

КОРРЕЛЯЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЦВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

© 2008 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

В статье рассмотрены вопросы определения цветовых характеристик и цветового различия оптических покрытий. Исследована зависимость цветовых характеристик полосовых интерференционных фильтров от положения их центральной длины волны и от относительной полупрозрачности.

Коды OCIS: 310.6860.

Поступила в редакцию 24.07.2007.

Работа многих современных оптических и оптоэлектронных приборов, работающих в видимом спектральном диапазоне, требует точной цветопередачи. Важными элементами оптических систем, обеспечивающих требуемые цветовые характеристики приборов, являются оптические покрытия. При разработке оптических покрытий с заданными цветовыми характеристиками возникает задача определения зависимости цветовых характеристик интерференционных систем от их спектральных параметров. Целью данной работы является определение степени и характера влияния отклонений спектральных параметров полосовых интерференционных фильтров от заданных на их цветовые характеристики.

Цветовые характеристики оптических покрытий описываются, как правило, в цветовом пространстве МКО (Международная комиссия по освещению) 1931 г. Эта модель цвета основана на трех первичных цветовых стимулах (функциях сложения цветов), спектральные распределения которых $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ подобраны таким образом, чтобы охватить весь видимый стандартным наблюдателем МКО диапазон спектра.

Корреляция спектральных и цветовых характеристик оптических покрытий, работающих на пропускание, в цветовом пространстве МКО 1931 определяется соотношениями [1]:

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

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

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

где X, Y, Z – координаты цвета, $\Phi(\lambda)$ – относительное спектральное распределение энергии источника све-

та, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ – относительные количества основных цветов цветовой системы МКО 1931 (функции сложения цветов), $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптического покрытия, k – нор-

мировочный коэффициент
$$k = \frac{100}{\int_{380}^{780} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}.$$

При определении цветовых характеристик оптических покрытий пропускающего типа координата цвета Y в цветовом пространстве МКО XYZ соответствует интегральному коэффициенту пропускания покрытия. На практике для количественного описания цвета часто используется полученное преобразованием цветовой системы МКО XYZ трехмерное пространство xuY . Координаты x и u этого цветового пространства однозначно определяют цвет при известном значении Y и называются координатами цветности. Они охватывают все видимые стандартным наблюдателем цвета при $Y = \text{const}$ и образуют двухмерную диаграмму цветности xu МКО (или график цветностей МКО) [2].

Координаты цветности x и u связаны с координатами цвета X, Y, Z соотношениями

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (4)$$

$$u = \frac{Y}{X + Y + Z}. \quad (5)$$

Цветовое пространство МКО XYZ ввиду особенностей человеческого зрения нелинейно, т. е. в разных его областях расстояние между минимально различимыми цветами неодинаково. Этот факт хорошо иллюстрируется цветовой диаграммой xu . В области диаграммы, соответствующей зеленому цвету, для которого спектральная чувствительность

глаза наибольшая, расстояние между точками, имеющими одинаковое цветовое различие, больше, чем в областях диаграммы, соответствующих синему или красному цвету. Мак-Адамом в [3] были эмпирически установлены области равного цветового различия для цветового графика МКО. Им было выявлено, что такие области имеют форму эллипсов, размеры которых сильно отличаются в разных областях цветового графика. Поэтому модели цветового пространства XYZ и xuY для количественного определения разницы цвета (в том числе интерференционных покрытий) не используются. Для этой цели были специально разработаны равноконтрастные модели цветового пространства.

В 1976 году МКО было рекомендовано к применению равноконтрастное пространство $L^*a^*b^*$ (CIELAB 1976), основанное на преобразовании координат цветового пространства XYZ . Физической основой цветовой модели $L^*a^*b^*$ является теория оппонентных цветов, согласно которой цвет не может быть одновременно красным и зеленым или синим и желтым, поэтому атрибуты цвета красный/зеленый и желтый/синий могут быть описаны одними и теми же величинами. Координаты равноконтрастного пространства $L^*a^*b^*$ определяются следующими выражениями [4]:

