (кривые смещения), связывающие воздействующее на глаз излучение $P(\lambda)$ с результатом этого воздействия ощущением цвета.

Отсюда следует, что телевизионная камера будет колориметрической, если характеристики ее спектральной чувствительности $S'(\lambda)_R$, $S'(\lambda)_G$, $S'(\lambda)_B$ будут тождественны по форме удельным координатам $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ в выбранной системе основных цветов. Следовательно, телевизионная камера, а также любой другой датчик цветных телевизионных сигналов должны обладать свойствами объективного колориметра (измерителя цвета), но усложненного телевизионной разверткой.

Датчик цветных телевизионных сигналов может осуществлять цветовой анализ передаваемого объекта в любой колориметрической системе RGB , XYZ , UVW и т. д., поскольку все колориметрические системы связаны линейной зависимостью с характеристиками спектральной чувствительности глаза. При этом характеристики спектральной чувствительности датчика должны быть тождественны по форме кривым удельных координат (кривым смещения) соответствующей колориметрической системы.

Очевидно, для целей телевизионного вещания, если тракт передачи цветоделенных сигналов от камеры к приемному устройству не изменяет соотношение этих сигналов, удобно разлагать воздействующее на камеру излучение на такие же первичные цвета, из каких приемное устройство синтезирует воспроизводимое цветное изображение.

Основные цвета воспроизводящего приемного устройства полностью определяются спектральными характеристиками излучений его люминофоров. Для воспроизведения наибольшего многообразия цветов необходимо, чтобы на диаграмме цветности МКО треугольник с вершинами, соответствующими основным цветам кинескопа, охватывал наибольшую возможную площадь этой диаграммы. Однако чем ближе вершины треугольника будут лежать к локусу спектральных цветов, тем меньшую яркость будут давать основные цвета из-за малой полосы спектра излучения.

Сказанное иллюстрирует рис. 3.16, где внутри спектрального локуса диаграммы цветности XY изображены два треугольника основных цветов приемника $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$, Европейского стандарта ЕС (сплошная линия) и Американского стандарта NTSC (штриховая линия), построенных по значениями координат цветности излучений трех люминофоров, приведенных в табл. 3.2 для двух стандартов. Как видим, треугольник NTSC охватывает большую гамму цветов за счет смещения координаты G в сторону увеличения насыщенности зеленого цвета. Однако светоотдача зеленого люминофора NTSC оказывается в 3–3,5 раза ниже, чем в стандарте ЕС, что затрудняет достижение высокой яркости свечения кинескопа, поэтому в качестве Европейского стандарта принят треугольник цветов ЕС, являющийся разумным компромиссом между указанными двумя условиями.

На рис. 3.17 приведены спектральные характеристики излучения трех люминофоров красного К-77, зеленого К-74 и синего К-75 свечения.

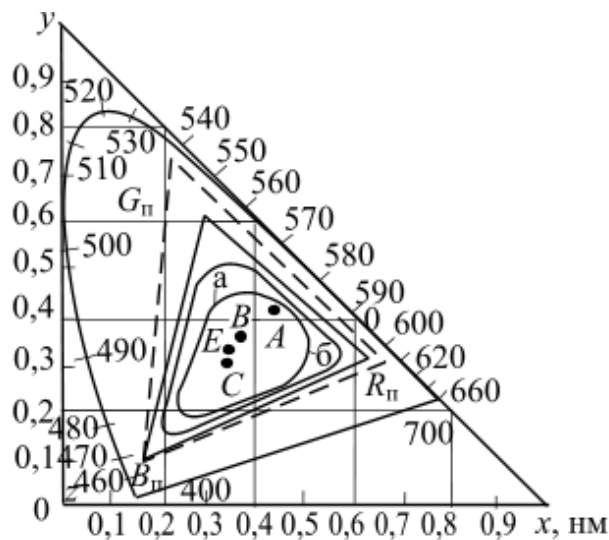


Рис. 3.16. Треугольник основных цветов приемника $R_{\text{п}}$, $G_{\text{п}}$, $B_{\text{п}}$:
а – гуашь; б – акварель

