

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.346

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦВЕТОВОГО РАЗЛИЧИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

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

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

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

Рассмотрен вопрос о корреляции цветовых и спектральных характеристик интерференционных отрезающих фильтров. Рассчитаны значения цветового различия отрезающих фильтров, характеристики пропускания которых отличаются небольшим спектральным сдвигом.

Коды OCIS: 310.6860.

Поступила в редакцию 19.06.2006.

Интерференционные покрытия, используемые в видимой области спектра, характеризуются как оптическими параметрами (спектральные коэффициенты пропускания и отражения), так и цветовыми.

Помимо определения собственно цветовых характеристик, алгоритм вычисления которых при известных значениях спектральных коэффициентов пропускания или отражения хорошо известен [1, 2], в некоторых случаях необходимо определить цветовое различие интерференционных покрытий и соответствующее этому различию изменение спектральной характеристики оптического покрытия. Это необходимо, например, когда стоит задача изготовления оптических покрытий с заданными цветовыми параметрами, имеющими определенный допуск. Очевидно, что в общем случае рассмотрение корреляции цветовых и спектральных характеристик затруднительно ввиду многообразия оптических покрытий и соответствующих им спектральных характеристик. Поэтому представляется целесообразным решать эту задачу отдельно для различных типов интерференционных покрытий (узкополосные, полосовые, отрезающие фильтры, отражающие покрытия и т. д.).

Для определения цветовых различий между интерференционными покрытиями нами была разработана программа, позволяющая по результатам спектрофотометрических измерений спектральных характеристик интерференционных покрытий вычислять значения их цветового различия для разных моделей цветового пространства.

Цветовые характеристики оптического покрытия определяются исходя из выбранной модели цветового пространства. В распространенной цветовой

системе Международной комиссии по освещению (МКО) XYZ цвет характеризуется координатами цветности x и y , определяемыми из выражений

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

где

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

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

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

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 XYZ (кривые сложения), $E(\lambda)$ – спектральное распределение рассматриваемого оптического покрытия (для покрытий, работающих на пропускание, $E(\lambda) = \tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания, для отражающих систем $E(\lambda) = \rho(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения), k – нормировочный коэффициент.

Выражения (1)–(3) определяют взаимосвязь цветовых характеристик интерференционного покрытия с его спектральными коэффициентами пропускания или отражения.

Область возможных значений координат цветности x и y образует цветовую диаграмму xy (рис. 1).

Цветовое различие двух покрытий 1 и 2 с координатами цветности (x_1, y_1) и (x_2, y_2) на этой диаграмме определяется расстоянием $r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$.

Существенным недостатком цветового пространства XYZ МКО является его неравномерность, проявляющаяся в том, что для разных областей цветовой диаграммы x, y одинаковому цветовому различию объектов соответствуют различные значения r . Поэтому в 1976 году МКО была предложена более равномерная цветовая диаграмма $u'v'$ (рис. 2), координаты которой определяются выражениями [3]

$$u' = 4X/(X + 15Y + 3Z), \quad v' = 9Y/(X + 15Y + 3Z),$$

где X, Y, Z определяются выражениями (1)–(3).

Для диаграммы $u'v'$ расстояние r , характеризующее цветовое различие двух покрытий, определяется как $\sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$. Здесь u'_1, v'_1 и u'_2, v'_2 – координаты цветности сравниваемых оптических покрытий 1 и 2 на диаграмме $u'v'$.

С другой стороны, для определения цветовых различий оптических покрытий можно использовать рекомендованные МКО равноконтрастные модели цветового пространства $L^*a^*b^*$ и $L^*u^*v^*$.

Система $L^*a^*b^*$ МКО определяется следующими выражениями [4]:

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

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

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

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

В системе $L^*u^*v^*$ величина L^* определяется так же, как и в системе $L^*a^*b^*$, а значения u^* и v^* из следующих соотношений [4]:

$$u^* = 13L^*(u' - u'_0), \quad v^* = 13L^*(v' - v'_0).$$

Во всех приведенных выражениях величины с индексом 0 относятся к используемому источнику света. В наших расчетах мы использовали стандартный источник МКО типа А.

Цветовое различие двух интерференционных покрытий определяется выражениями [3]

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

для системы $L^*a^*b^*$,

$$\Delta E^*uv = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}$$

для системы $L^*u^*v^*$,

где $\Delta L^* = L^*_1 - L^*_2$, $\Delta a^* = a^*_1 - a^*_2$, $\Delta b^* = b^*_1 - b^*_2$, $\Delta u^* = u^*_1 - u^*_2$, $\Delta v^* = v^*_1 - v^*_2$.

Значения ΔE , равные 1, принимают за пороговое значение цветового различия.