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \text{ при } Y/Y_0 > 0,008856, \quad (6)$$

$$L^* = 903,3(Y/Y_0) \text{ при } Y/Y_0 \leq 0,008856, \quad (7)$$

$$a^* = 500((X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}), \quad (8)$$

$$b^* = 200((Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}). \quad (9)$$

В выражениях (6)–(9) координаты цвета X_0 , Y_0 , Z_0 относятся к источнику света, координаты цвета X , Y , Z – к исследуемому интерференционному покрытию. Шкала L^* пространства $L^*a^*b^*$ характеризует светлоту, a^* – величину красной/зеленой составляющей цвета, b^* – величину синей/желтой составляющей цвета. Плоскость a^*b^* образует диаграмму цветности, подобную диаграмме цветности xu .

Равноконтрастное цветовое пространство $L^*a^*b^*$ применяется в случаях субтрактивного синтеза цвета (т. е. в тех случаях, когда цвет образуется вычитанием цветового стимула из спектра источника) и широко используется для определения цветового различия оптических покрытий.

Точное определение цветового различия вызывает затруднения. Основной причиной этих сложностей является то, что во всех применяемых формулах цветовое различие определяется как расстояние между двумя точками в евклидовой метрике, хотя в действительности для описания координат равноконтрастных пространств (с одной стороны,

это светлота или яркость, с другой – насыщенность и цветовой тон или координаты цветности) должны служить разные метрики. В первом случае – это метрика фотометрии, во втором метрика спектра. Поэтому во многих формулах присутствуют определенные эмпирическим путем коэффициенты, позволяющие повысить точность расчетов.

В 2000 году МКО рекомендовало для определения цветового различия следующую формулу, основанную на описании цвета в пространстве $L^*a^*b^*$ [5]:

$$\Delta E_{2000}^* = \left[\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right) \right]^{1/2} \quad (10)$$

Для решения уравнения (10) при сравнении двух оптических покрытий, цветовые координаты которых равны L_1^* , a_1^* , b_1^* и L_2^* , a_2^* , b_2^* , используются следующие соотношения: $\Delta L' = L_2 - L_1$, $\Delta C' = C_2' - C_1'$, где

$$C_i' = \sqrt{a_i^{*2}(1+G)^2 + b_i^{*2}} \quad i = 1, 2;$$

$$G = 0,5 \left[1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right],$$

$$\bar{C} = \frac{\sqrt{a_1^{*2} + b_1^{*2}} + \sqrt{a_2^{*2} + b_2^{*2}}}{2};$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin(\Delta h'/2),$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h_2' - h_1' & \text{при } |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ, \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & \text{при } |h_2' - h_1'| > 180^\circ \text{ и } h_2' \leq h_1', \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & \text{при } |h_2' - h_1'| > 180^\circ \text{ и } h_2' > h_1', \end{cases}$$

$$h_i' = \begin{cases} 0 & \text{при } b_i^* = a_i' = 0, \\ \text{tg}^{-1}(b_i^*/a_i') & \text{при } b_i^* \neq 0 \text{ или } a_i' \neq 0. \end{cases}$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C,$$

$$\Delta\theta = 30 \exp \left[- \left(\frac{\bar{h}' - 275}{25} \right)^2 \right],$$

$$\bar{h}' = \begin{cases} (h_1' + h_2' + 360)/2 & \text{при } |h_1' - h_2'| > 180^\circ, \\ (h_1' + h_2')/2 & \text{при } |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ, \end{cases}$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}},$$

$$\bar{C}' = \frac{C'_1 + C'_2}{2},$$

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}}, \quad \bar{L}' = \frac{L_1 + L_2}{2};$$

$$S_C = 1 + 0,045\bar{C}', \quad S_H = 1 + 0,015\bar{C}'T,$$

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{h}' - 30) + 0,24 \cos(2\bar{h}') +$$

$$+ 0,32 \cos(3\bar{h}' + 6) - 0,20 \cos(4\bar{h}' - 63);$$

$$K_L = K_C = K_H = 1.$$

В выражении (10) для определения цветового различия учитываются не только весовые коэффициенты для каждой шкалы используемого цвето-

$$0,35B0,7H(0,7B0,7H)^9 0,35B0,75H0,75B(0,75H0,75B)^9 0,75HП(BH2BHVH)^4, \quad (11)$$

где В – слои из сульфида цинка, Н – слои из фторида иттрия, П – подложка из оптического стекла марки К8. Числа перед символами обозначают оптическую толщину слоев относительно $\lambda_0/4$, λ_0 – центральная длина волны.