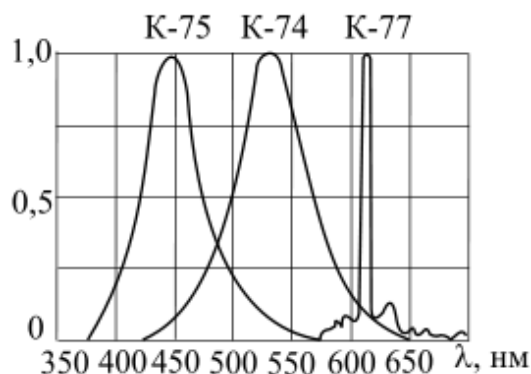


Рис. 3.17. Спектральные кривые люминофоров К-75, К-74, К-77

На графике МКО (рис.3.16) показана область цветов, воспроизводимая в цветной полиграфической печати. Сравнение показывает, что телевизионная система может воспроизвести большую гамму цветов, чем цветная печать. Тем не менее, и в телевидении часть реальных цветов, лежащая вне треугольника, будет воспроизведена с пониженной насыщенностью и искаженным цветовым тоном внутри треугольника основных цветов приемника. Это касается главным образом оттенков зеленых и голубых цветов. Однако это обстоятельство не играет большой роли в цветовоспроизведении, так как порог цветоразличимости в данной области цветов для нашего глаза имеет наибольшее значение

(рис. 3.11), т. е. большему перемещению по цветовому графику соответствует небольшое изменение в ощущении цвета.

Таблица 3.2

Треугольник основных цветов приемника	Координаты цветности основных цветов					
	R_{Π}		G_{Π}		B_{Π}	
	x	y	x	y	x	y
NTSC	0,670	0,330	0,210	0,710	0,140	0,080
EC	0,640	0,330	0,290	0,600	0,150	0,060

Если первичные цвета, на которые телевизионный датчик разлагает воздействующее на него излучение, соответствуют основным цветам приемника R_{Π} , G_{Π} , B_{Π} , то характеристики спектральной чувствительности этого датчика будут представлять собой кривые удельных координат \bar{r}_{Π} , \bar{g}_{Π} , \bar{b}_{Π} в системе основных цветов R_{Π} , G_{Π} , B_{Π} . Результат количественного расчета их для треугольника основных цветов приемника стандартов NTSC и EC (табл.3.2) приводит к выражениям (3.22) и (3.23) соответственно:

$$\begin{aligned} \bar{r}_{\Pi} &= 1,910\bar{x} - 0,532\bar{y} - 0,228\bar{z}; \\ \bar{g}_{\Pi} &= -0,985\bar{x} + 1,999\bar{y} - 0,028\bar{z}; \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \bar{b}_{\Pi} &= 0,058\bar{x} - 0,118\bar{y} + 0,898\bar{z}; \\ \bar{r}_{\Pi} &= 7,263\bar{x} - 3,304\bar{y} - 1,128\bar{z}; \\ \bar{g}_{\Pi} &= -1,310\bar{x} + 2,536\bar{y} + 0,056\bar{z}; \\ \bar{b}_{\Pi} &= 0,091\bar{x} - 0,307\bar{y} + 0,1435\bar{z}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

где \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} – удельные координаты, приведенные в табл. 3.2. Числовые коэффициенты уравнения (3.23) для удобства умножены на 100.

Полученные в результате расчета (3.22) и (3.23) кривые сложения – спектральные характеристики камеры для треугольника основных цветов стандартов NTSC и EC изображены на рис. 3.18 и 3.19.

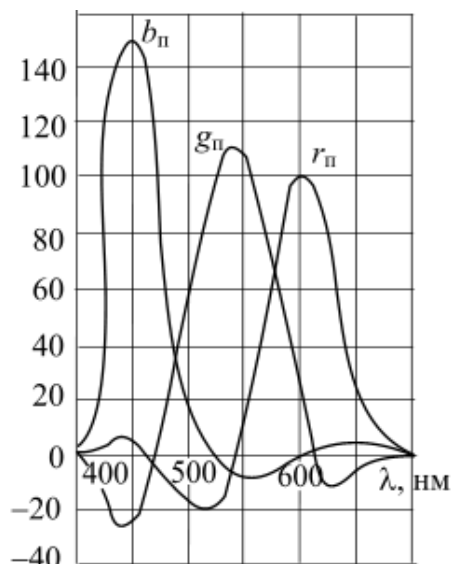


Рис. 3.18. Спектральные характеристики камеры при треугольнике основных цветов приемника типа NTSC и опорном белом C

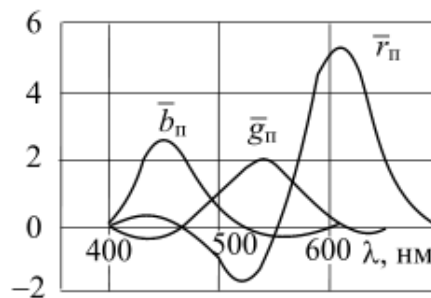


Рис. 3.19. Спектральные характеристики камеры при треугольнике основных цветов приемника типа EC и опорном белом $D6500$

