

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.346

ВЛИЯНИЕ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСТОЧНИКА СВЕТА НА ЦВЕТОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

© 2007 г. М. Х. Азаматов*, И. С. Гайнутдинов*, доктор техн. наук; А. В. Михайлов**, канд. техн. наук; Р. С. Сабиров*, канд. техн. наук; Р. Г. Сафин*

* НПО "Государственный институт прикладной оптики", г. Казань

** НПК "Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова", Санкт-Петербург

Исследована зависимость цветовых параметров интерференционных фильтров от цветовой температуры источника света. Рассчитаны значения цветового различия интерференционных узкополосных и полосовых фильтров для различных областей спектра.

Коды OCIS: 310.6860.

Поступила в редакцию 04.10.2006.

Цветовые параметры оптических покрытий, в частности интерференционных фильтров, зависят от их спектральных характеристик и условий освещения, т. е. используемого источника света. Зависимость цвета интерференционного фильтра от источника света следует из выражений, определяющих значения цветовых параметров – координат цветности x и y [1, 2]

$$x = \frac{X}{X + Y + Z},$$
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z},$$

где

$$X = k \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$$Y = k \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

В формулах (1)–(3) X , Y , Z – координаты цвета, $\Phi(\lambda)$ – относительное спектральное распределение энергии источника света, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – относительные количества основных цветов цветовой системы МКО 1931 (кривые сложения); $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания исследуемо-

го интерференционного фильтра, k – нормировочный коэффициент.

Спектральное распределение излучения источника света $\Phi(\lambda)$ связано с его температурой и может быть рассчитано по формуле Планка для абсолютно черного тела (АЧТ):

$$\Phi(\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} (\exp(C_2/\lambda T) - 1)^{-1},$$

где $\Phi(\lambda T)$ – спектральная плотность лучистого потока, λ – длина волны, T – температура АЧТ, C_1 и C_2 – постоянные.

Распределение энергии излучения многих реальных источников света соответствует излучению АЧТ при определенной температуре, называемой цветовой. Точки цветности АЧТ на цветовой диаграмме МКО 1931 г. при разных значениях цветовой температуры образуют кривую цветовой температуры. Так, принятый Международной комиссией по освещению в качестве стандартного источника А (соответствует вольфрамовой лампе накаливания мощностью 100 Вт) имеет цветовую температуру 2855,6 К, т. е. его спектральное распределение излучения соответствует распределению излучения АЧТ при этой температуре.

Для описания тех источников света, спектральный состав излучения которых не соответствует излучению АЧТ (содержит пики пропускания или поглощения на некоторых участках видимой области спектра), используют коррелированную цветовую температуру. Коррелированной цветовой температуре соответствует точка цветности, лежащая вне кривой цветовой температуры. Примером источника

излучения, для описания которого используется коррелированная цветовая температура, может служить стандартный источник МКО D65. Его коррелированная цветовая температура составляет 6504 К.

Положение кривой цветовой температуры на цветовой диаграмме МКО 1931 г., а также положения точек цветности цветовой температуры стандартного источника излучения А и коррелированной цветовой температуры стандартного источника излучения D₆₅ показаны на рис. 1.

В проведенном исследовании авторами было рассмотрено различие цветовых параметров интерференционных фильтров в условиях освещения их стандартными источниками А и D₆₅. Для количественного определения различия цветовых параметров мы использовали рекомендованное МКО цветовое пространство $L^*a^*b^*$ (1976 г.), координаты которого

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \text{ при } Y/Y_0 > 0,008856,$$

$$L^* = 903,3(Y/Y_0) \text{ при } Y/Y_0 \leq 0,008856,$$

$$a^* = 500((X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}),$$

$$b^* = 200((Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}).$$

Координаты цвета X_0, Y_0, Z_0 относятся к источнику света, координаты цвета X, Y, Z – к исследуемому объекту (в нашем случае – интерференционному фильтру).

Шкала L^* пространства $L^*a^*b^*$ характеризует светлоту, a^* – величину красной/зеленой составляющей цвета, b^* – величину синей/желтой составляющей цвета.

Цветовое различие фильтров, освещенных источниками А и D₆₅, в пространстве $L^*a^*b^*$ (1976 г.) определяется выражением

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2},$$

где $\Delta L^* = L_A^* - L_D^*$, $\Delta a^* = a_A^* - a_D^*$, $\Delta b^* = b_A^* - b_D^*$.

Значение ΔE_{ab}^* , равное 1, называют порогом цветового различия. Принято считать, что средний наблюдатель не улавливает разницу в цвете объектов, имеющих значение $\Delta E_{ab}^* < 2$.

В ходе исследования были рассмотрены две группы интерференционных фильтров: узкополосные с относительной полушириной 1,0% и полосовые с относительной полушириной 10%. В каждой группе было по 15 фильтров, отличающихся друг от друга положением центральной длины волны λ_0 . Центральные длины волн фильтров каждой группы составляли равномерный ряд от 400 до 750 нм с шагом 25 нм. Образцы спектральных характеристик фильтров каждой группы представлены на рис. 2 (1 – узкополосный фильтр, 2 – полосовой фильтр, λ_0 – центральная длина волны).