На рис. 1 показана спектральная характеристика пропускания интерференционной системы (11) для $\lambda_0 = 550$ нм.

Исследуемые фильтры отличались базовыми значениями центральной длины волны, которые составляли 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 и 750 нм. Такой выбор базовых значений λ_0 позволяет охватить весь видимый диапазон спектра. Необходимость такого охвата обусловлена тем, что в силу нелинейности существующих моделей цветового

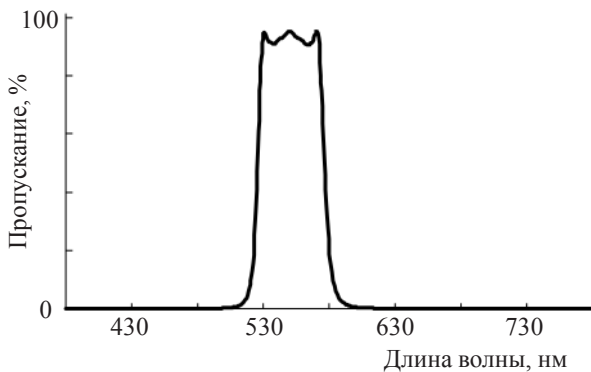


Рис. 1. Спектральная характеристика пропускания полосового интерференционного фильтра конструкции (11) при $\lambda_0 = 550$ нм.

го пространства, но и взаимное влияние значений координат этого пространства.

При исследовании свойств интерференционных покрытий пороговое значение цветового различия ($\Delta E = 1$ ед.) может рассматриваться в качестве критерия устойчивости цветовых характеристик покрытий. (Принято считать, что цветовое различие менее 1 не распознается стандартным наблюдателем.)

Авторами было проведено исследование корреляции таких спектральных параметров интерференционных полосовых фильтров, как положение центральной длины волны λ_0 и относительная полуширина $\Delta_{\tau=0,5}/\lambda_0$, и их цветовых характеристик.

Конструкция исследуемых фильтров может быть представлена в виде

пространства характер зависимости цветовых характеристик фильтра от его спектральных параметров в разных спектральных областях может быть различным.

Исследование проводилось методом математического моделирования с помощью разработанной авторами программы, позволяющей определять цветовые характеристики оптических покрытий по заданным спектральным характеристикам. В результате моделирования определялись координаты цветности x и y в цветовом пространстве xY , координаты L^* , a^* , b^* , описывающие цвет в равноконтрастном пространстве CIELAB76, а также цветовое различие ΔE_{2000}^* по формуле (10). Моделирование проводилось для следующих условий: угол зрения стандартного наблюдателя МКО 2° , освещение стандартными источниками излучения А и D_{65} .

При исследовании влияния точности положения центральной длины волны фильтра λ_0 на его цветовые характеристики моделировалось смещение центральной длины волны λ_0 с шагом 2 нм как в сторону ее увеличения, так и уменьшения относительно начального (базового) положения в различных областях видимого спектрального диапазона. Цветовое различие определялось при сравнении фильтров, центральная длина волны которых занимала базовое положение, и фильтров, центральная длина волны которых была смещена относительно базового положения. Диапазон смещения центральной длины волны фильтра составлял ± 10 нм относительно базового положения. Изменения координат цветности, рассчитанные для диаграммы цветности x, y , отображены на рис. 2.

