

гов разомкнута, причем излучения с λ от 700 до 780 нм имеют одну и ту же цветность и изображаются одной точкой R на локусе. Цвета, образуемые смешением крайних спектральных излучений (красного и фиолетового) — пурпурные — лежат на прямой, соединяющей концы локуса. Это — линия пурпурных цветов. Локус в длинноволновой области спектра ($\lambda = 550 \div 700$ нм) почти прямолинейен. Одинаковым интервалам $\Delta\lambda$ на различных участках линии спектральных цветов соответствуют разные расстояния между цветностями, соответствующими однородным излучениям с λ и $\lambda + \Delta\lambda$. Положение точки белого цвета E в цветовом треугольнике зависит от соотношения яркостей основных цветов, т. е. от значений единичных цветов.

Для равномерного распределения цветности различных цветов надо, чтобы точка цветности белого совпадала с центром тяжести треугольника, который находится в точке пересечения его медиан. Такое расположение точки белого цвета E достигается выбором относительных яркостей основных единичных цветов (т. е. яркостных коэффициентов), удовлетворяющих соотношению (9.15). Таким образом, центр тяжести треугольника (точка E , имеющая координаты цветности $r_E = g_E = b_E = 1/3$) совпадает с цветностью излучения E (равноэнергетического). Линия спектральных цветов проходит через вершины цветового треугольника (так как излучения R , G , B — однородные) и обращена выпуклостью наружу. Это значит, что какие бы реально существующие цвета ни были взяты за основные, некоторые из них окажутся вне треугольника и будут иметь отрицательные координаты цветности (в том числе все спектральные, кроме принятых за основные).

Вопросы к § 9.3

1. Почему в качестве основных цветов системы RGB выбраны однородные излучения с $\lambda_B = 435,8$ нм, $\lambda_G = 546,1$ нм и $\lambda_R = 700$ нм?
2. Что такое единичный цвет и для чего он введен?
3. Расскажите о графическом изображении цветности.

9.4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ. РАСЧЕТНАЯ СИСТЕМА XYZ

Преобразование колориметрических систем заключается в переходе от одной триады основных цветов к другой способами аналитической геометрии. Рассмотрим это на примере построения колориметрической системы XYZ .

Хотя с помощью системы RGB решаются все основные задачи колориметрии, она обладает существенным практическим неудобством — необходимостью использовать для однородных излучений отрицательные значения координат цвета. Определение яркости по (9.14) или (9.15) требует осуществления математических операций. Поэтому была создана система, позволяющая упростить вычисления цветовых координат и яркостей. При создании расчетной системы XYZ было учтено следующее.

Отрицательные координаты можно исключить, если в качестве основных вместо цветов R, G, B взять другие цвета, которые должны быть выбраны так, чтобы вся область реальных цветов, в том числе и основные R, G, B , вписывалась в цветовой треугольник, в вершинах которого располагаются основные цвета X, Y, Z новой системы. Тогда сами цвета будут переальными, так как лежат вне поля реально существующих цветов, за локусом. Поскольку при переходе от системы RGB к системе XYZ преобразования осуществляются по соотношениям линейной алгебры, выражения для цветов X, Y, Z при помощи комбинации реально существующих цветов R, G, B имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= R_x [R] + G_x [G] + B_x [B]; \\ Y &= R_y [R] + G_y [G] + B_y [B]; \\ Z &= R_z [R] + G_z [G] + B_z [B], \end{aligned} \right\} \quad (9.20)$$

где $R_x=0,4185$; $G_x=-0,0912$; $B_x=0,0009$; $R_y=-0,1588$; $G_y=0,2524$; $B_y=0,0025$; $R_z=-0,0829$; $G_z=0,0157$; $B_z=0,1786$ — координаты цвета основных цветов X, Y, Z новой системы, выраженные в координатном пространстве системы RGB .

Любой цвет, например F , в системе XYZ выражается цветовым уравнением

$$F = X[X] + Y[Y] + Z[Z], \quad (9.21)$$

где X, Y, Z — координаты цвета, т. е. величины, указывающие, в каких количествах необходимо взять основные цвета для получения цвета, зрительно тождественного цвету F .