3.10. Матричная цветокоррекция

Вследствие реальности первичных цветов R_{π} , G_{π} , B_{π} полученные кривые сложения имеют участки отрицательных значений ординат. Практическая реализация датчика с кривыми сложения, имеющими побочные положительные и отрицательные ветви, предполагает наличие для каждой ветви отдельного фотоэлектрического преобразователя и поэтому является чрезвычайно сложной задачей. Из-за невозможности реализации побочных отрицательных и положительных ветвей разработчики ранних ЦТ систем в качестве спектральных характеристик камеры использовали лишь основные положительные ветви кривых сложения. Анализ искажений цветовоспроизведения из-за отсутствия побочных ветвей кривых сложения показывает, что скорректировать эти искажения полностью для всех возможных цветностей невозможно.

С точки зрения практической реализации в качестве кривых спектральной чувствительности датчика удобно использовать кривые сложения, которые применяются в объективной колориметрии (рис. 3.20). Две из этих кривых $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ аналогичны удельным компонентам МКО, а третья $x_n(\lambda)$ является линейной комбинацией всех трех кривых сложения МКО, имеющей (практически) только положительные ординаты и только один максимум. Поскольку первичные цвета X_n , Y , Z формальные и не совпадают с реальными основными цветами R_{π} , G_{π} , B_{π} приемника, сигналы на выходе камеры будут не такие, какие требуются на входе приемного устройства, поэтому в телевизионный тракт следует включить матричное устройство, осуществляющее преобразование сигналов

из координат системы X_H, Y, Z в систему $R_{\Pi}, G_{\Pi}, B_{\Pi}$, теория которого подробно изложена в [4].

Зависимость выходных сигналов $E_{R_{\Pi}}, E_{G_{\Pi}}, E_{B_{\Pi}}$ от вводимых на матрицу сигналов E_{X_H}, E_Y, E_Z описывается в общем виде уравнениями

$$\begin{aligned} E_{R_{\Pi}} &= a_{11}E_{X_H} + a_{12}E_Y + a_{13}E_Z; \\ E_{G_{\Pi}} &= a_{21}E_{X_H} + a_{22}E_Y + a_{23}E_Z; \\ E_{B_{\Pi}} &= a_{31}E_{X_H} + a_{32}E_Y + a_{33}E_Z, \end{aligned} \quad (3.24)$$

где $a_{11}-a_{33}$ – коэффициенты матрицы, которые могут быть рассчитаны в соответствии с теорией преобразования координатных систем.

Действие матричного устройства эквивалентно изменению формы характеристик спектральной чувствительности телевизионного датчика. Таким образом, принимая форму кривых спектральной чувствительности датчика, удобную для практической реализации (рис. 3.20), и включая в тракт передачи матричные пересчетные устройства, получаем на выходе этого устройства сигналы $E_{R_{\Pi}}, E_{G_{\Pi}}, E_{B_{\Pi}}$, пропорциональные кривым смещения основных цветов приемника, и, как следствие, неискаженную цветопередачу всех цветностей в пределах треугольника основных цветов приемника.

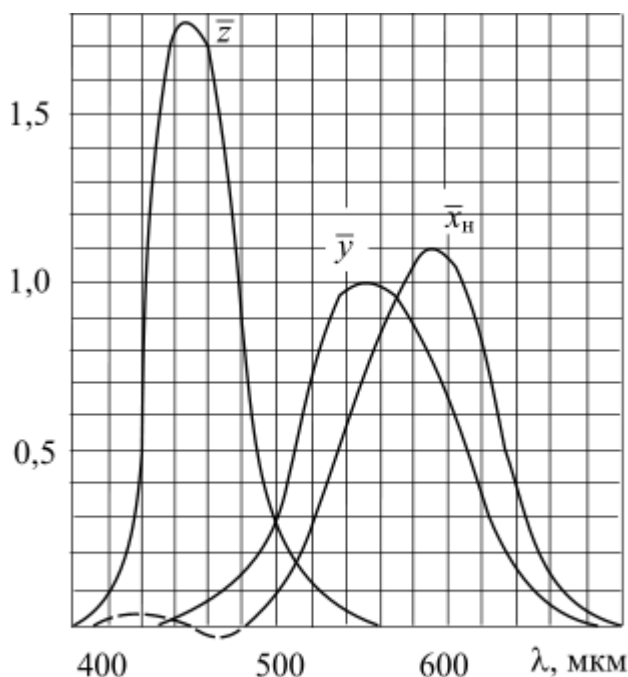


Рис. 3.20. Кривые сложения, применяемые в объективной колориметрии

Кривые сложения, успешно используемые в объективной колориметрии, все же оказываются мало пригодными в качестве спектральных характеристик ЦТ камер, так как в целях уменьшения потерь света и достижения максимальной чувствительности цветоделение в них осуществляется с помощью дихроических зеркал. Причем наибольшая эффективность достигается, когда спектральные кривые двух цветных каналов пересекаются на уровне 50 %.