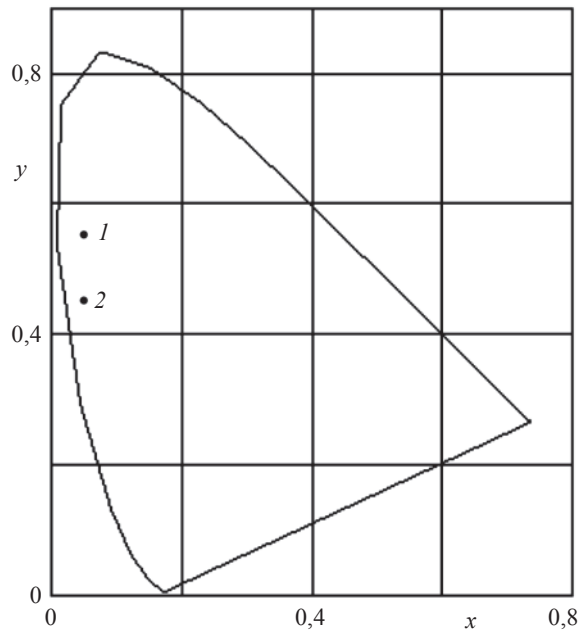


Рис. 1. Цветовая диаграмма x, y МКО (1931).

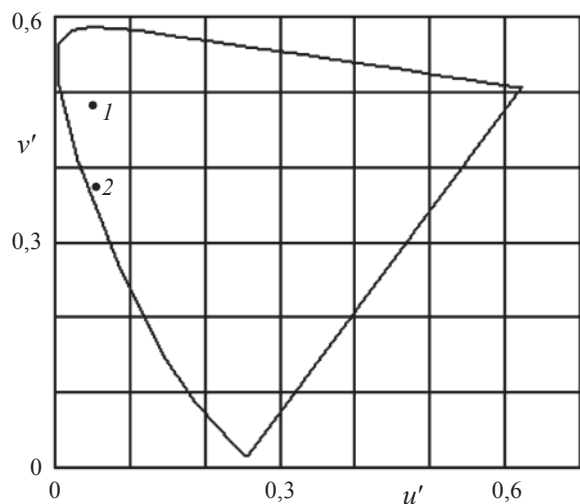


Рис. 2. Цветовая диаграмма $u'v'$ МКО (1976).

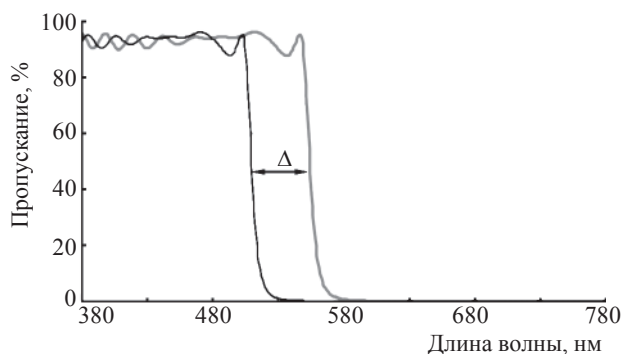


Рис. 3. Спектральные характеристики пропускания сравниваемых отрезающих интерференционных фильтров.

Таким образом, вычислив значения ΔE и r для сравниваемых интерференционных покрытий в той или иной модели цветового пространства, мы можем определить величину допуска на изменения координат цветности и установить соответствующее такому допуску изменение спектральной характеристики.

В своем исследовании мы рассмотрели цветовые различия отрезающих фильтров, спектральные характеристики которых отличаются только сдвигом друг относительно друга на некоторую величину Δ и представлены на рис. 3. На рис. 4 показаны зависимости ΔE от значений сдвига Δ на различных участках видимой области спектра при использовании моделей цветового пространства $L^*a^*b^*$ (рис. 4а) и $L^*u^*v^*$ (рис. 4б). Анализ полученных данных показывает, что для разных участков видимой области спектра значения порогового цветового различия и соответствующие им значения сдвигов

спектральных характеристик будут отличаться друг от друга. Причем вид функций цветового различия зависит от выбранной модели цветового пространства и цветовой диаграммы. При использовании модели $L^*a^*b^*$ наибольшее цветовое различие ΔE при одинаковом сдвиге спектральных характеристик наблюдается в синей (425 нм) и зеленой (500–525 нм) областях спектра, а при использовании модели $L^*u^*v^*$ – в зеленой (475–525 нм) и красной (600 нм) областях спектра. На рис. 5 показана зависимость величины r от Δ для видимой области участков спектра при использовании цветковых диаграмм x_y (рис. 5а) и $u'v'$ (рис. 5б). Из представленных на рисунке результатов следует, что при одинаковом сдвиге спектральных характеристик отрезающих фильтров разница их координат цветности, определяемая величиной r , зависит от длины волны. Поэтому допуск на значения координат цветности