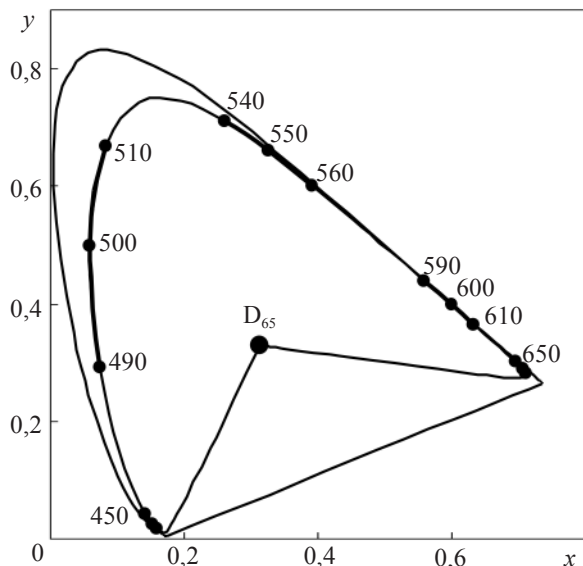


Рис. 2. Изменение координат цветности в зависимости от сдвига λ_0 фильтра конструкции (11) на диаграмме МКО 1931. Источник излучения D_{65} .

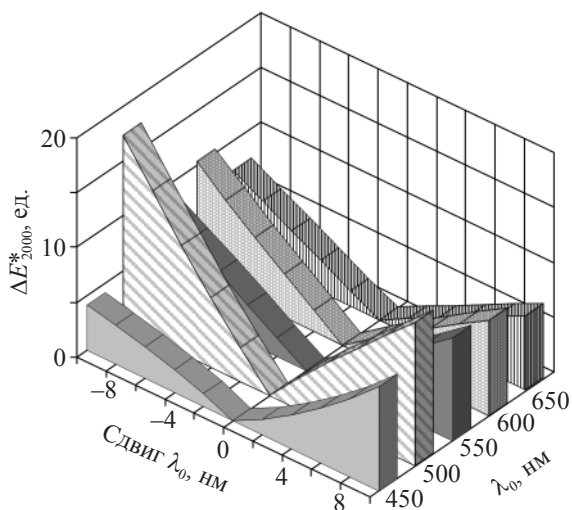


Рис. 3. Зависимость цветового различия ΔE^*_{2000} фильтра (11) от сдвига центральной длины волны λ_0 для источников излучения А.

На диаграмме xu в каждой области спектра наблюдается свой масштаб изменения координат цветности от величины сдвига λ_0 , что выражается в различных расстояниях между координатами цветности фильтров с одинаковым сдвигом центральной длины волны на разных участках видимого спектрального диапазона. Это свидетельствует о недостаточной равномерности диаграммы цветности МКО 1931.

Зависимость цветового различия ΔE^*_{2000} от сдвига центральной длины волны λ_0 представлена на рис. 3.

Наибольшее цветовое различие фильтров при одинаковом отклонении λ_0 наблюдается в области спектра 500 нм. Согласно полученным результатам порог цветового различия исследуемых интерференционных фильтров достигается при сдвиге центральной длины волны около 2 нм. Причем это значение смещения λ_0 одинаково во всех областях спектра, кроме зеленой области ($\lambda_0 = 500$ нм), в которой порог цветового различия достигается при сдвиге λ_0 менее 1 нм. Таким образом, отклонение положения центральной длины волны полосовых фильтров от заданного менее 2 нм не приводит к заметному стандартным наблюдателем изменению цветовых характеристик исследованных покрытий.

Данный вывод справедлив как для фильтров, освещаемых источником А, так и для фильтров, освещаемых источником D_{65} . То есть цветовое различие исследованных фильтров, отличающихся положением λ_0 , крайне слабо зависит от цветовой температуры источника излучения.

При исследовании влияния относительной полуширины фильтра ($\Delta T_{=0,5}/\lambda_0$) 100% на его цветовые характеристики были рассмотрены полосовые фильтры, относительная полуширина которых составляла 1, 5, 10, 20, 30%. Характер изменения координат цветности исследованных фильтров от их полуширины при условии освещения источником А показан на рис. 4. Представленные на рисунке кривые цветового охвата говорят об изменении