Спектральные кривые X_H, Y (рис. 3.20) не отвечают этому условию, так как пересекаются на значительно большем уровне (около 0,9) и реализовать их без

больших световых потерь, существенно ухудшающих чувствительность ЦТ камеры, невозможно, поэтому в качестве кривых спектральной чувствительности камер используются кривые, не связанные линейной зависимостью с кривыми спектральной чувствительности глаза, а именно несколько расширенные основные положительные ветви кривых смешения первичных цветов приемника R_{Π} , G_{Π} , B_{Π} . Выбор конкретной формы этих кривых – рис. 3.21 (сплошная линия) определяется следующими соображениями. Известно, что глаз не различает цвет мелких деталей, поэтому полоса частот каналов передачи сигналов E_R и E_B может быть сокращена до 2–3 МГц, что уменьшает уровень шума в этих каналах, а также позволяет снизить требование к точности совмещения трех растров. Для получения полной информации о неокрашенных мелких деталях должен быть сформирован сигнал яркости E_Y , передаваемый в полной полосе. С этих позиций положительную ветвь кривой G_{Π} желательно расширить до кривой стандартной относительной видимости глаза Y , что увеличивает чувствительность камеры, но ухудшает качество цветопередачи. По этой причине кривые спектральной чувствительности камеры RWB выбраны из условий компромисса между допустимым ухудшением качества цветопередачи и максимальным увеличением чувствительности камеры. Ошибки цветопередачи, вызванные отклонением кривых спектральной чувствительности камеры RWB от кривых смешения основных цветов приемника R_{Π} , G_{Π} , B_{Π} , корректируются с помощью электронной матрицы цветокорректора.

Принцип работы цветокорректора основан на том, что побочные отрицательные и положительные ветви кривых сложения первичных цветов приемника (рис. 3.19) расположены под основными ветвями и подобны им по форме. Это позволяет, вычитая из каждого сигнала основных цветов два других в определенных пропорциях, имитировать отсутствие побочных ветвей и таким образом улучшать качество цветопередачи.

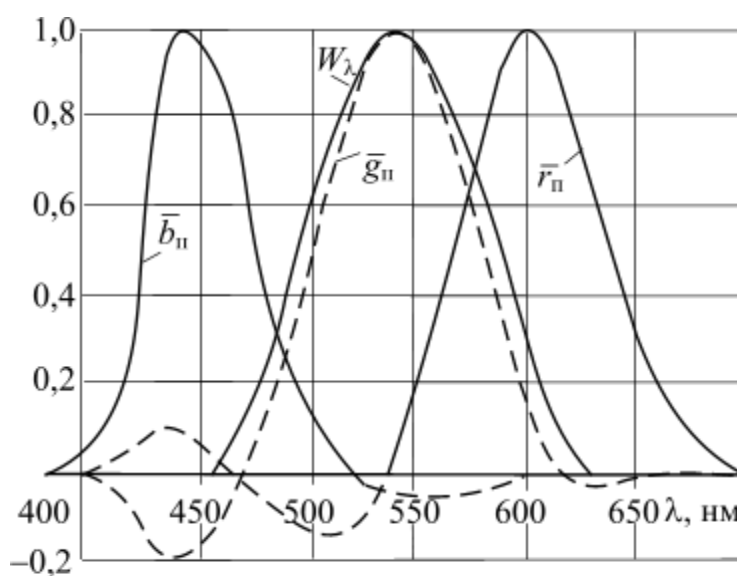


Рис. 3.21. Спектральные характеристики чувствительности RWB камеры:
 — кривые RWB ; - - - кривые R_{Π} , G_{Π} , B_{Π}

Математически операция цветокоррекции аналогична матричному преобразованию (3.24) и потому называется матричной цветокоррекцией. Отличие заключается в определении коэффициентов матрицы (3.24), рассчитываемых с помощью ЭВМ путем поиска оптимальных коэффициентов, при которых ошибки цветоанализа для совокупности испытательных цветов оказываются минимальны. В качестве испытательных цветов используются эталонные цвета, рекомендованные МКО. Применение цветокоррекции позволяет снизить среднюю ошибку цветоанализа для совокупности цветов до нескольких цветовых порогов, но для отдельных цветов они могут оказаться значительными, что снижает эффективность цветокоррекции.