Координаты цветности:

$$x = X/\sigma; \quad y = Y/\sigma; \quad z = Z/\sigma, \quad (9.22)$$

где $\sigma = X + Y + Z$ — цветовой модуль.

На основе уравнений перехода от одной цветовой системы к другой удельные координаты однородных излуче-

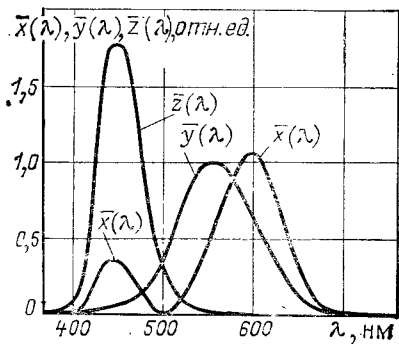


Рис. 9.10. Кривые сложения цветов в системе XYZ

ний $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ в системе RGB были пересчитаны для системы XYZ, в результате получены кривые $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ (рис. 9.10). Удельные координаты однородных излучений единичной мощности даны в табл. 9.2. Отрицательные значения координат

цвета однородных излучений отсутствуют, так как цветности основных цветов выбраны исходя из условия, что все координаты должны быть положительными.

Координаты цвета сложного излучения, имеющего спектральное распределение $\varphi(\lambda)$, рассчитываются с помощью удельных координат точно так же, как и в системе RGB:

$$\left. \begin{aligned} X &= \int \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = \Delta\lambda \sum_{i=1}^n \varphi(\lambda)_i \bar{x}(\lambda)_i; \\ Y &= \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = \Delta\lambda \sum_{i=1}^n \varphi(\lambda)_i \bar{y}(\lambda)_i; \\ Z &= \int \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda = \Delta\lambda \sum_{i=1}^n \varphi(\lambda)_i \bar{z}(\lambda)_i. \end{aligned} \right\} (9.23)$$

Расчетная система XYZ построена так, что только одна координата Y определяет количественную характеристику излучения — яркость. Основные цвета X, Y, Z выбраны таким образом, что относительные яркости их единичных цветов, т. е. их яркостные коэффициенты,

$$\Lambda_X = 0; \Lambda_Y = 1; \Lambda_Z = 0. \quad (9.24)$$

Таким образом, для упрощения расчетов было принято, что яркости двух основных цветов X и Z равны нулю. В этом случае яркости цветов, получаемые смешением цветов X, Y и Z, будут совпадать с яркостью основного цвета Y. Отсюда $L_X = L_Z = 0$; $L_Y = 683 \text{ кд/м}^2$, а $\Lambda_Y = 1$.