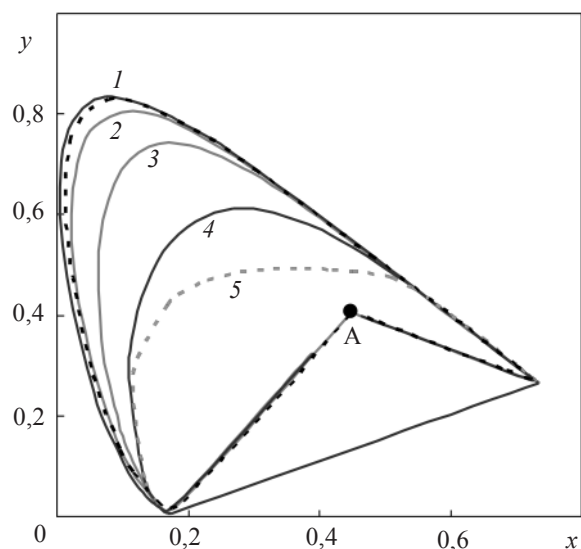


Рис. 4. Координаты цветности полосовых интерференционных фильтров с различной относительной полушириной при освещении источником А. 1 – $\Delta\lambda_{T=0,5}/\lambda_0 = 0,01$, 2 – 0,05, 3 – 0,10, 4 – 0,20, 5 – 0,30.

цветовой насыщенности фильтров при изменении их полуширины. С увеличением полуширины фильтра координаты цветности описывают кривую, охватывающую меньшую площадь на диаграмме цветностей.

Для того чтобы определить степень устойчивости цветовых характеристик фильтра к изменению его полуширины, моделировалось изменение относительной полуширины с шагом 1% как в сторону ее увеличения, так и в сторону уменьшения в раз-

Цветовые характеристики и цветовые различия полосовых интерференционных фильтров с различной полушириной

λ_0 , нм	$\Delta_{0,5}/\lambda_0$, %	Источник А				Источник D ₆₅			
		L*	a*	b*	ΔE_{2000}^*	L*	a*	b*	ΔE_{2000}^*
450	13,5	13,642	45,198	-127,832	11,22	23,887	97,948	-113,973	7,30
	12,5	11,170	53,234	-129,308	7,24	21,441	105,119	-115,691	4,92
	11,5	8,931	59,740	-129,542	3,87	19,095	110,844	-116,426	2,83
	10,5	7,294	63,579	-128,612	1,59	17,247	114,194	-116,158	1,30
	9,5	6,041	65,315	-126,560	0,00	15,581	116,072	-115,130	0,00
	8,5	4,936	65,268	-123,063	1,28	13,829	116,641	-113,111	1,30
	7,5	4,101	63,653	-118,770	2,21	12,256	115,768	-110,399	2,44
	6,5	3,412	60,776	-113,643	3,01	10,733	113,635	-106,950	3,55
	5,5	2,791	56,499	-107,315	3,87	9,117	110,085	-102,484	4,77
500	13,5	50,793	-121,148	-25,381	11,21	61,029	-126,031	4,676	11,37
	12,5	47,863	-124,306	-25,377	8,22	58,227	-131,179	5,522	8,80
	11,5	44,645	-126,746	-25,175	5,09	55,046	-135,960	6,333	5,77
	10,5	41,806	-128,050	-24,868	2,47	52,157	-139,394	6,915	2,91
	9,5	39,027	-128,585	-24,483	0,00	49,263	-142,011	7,350	0,00
	8,5	35,907	-127,700	-23,983	2,66	45,952	-143,994	7,667	3,27
	7,5	32,986	-123,724	-23,456	5,09	42,796	-144,800	7,782	6,23
	6,5	30,107	-117,333	-22,865	7,50	39,626	-143,790	7,706	9,05
	5,5	27,060	-108,549	-22,119	10,12	36,202	-138,535	7,435	11,96
550	13,5	79,444	-67,906	97,915	8,02	81,733	-68,791	116,126	7,05
	12,5	77,268	-71,679	98,362	6,24	79,734	-71,050	116,572	5,60
	11,5	74,640	-75,107	98,105	4,15	77,273	-72,962	116,167	3,79
	10,5	72,109	-77,391	97,247	2,14	74,856	-74,083	115,046	1,99
	9,5	69,435	-78,880	95,871	0,00	72,258	-74,604	113,155	0,00
	8,5	66,198	-79,626	93,743	2,64	69,064	-74,454	109,988	2,53
	7,5	62,934	-79,420	91,218	5,39	65,805	-73,581	106,144	5,22
	6,5	59,480	-78,362	88,228	8,41	62,326	-72,040	101,586	8,21
	5,5	55,553	-76,329	84,355	12,03	58,342	-69,709	95,961	11,81
600	13,5	77,007	40,716	128,593	8,47	69,299	46,504	118,021	10,47
	12,5	74,977	42,423	125,701	6,60	67,111	49,109	114,473	8,00
	11,5	72,528	43,939	121,983	4,38	64,554	51,480	110,241	5,20
	10,5	70,165	44,921	118,257	2,25	62,158	53,098	106,223	2,63
	9,5	67,660	45,527	114,219	0,00	59,673	54,216	102,028	0,00
	8,5	64,608	45,753	109,231	2,76	56,703	54,881	96,987	3,13
	7,5	61,505	45,503	104,117	5,62	53,724	54,900	91,917	6,30
	6,5	58,196	44,805	98,631	8,76	50,581	54,315	86,560	9,71
	5,5	54,404	43,576	92,314	12,48	47,031	53,027	80,498	13,66
650	13,5	50,156	79,291	85,834	11,07	39,603	79,775	67,899	9,72
	12,5	47,656	78,912	81,605	8,24	37,170	78,914	63,722	7,23
	11,5	44,844	77,925	76,826	5,19	34,473	77,395	59,088	4,54
	10,5	42,316	76,572	72,517	2,54	32,088	75,589	54,987	2,22
	9,5	39,807	74,841	68,229	0,00	29,759	73,445	50,980	0,00
	8,5	36,960	72,469	63,350	2,81	27,168	70,666	46,518	2,45
	7,5	34,269	69,885	58,732	5,39	24,775	67,775	42,397	4,69
	6,5	31,591	67,030	54,128	7,92	22,447	64,697	38,386	6,87
	5,5	28,715	63,692	49,178	10,60	19,996	61,201	34,161	9,18