Существенную роль при определении параметров воспроизводящего устройства играет выбор равносигнального цвета, т. е. цвета, воспроизводимого на экране кинескопа при подаче на его управляющие электроды одинаковых по амплитуде сигналов. В качестве эталонного равносигнального цвета стандартизован белый цвет, представляющий определенные удобства при настройке отдельных звеньев телевизионного тракта, а также, как будет показано ниже, позволяющий уменьшить заметность цветовой поднесущей на экране черно-белого телевизора при передаче неокрашенных или малоокрашенных объектов.

В рассмотренных ранее колориметрических системах в качестве эталонного белого цвета использовался равноэнергетический белый цвет E , удобный для цветовых расчетов, так как белый цвет E имеет равномерную плотность распределения энергии по спектру. Передача сцен натуральных объектов происходит или при естественном освещении, или при освещении искусственными стандартными источниками света A , B , C с разной цветовой температурой (табл. 3.3), разным спектральным распределением мощности излучения (рис. 3.22).

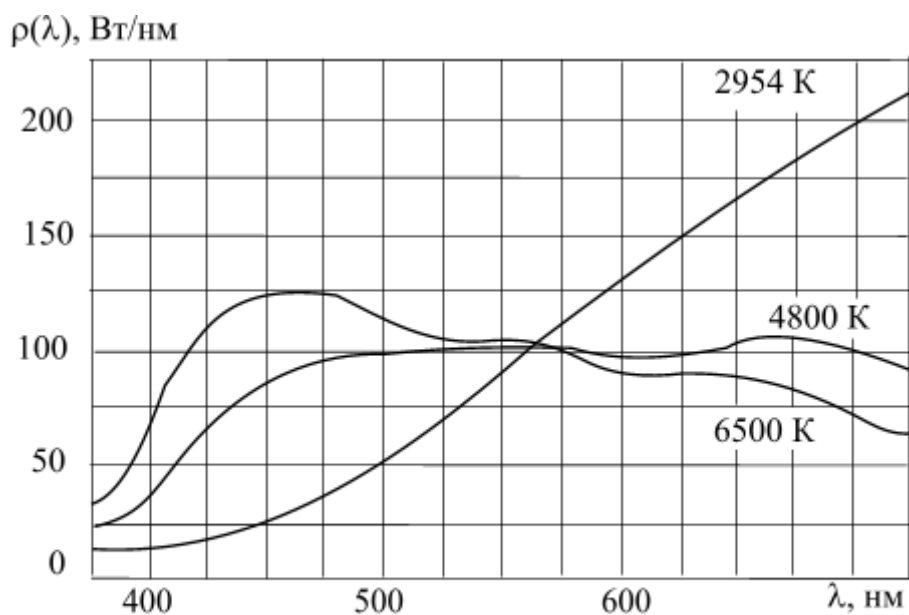


Рис. 3.22. Спектральное распределение мощности в излучении нормированных источников *A, B, C*

Зритель наблюдает изображение этой природы на экране телевизионного приемника, где кажущаяся цветность белого зависит от цветовой адаптации глаза к окружающему освещению и, конечно, от индивидуальных особенностей зрителя. В связи с этим был выполнен ряд работ по определению цвета свечения телевизионного экрана, который зритель расценивает как белый. В результате за эталонный источник света (опорный белый) в США принят источник *C*, а в Европе – источник *D6500*. По координатам цветности они близки друг к другу (табл. 3.3). Цвет оригинала будет воспроизведен кинескопом без искажений, если тип источника освещения объекта (опорный равносигнальный цвет камеры) соответствует опорному равносигнальному цвету приемного устройства. В противном случае все детали телевизионной репродукции приобретут дополнительную окраску. Согласование источника освещения объекта и опорного белого приемника может быть осуществлено оптически с помощью приводных светофильтров или электронным методом, учитывая разницу в опорном белом камеры и приемника при расчете коэффициентов матрицы (3.24).