Таблица 9.2. Координаты цветности и удельные координаты цвета в системе XYZ

x_λ	y_λ	z_λ	$\lambda, \text{нм}$	\bar{x}_λ	\bar{y}_λ	\bar{z}_λ
0,1741	0,0059	0,8209	380	0,0014	0,0000	0,0065
0,1740	0,0059	0,8210	385	0,0022	0,0001	0,0105
0,1738	0,0049	0,8213	390	0,0042	0,0001	0,0201
0,1736	0,0049	0,8215	395	0,0076	0,0002	0,0362
0,1733	0,0048	0,8219	400	0,0143	0,0004	0,0679
0,1730	0,0048	0,8222	405	0,0232	0,0006	0,1102
0,1726	0,0048	0,8226	410	0,0435	0,0012	0,2074
0,1721	0,0048	0,8231	415	0,0776	0,0022	0,3713
0,1714	0,0051	0,8235	420	0,1344	0,0040	0,6456
0,1703	0,0058	0,8239	425	0,2148	0,0073	1,0391
0,1689	0,0069	0,8242	430	0,2839	0,0116	1,3856
0,1669	0,0086	0,8245	435	0,3285	0,0168	1,6230
0,1644	0,0109	0,8247	440	0,3483	0,0230	1,7471
0,1611	0,0138	0,8251	445	0,3481	0,0298	1,7826
0,1566	0,0177	0,8257	450	0,3362	0,0380	1,7721
0,1510	0,0227	0,8263	455	0,3187	0,0480	1,7441
0,1440	0,0297	0,8263	460	0,2908	0,0600	1,6692
0,1355	0,0399	0,8246	465	0,2511	0,0739	1,5281
0,1241	0,0578	0,8181	470	0,1954	0,0910	1,2876
0,1096	0,0868	0,8036	475	0,1421	0,0126	1,0419
0,0913	0,1327	0,7760	480	0,0956	0,1390	0,8130
0,0687	0,2007	0,7306	485	0,0580	0,1693	0,6162
0,0454	0,2950	0,6596	490	0,0320	0,2080	0,4652
0,0235	0,4127	0,5638	495	0,0147	0,2586	0,3533
0,0082	0,5384	0,4534	500	0,0049	0,3230	0,2720
0,0039	0,6548	0,3413	505	0,0024	0,4073	0,2123
0,0139	0,7502	0,2359	510	0,0093	0,5030	0,1582
0,0389	0,8120	0,1491	515	0,0291	0,6082	0,1117
0,0743	0,8338	0,0919	520	0,0633	0,7100	0,0782
0,1142	0,8262	0,0596	525	0,1096	0,7932	0,0573
0,1547	0,8059	0,0394	530	0,1655	0,8620	0,0422
0,1929	0,7816	0,0255	535	0,2257	0,9149	0,0298
0,2296	0,7543	0,0161	540	0,2904	0,9540	0,0203
0,2658	0,7243	0,0099	545	0,3597	0,9803	0,0134
0,3016	0,6923	0,0061	550	0,4434	0,9950	0,0087
0,3373	0,6589	0,0038	555	0,5121	1,0002	0,0057
0,3731	0,6245	0,0024	560	0,5945	0,9950	0,0039
0,4087	0,5896	0,0017	565	0,6784	0,9786	0,0027
0,4441	0,5547	0,0012	570	0,7621	0,9520	0,0021
0,4788	0,5202	0,0010	575	0,8425	0,9154	0,0018
0,5125	0,4866	0,0009	580	0,9163	0,8700	0,0017
0,5448	0,4544	0,0008	585	0,9786	0,8163	0,0014
0,5752	0,4242	0,0006	590	1,0263	0,7570	0,0011
0,6029	0,3965	0,0006	595	1,0567	0,6949	0,0010
0,6270	0,3725	0,0005	600	1,0622	0,6310	0,0008
0,6482	0,3514	0,0004	605	1,0456	0,5668	0,0006
0,6658	0,3340	0,0002	610	1,0026	0,5030	0,0003
0,6801	0,3197	0,0002	615	0,9384	0,4412	0,0002
0,6915	0,3083	0,0002	620	0,8544	0,3810	0,0002

x_λ	y_λ	z_λ	λ , нм	\bar{x}_λ	\bar{y}_λ	\bar{z}_λ
0,7006	0,2993	0,0001	625	0,7514	0,3210	0,0001
0,7079	0,2920	0,0001	630	0,6424	0,2650	0,0000
0,7140	0,2859	0,0001	625	0,5419	0,2170	0,0000
0,7190	0,2809	0,0001	640	0,4479	0,1750	0,0000
0,7230	0,2770	0,0000	645	0,3608	0,1382	0,0000
0,7260	0,2740	0,0000	650	0,2836	0,1070	0,0000
0,7283	0,2717	0,0000	655	0,2187	0,0816	0,0000
0,7300	0,2700	0,0000	660	0,1649	0,0610	0,0000
0,7311	0,2689	0,0000	665	0,1212	0,0446	0,0000
0,7320	0,2680	0,0000	670	0,0874	0,0320	0,0000
0,7327	0,2673	0,0000	675	0,0636	0,0232	0,0000
0,7334	0,2666	0,0000	680	0,0468	0,0170	0,0000
0,7340	0,2660	0,0000	685	0,0329	0,0119	0,0000
0,7344	0,2656	0,0000	690	0,0227	0,0082	0,0000
0,7346	0,2654	0,0000	695	0,0158	0,0057	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	700	0,0114	0,0041	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	705	0,0081	0,0029	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	710	0,0058	0,0021	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	715	0,0041	0,0015	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	720	0,0029	0,0010	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	725	0,0020	0,0007	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	730	0,0014	0,0005	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	735	0,0010	0,0004	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	740	0,0007	0,0003	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	745	0,0005	0,0002	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	750	0,0003	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	755	0,0002	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	760	0,0002	0,0001	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	765	0,0001	0,0000	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	770	0,0001	0,0000	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	775	0,0000	0,0000	0,0000
0,7347	0,2653	0,0000	780	0,0000	0,0000	0,0000
			Σ	21,3713	21,3714	21,3715