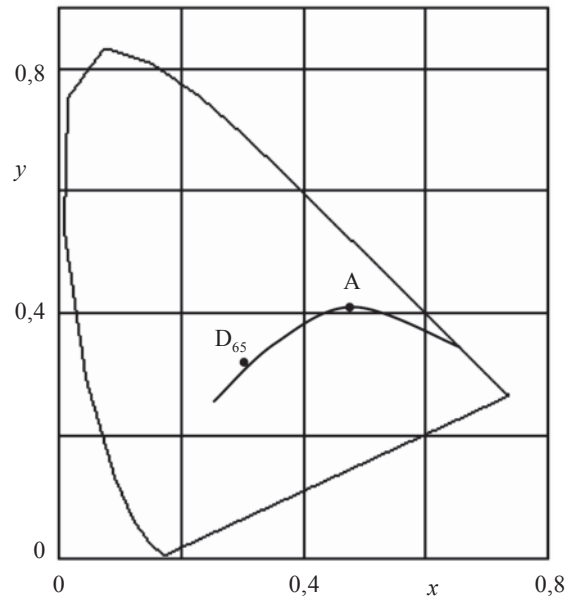


Рис. 1. Цветовая диаграмма МКО 1931 г.

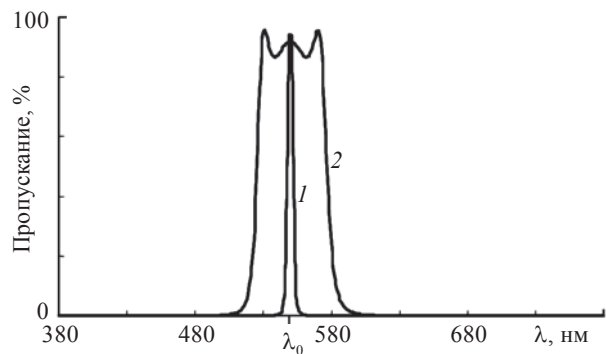


Рис. 2. Спектральные характеристики пропускания исследованных фильтров. 1 – узкополосный фильтр, 2 – полосовой, λ_0 – центральная длина волны.

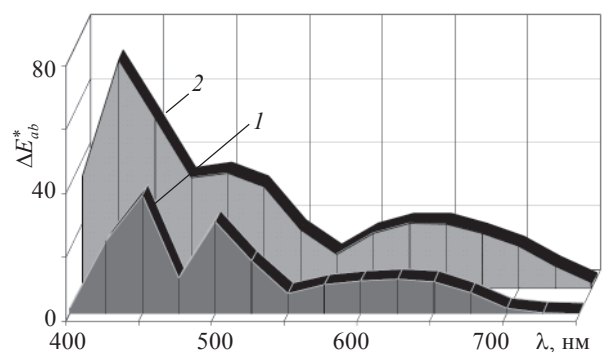


Рис. 3. Цветовое различие исследованных узкополосных (1) и полосовых (2) фильтров в условиях использования стандартных источников излучения А и D₆₅.

Результаты сравнения цветового различия исследованных фильтров приведены на рис. 3 (1 – цветовое различие узкополосных фильтров, 2 – цветовое различие полосовых фильтров).

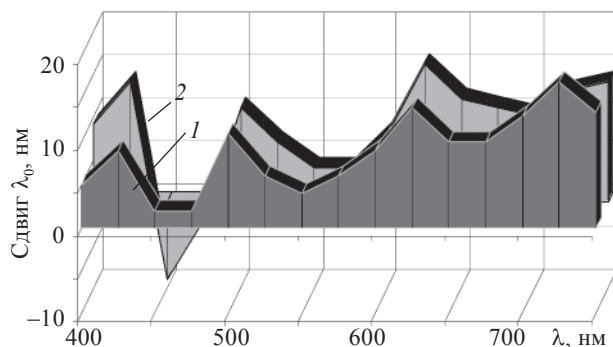


Рис. 4. Влияние спектрального сдвига центральной длины волны λ_0 исследованных узкополосных (1) и полосовых (2) фильтров на их цветовое различие.

Видно, что цветовое различие фильтров в условиях освещения стандартными источниками А и D_{65} неравномерно распределено по спектру и наиболее сильно выражено в коротковолновой области спектра (400–500 нм). Цветовое различие на всех участках спектра больше у полосовых фильтров. Прослеживается корреляция цветового различия фильтров с графиком относительных количеств основных цветов $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ цветовой системы МКО 1931 г.

Была также исследована возможность достижения наименьшего цветового различия фильтров путем спектрального сдвига центральной длины вол-

ны. Результаты такого исследования представлены на рис. 4. Выяснилось, что полностью устранить цветовое различие фильтров, освещаемых источниками А и D_{65} , таким способом невозможно. Сдвиг центральной длины волны фильтра, работающего с источником типа А, на 5–15 нм в длинноволновую область спектра позволяет уменьшить цветовое различие фильтров почти на всех участках спектра. Исключение составляет область 450–475 нм, в которой для достижения наименьшего цветового различия полосовых фильтров требуется сдвиг центральной длины волны фильтра, работающего с источником А, в коротковолновую область спектра. У узкополосных фильтров в указанной области спектра наименьшее цветовое различие достигается при сдвиге центральной длины волны фильтра, использующего источник типа А, в длинноволновую область спектра на 2 нм.

Анализ проведенных исследований показывает, что цветовые параметры интерференционных покрытий, в частности узкополосных и полосовых фильтров, существенно зависят от цветовой температуры используемых источников излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978. 592 с.
2. Агостон Ж.А. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне. М.: Мир, 1982. 181 с.