Таблица 3.3

Источник освещения	Цветовая температура	Характеристика излучения	Координаты цветности на цветовом графике XY	
			X	Y
<i>A</i>	2854	Вольфрамовая лампа накаливания	0,448	0,407

<i>B</i>	4800	Желтые фазы дневного света (облачный день)	0,348	0,352
<i>C</i>	6500	Голубоватые фазы дневного света (солнечный день при голубом небе)	0,310	0,316
<i>D6500</i>	6500	Европейский эталонный источник для ЦТ (свечение люминофоров телевизора)	0,313	0,329

Условия правильной цветопередачи рассматривались в предположении линейности характеристик преобразования всех звеньев телевизионного тракта от света до света. Отдельные звенья реальной телевизионной системы могут иметь нелинейные характеристики. В большой степени это относится к воспроизводящему устройству – цветному кинескопу, модуляционная характеристика которого имеет коэффициент нелинейности $\gamma = 2,8 \dots 3,5$. Наличие нелинейности в ЦТ приводит не только к градационным искажениям, но и к искажениям цветности, в основном в сторону увеличения насыщенности при $\gamma > 1$ и уменьшения насыщенности при $\gamma < 1$. В связи с этим сигналы основных цветов $E_{R_{Ц}}$, $E_{G_{Ц}}$, $E_{B_{Ц}}$, кроме матричного преобразования должны быть подвергнуты нелинейной гамма-коррекции. Результирующее значение γ с учетом включенного в тракт передачи гамма-корректора рекомендуется принимать несколько больше единицы ($\gamma = 1,2 \dots 1,3$). Это приводит к небольшому увеличению насыщенности цвета по сравнению с оригиналом, но повышает психологическую точность цветопередачи, частично компенсируя снижение абсолютного значения яркости и контраста на телевизионном экране.

3.11. Светоделительная система передающей камеры

Светоделительная система передающей камеры обеспечивает разделение светового потока, отраженного от передаваемого объекта, на три цветовые составляющие в соответствии с выбранными основными цветами передачи. Спектральные характеристики светоделительной системы выбираются с учетом требуемых спектральных характеристик чувствительности камеры и спектральных характеристик преобразователей свет-сигнал.

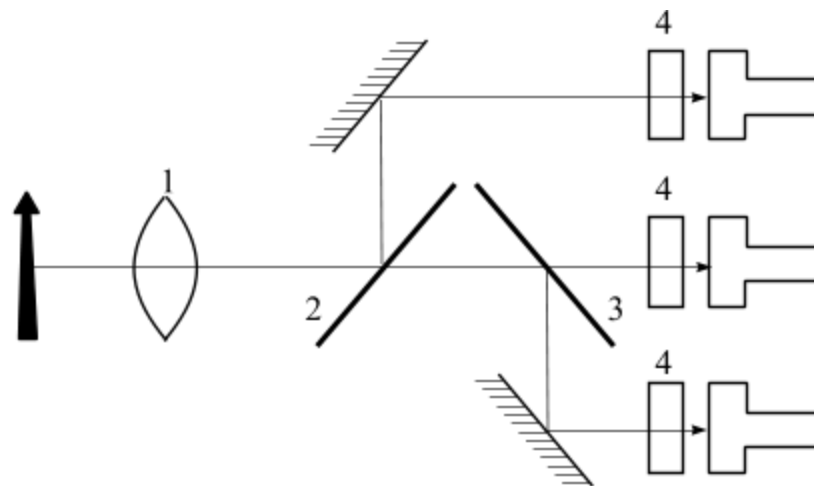


Рис. 3.23. Схема цветоделения в ЦТ камере:

1 – объектив; 2,3 – дихроические зеркала; 4 – корректирующие светофильтры

Упрощенная светоделительная система камеры изображена на рис. 3.23. Отраженный от передаваемого объекта световой поток, пройдя объектив 1, разделяется на три с помощью двух интерференционных дихроических зеркал, обладающих высоким коэффициентом отражения в определенном участке спектра и пропускающих почти без потерь остальную его часть. Так, зеркало 2 отражает красную составляющую светового потока к соответствующему преобразователю свет-сигнал (передающей трубке или матрице ПЗС) и пропускает остальную часть спектра излучений. Зеркало 3 отражает синюю составляющую ко второму преобразователю и пропускает оставшуюся зеленую часть к третьему. Способ разделения светового потока на три с помощью дихроических зеркал весьма эффективен, так как коэффициент отражения (или пропускания) многослойных интерференционных покрытий близок к 100 %, что наглядно иллюстрирует рис. 3.24, на котором приводятся спектральные характеристики отражения красного и синего дихроических зеркал.

Спектральные характеристики отражения зеркала зависят от угла падения лучей на его поверхность, поэтому для неискаженной цветопередачи оптическая схема ЦТ камеры должна обеспечить в пространстве цветоделения одинаковые углы падения лучей на дихроические зеркала от всех точек передаваемого объекта. Искажения цветопередачи возникают также вследствие частичной поляризации света, попадающего в светоделительную систему, так как спектральные характеристики дихроических зеркал изменяются в зависимости от степени поляризации света. Поляризация минимальна при малых углах падения лучей на светоделительную поверхность, что и стремятся обеспечить при конструировании светоделительных систем датчика ЦТ сигналов. Обычно при

конструировании оптической и светоделительной системы камеры отражающие покрытия расположены так, чтобы угол падения осевого луча не превышал 20° , а разница между углами падения для крайних точек не превышала $4-6^\circ$.