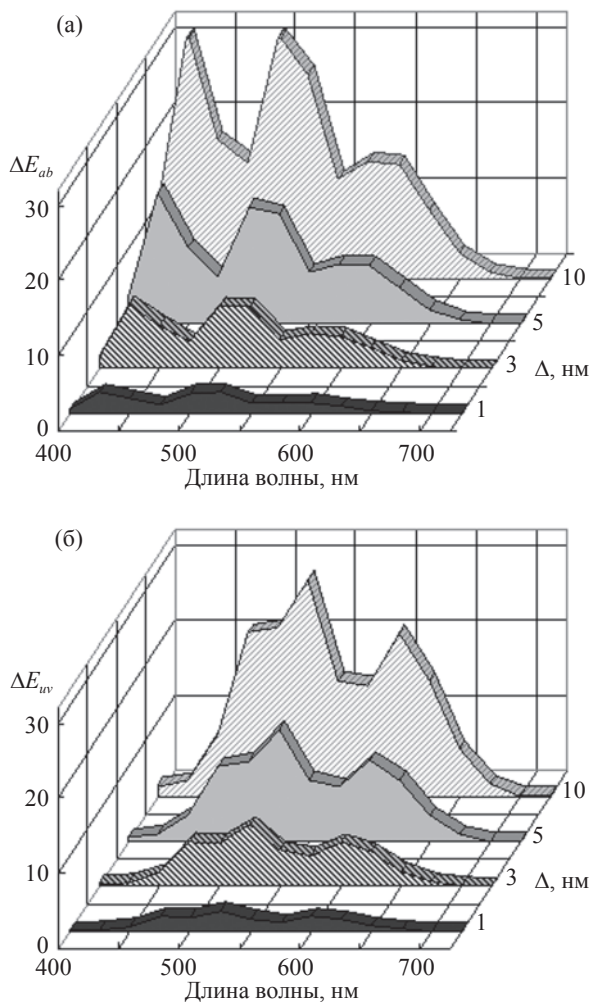


Рис. 4. Зависимость величины ΔE от длины волны λ при различных значениях сдвига Δ спектральных характеристик пропускания отрезающих фильтров для моделей цветовых пространств $L^*a^*b^*$ (а) и $L^*u^*v^*$ (б).

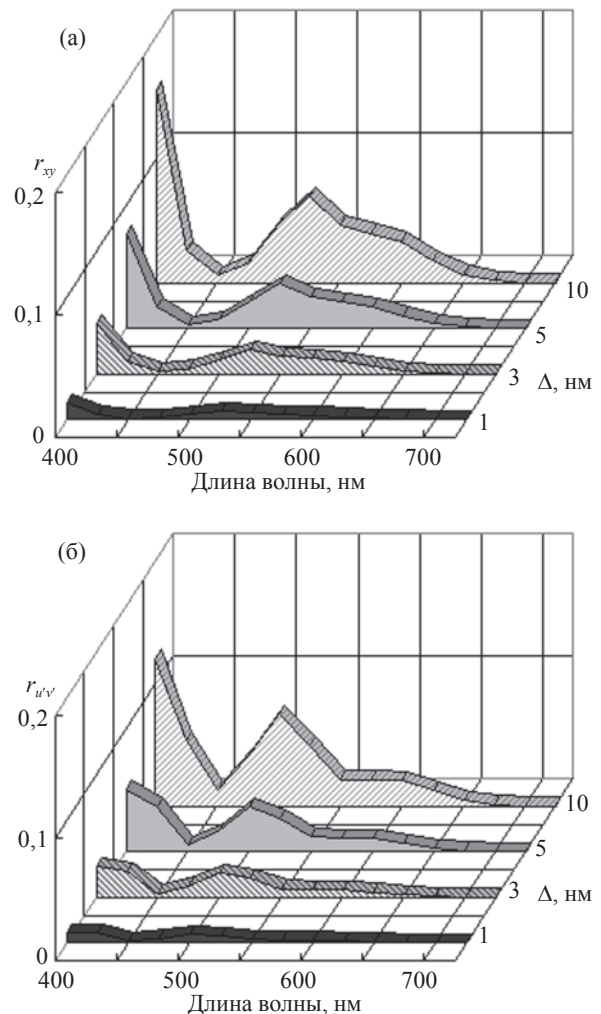


Рис. 5. Зависимость величины r от длины волны λ при различных значениях сдвига Δ спектральных характеристик пропускания отрезающих фильтров для цветковых диаграмм x_y (а) и $u'v'$ (б).

должен отличаться для разных областей спектра (для рассматриваемых покрытий наибольший допуск в области 650–750 нм, наименьший – в областях 400 и 500–525 нм). Невозможность установления одного значения цветового допуска для всего видимого диапазона спектра следует учитывать при разработке покрытий с заданными цветовыми параметрами. Для обеспечения наибольшего цветового допуска при заданных координатах цветности требуются дополнительные проработки конструкции покрытий.

Необходимо также отметить, что вид приведенных на рис. 4, 5 кривых будет зависеть от типа сравниваемых оптических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике / Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 592 с.
2. Агостон Ж.А. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне / Пер. с англ. Пенова И.В. М.: Мир, 1982. 181 с.
3. Ohno Y. CIE Fundamentals for Color Measurements // Proc. IS&T NIP16 International Conference on Digital Printing Technologies. Oct. 15–20. 2000. Vancouver, Canada. P. 540–545.
4. D'Zmura M., Colantoni P., Hagedorn J. Perception of color change // Color Research and Application. 2001. V. 26. P. 186–191.