Так как только координата Y определяет яркость цвета, то, следовательно, кривая сложения $\bar{y}(\lambda)$ выражает относительную яркость спектральных цветов излучений одинаковой мощности. Поскольку относительная яркость спектральных цветов излучений одинаковой мощности определяется кривой $V(\lambda)$ (гл. 2), кривая сложения $\bar{y}(\lambda)$ совпадает с кривой $V(\lambda)$ для монохроматического излучения в условиях дневного зрения. Тогда (9.23) для Y примет вид

$$Y = \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = \Delta\lambda \sum_{i=1}^n \varphi(\lambda)_i \bar{y}(\lambda)_i = \Delta\lambda \sum_{i=1}^n \varphi(\lambda)_i V(\lambda)_i. \quad (9.25)$$

Яркость L_F цвета F в расчетной системе XYZ равна

$$L_F = Y \cdot 683, \quad (9.26)$$

причем если определяется цвет излучения, отраженного от какого-либо освещенного образца или прошедшего через него, то координата цвета Y численно совпадает с коэффициентом отражения или пропускания этого образца.

Влияет ли нереальность основных цветов системы XYZ на использование колориметрических соотношений, применяемых для расчета цвета и полученных в опытах с реальными цветами?

Хотя основные цвета системы XYZ являются несуществующими реально, они рассчитаны как математические комбинации реальных цветов R , G и B . Цветности и яркости цветов X , Y и Z выбраны так, чтобы упростить вычисления координат цветов и их яркостей. Очевидно, что колориметрические опыты с нереальными цветами выполнить нельзя. Но система XYZ рассчитана по системе RGB и, следовательно, основана на тех же колориметрических опытах с реальными цветами, что и система RGB . Тогда, действительно, существующие соотношения между реальными цветами, выраженные через количества этих рассчитанных цветов X , Y , Z , выполняются так же, как и для реальных цветов R , G , B . Поэтому все закономерности сложения цветов и расчет координат цветов X , Y , Z по удельным координатам $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ и по спектральным составам излучений такие же, как в системе RGB .

Отметим также, что кривые сложения $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ и $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ являются функциями спектральной чувствительности приемников в системах RGB и XYZ , как и в системе КЗС. Такие фиктивные приемники существуют для каждой цветовой координатной системы, реакция каждого из них на падающее излучение дает соответствующую цветовую координату. Хотя эти кривые непосредственно и не отражают чувствительности глаза, они учитывают его цветовоспринимающие свойства.

Для расчетной системы XYZ график цветности имеет вид прямоугольного треугольника (рис. 9.11), у которого координаты совпадают с коэффициентами цветности x и y . Например, точка E на рис. 9.11 имеет координаты цветности цвета E , x_E и y_E . Цветовой график системы XYZ называют также *диаграммой цветности*. Точка цветности z цветового треугольника совпадает с началом координат. Значение z определяется расстоянием от точки, изображающей данную цветность, до гипотенузы x y вдоль линии, параллельной оси абсцисс (например, z_E на рис. 9.11).