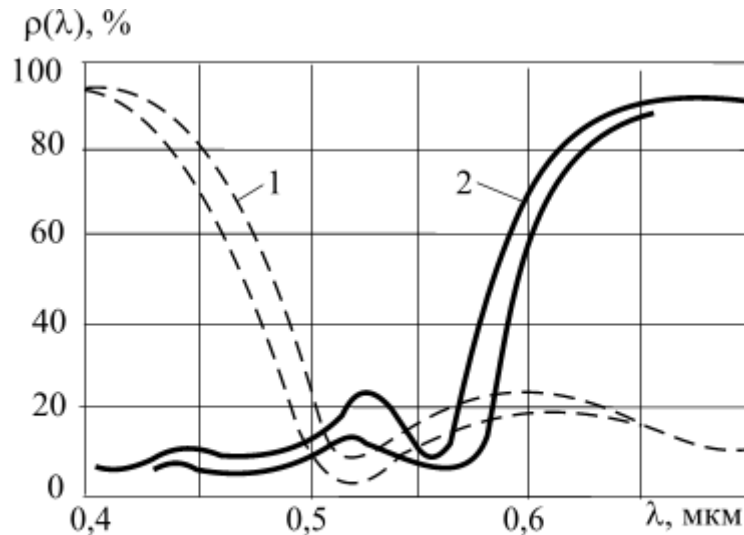


Рис. 3.24. Спектральные характеристики отражения красного и синего дихроического зеркал

Требуемые спектральные характеристики ЦТ камеры не могут быть получены применением в схеме светоделения одних дихроических зеркал, так как с помощью последних, как это видно из рис. 3.24, формируется только одна из ветвей спектральных характеристик каналов R и B . Заданные характеристики светоделения достигаются установкой перед фоточувствительной поверхностью передающих трубок специальных корригирующих светофильтров 4, окончательно формирующих спектральные характеристики ЦТ камер. Таким образом, характеристика спектральной чувствительности телевизионной камеры является произведением спектральных характеристик элементов его светоделительной системы и спектральных характеристик передающих трубок. Для схемы светоделения, изображенной на рис. 3.23, выражения для спектральных характеристик трех цветовых каналов ЦТ камеры имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{R\lambda} &= \rho_{R\lambda} \tau_{\phi R\lambda} \varepsilon_{\lambda}; & \bar{\varepsilon}_{G\lambda} &= (1 - \rho_{R\lambda})(1 - \rho_{B\lambda}) \tau_{\phi G\lambda} \varepsilon_{\lambda}; \\ \bar{\varepsilon}_{B\lambda} &= (1 - \rho_{R\lambda}) \rho_{B\lambda} \tau_{\phi B\lambda} \varepsilon_{\lambda}, \end{aligned} \quad (3.25)$$

где $\bar{\varepsilon}_{R\lambda}$, $\bar{\varepsilon}_{G\lambda}$, $\bar{\varepsilon}_{B\lambda}$ — спектральная чувствительность трех цветовых каналов; $\rho_{R\lambda}$, $\rho_{B\lambda}$ — спектральные коэффициенты отражения светоделительных зеркал; $\tau_{\phi R\lambda}$, $\tau_{\phi G\lambda}$, $\tau_{\phi B\lambda}$ — спектральные коэффициенты пропускания корригирующих светофильтров; ε_{λ} — спектральная чувствительность

преобразователя свет-сигнал, которая в общем случае может быть разной для разных цветовых каналов. Выражения (3.25) позволяют рассчитать требуемую форму спектральных характеристик пропускания корректирующих светофильтров:

$$\tau_{\phi R\lambda} = \frac{\bar{\varepsilon}_{R\lambda}}{\rho_{R\lambda} \varepsilon_{\lambda}}; \tau_{\phi G\lambda} = \frac{\bar{\varepsilon}_{G\lambda}}{(1 - \rho_{R\lambda})(1 - \rho_{B\lambda}) \varepsilon_{\lambda}}; \tau_{\phi B\lambda} = \frac{\bar{\varepsilon}_{B\lambda}}{(1 - \rho_{R\lambda}) \rho_{B\lambda} \varepsilon_{\lambda}}. (3.26)$$

Телевизионная камера должна обеспечивать получение равных сигналов при передаче эталонной белой поверхности, освещенной источником света, имеющим определенную цветовую температуру, обычно 6500 К (источник типа *D6500*). Если передаваемый объект освещен искусственным источником света, отличным от выбранного опорного белого, то в состав светоделительной системы следует включить приводной светофильтр, спектральная характеристика пропускания которого определяется следующим образом: $\tau_{\phi\pi} = P_{\alpha\lambda}/P_{и\lambda}$, где $P_{и\lambda}$ и $P_{\alpha\lambda}$ – спектральное распределение мощности излучения источника освещения и источника типа *D6500* соответственно. Несоответствие источников освещения может быть скорректировано также электронным путем, если изменить при смене источника освещения объекта значения коэффициентов матрицы (3.24).

Светоделительная система камеры, включающая в себя светоделительные зеркала, приводные и нейтральные светофильтры, вспомогательные отраженные поверхности и т. д., располагается в пределах заднего рабочего отрезка объектива. Поэтому длина хода светового луча, проходящего через перечисленные узлы, не должна оказаться больше этого отрезка. Кроме этого для уменьшения цветовых искажений желательно обеспечить параллельность пучков света, падающих на светоделительные поверхности. Эта задача удачно решается применением для разделения световых потоков светоделительного призмного блока, представляющего собой единую конструкцию из нескольких призм, на гранях которых нанесены дихроические покрытия с изменяющимися по спектру коэффициентами отражения и пропускания.

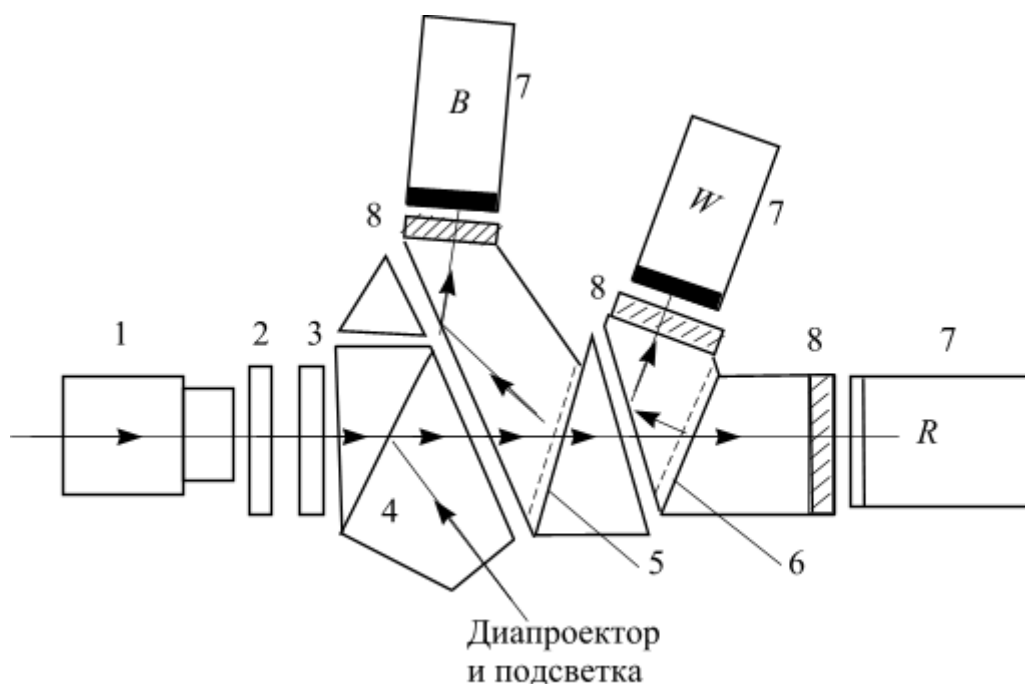


Рис. 3.25. Оптическая система трехтрубной *WRB* камеры

На рис. 3.25 изображена схема оптической системы трехтрубной *WRB* камеры. Световой поток, пройдя через вариообъектив 1, сменные приводные светофильтры 2, корректирующие при необходимости источник освещения, поступает на компоненты призмного светоделительного блока 4. Нанесенные на грани призм дихроические слои 5 и 6 расщепляют световой поток на три, разделенные по спектру, составляющие, которые образуют на фоточувствительной поверхности передающих трубок 7 цветоделенные изображения. Светофильтры 8, наклеенные на грани призм, корректируют спектральные характеристики оптических каналов.

Применение призмного блока позволяет реализовать более жесткую конструкцию цветоделительной системы, упростить юстировку схемы, снизить потери света, вызываемые отражением от границы воздух – стекло, а также ввести световой поток от диапроектора, проецирующего изображение тест-таблицы на фотокатоды трех передающих трубок.