Для удобства расчетов один из удельных коэффициентов цвета условились сделать пренебрежимо малым по от-

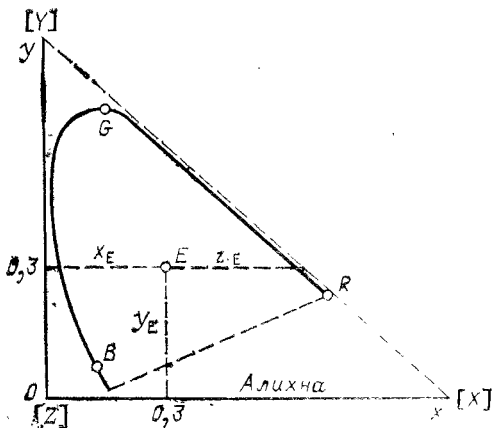


Рис. 9.11. Цветовой треугольник в системе XYZ (диаграмма цветности xy)

ношению к другим и для некоторых спектральных цветов равным нулю. Это коэффициент $\bar{z}(\lambda)$, которым в расчетах можно пренебречь. Прямолинейный участок локуса совпадает со стороной xy треугольника для однородных излучений, расположенных в участке спектра с $\lambda=540\div 780$ нм.

Так как отсутствуют отрицательные коэффициенты цвета однородных излучений, то линия спектральных цветов целиком лежит внутри треугольника XYZ.

Как и в системе RGB, смесь равных количеств единичных цветов X, Y, Z дает белый цвет с цветностью, соответствующей излучению E. Центр цветового треугольника XYZ совпадает с центром цветового треугольника RGB, и точка, изображающая цветность белого равноэнергетического излучения E, лежит в центре тяжести треугольника XYZ.

Для коэффициентов цветности выполняется следующее равенство:

$$x_E = y_E = z_E = 1/3.$$

Прямая Ox характеризует цветности излучений, имеющих нулевую яркость ($L=Y=0$), и называется *алихной*. Она не пересекает плоскость реальных цветов, так как не существует цвета (кроме черного), яркость которого была бы равна нулю. Поэтому все точки, лежащие на алихне, характеризуют цветности нереальных цветов. Прямая, точки которой характеризуют цветности излучений, имеющих

$\Lambda = 1$, проходит параллельно алихне, т. е. оси Ox , и через точку R , соответствующую цветности монохроматического излучения с $\lambda = 700$ нм и $\Lambda_R = 1$.

Как определить коэффициенты цвета в системе XYZ по коэффициентам цветности и по яркости? Так как $Y=L$, а $y=Y/\sigma=L/\sigma$, то $\sigma=L/y$. Тогда $X=x\sigma=xL/y$; $Y=L$; $Z=z\sigma=zL/y$.

В чем сходство и различие цветов, характеризующих следующими цветовыми уравнениями:

$$F_1 = 0,3[X] + 0,5[Y] + 0,2[Z]; \quad F_2 = 0,1[X] + 0,5[Y] + 0,4[Z];$$

$$F_3 = [X] + 5[Y] + 4[Z]?$$

Первый и второй цвета имеют одинаковую яркость, так как координаты цвета Y у них равны, но они различны по цветности. Яркость цвета F_3 в 10 раз больше яркости первого и второго излучений, так как $Y_3/Y_2 = 10$; второй и третий цвета имеют одинаковую цветность.

Вопросы к § 9.4

1. Почему систему XYZ называют расчетной?
2. Диаграмма цветности xy и ее особенности.

9.5. СИСТЕМА L, λ_d, p . СТАНДАРТНЫЕ ИСТОЧНИКИ БЕЛОГО ИЗЛУЧЕНИЯ A, B, C, E . ЦВЕТОВЫЕ АТЛАСЫ

Для систематизации и количественной оценки цветов используется колориметрический метод, основанный на том, что каждому цвету соответствуют три уровня возбуждения КЗС-приемников. Измерить их — значит выразить цвет тремя числами, найти их цветовые координаты. Поэтому указанный метод называют также измерительным. Так как цветовые координаты непосредственно не связаны с характеристиками цветовых ощущений, то изменение координат не отражает качественно и количественно изменение цвета. Колориметрическая система, которая будет рассмотрена ниже, устраняет этот недостаток. Эта система позволяет получать непосредственное представление о цвете того или иного объекта или излучения, однако она непригодна для расчета цвета излучения или смеси излучений с заданным спектральным составом.

Цветность излучения, его качество можно охарактеризовать двумя признаками.

Цветовой тон — свойство, обозначающее ощущение, возникающее при действии на глаз излучений разной дли-