личных областях видимого спектрального диапазона. Используя полученные для каждого значения полуширины фильтра цветовые характеристики L^* , a^* , b^* , с помощью выражения (10) рассчитывалась величина цветового различия фильтров. Цветовое различие определялось при сравнении фильтра базовой конструкции (11), относительная полуширина которого составляет 9,5%, и фильтра с измененной относительной полушириной. Диапазон изменения относительной полуширины фильтров составлял от 5,5 до 13,5%.

Цветовые характеристики фильтров, полученные в результате моделирования, приведены в таблице.

Анализ результатов показывает, что цветовые характеристики исследованных фильтров обладают почти одинаковой чувствительностью как к уменьшению относительной полуширины $\Delta\lambda_{0,5}/\lambda_0$, так и к ее увеличению. Исключения составляют фильтры с центральной длиной волны 450 нм (значение ΔE_{2000}^* при увеличении полуширины фильтра в три раза больше, чем при таком же ее уменьшении) и 550 нм (значение ΔE_{2000}^* при увеличении полуширины фильтра в 1,5 раза меньше, чем при таком же уменьшении).

Наибольшая зависимость цветовых характеристик от относительной полуширины наблюдается у фильтров с $\lambda_0 = 600$ нм при освещении источником излучения с высокой коррелированной цветовой температурой (источник D_{65}). Пороговое значение ΔE_{2000}^* в этом случае достигается при уменьшении относительной полуширины на 0,3% от заданного значения. Наименьшая зависимость цветовых характеристик от полуширины наблюдается у фильт-

ров с $\lambda_0 = 450$ нм при освещении источником излучения с низкой цветовой температурой (источник А). Пороговое значение ΔE_{2000}^* в этом случае достигается при уменьшении относительной полуширины на 0,8% от заданной. В среднем по спектру пороговое значение цветового различия ΔE_{2000}^* превышает при изменении полуширины фильтра на 0,5%. Поэтому можно сделать вывод, что изменение относительной полуширины полосовых фильтров на величину менее 0,5% не приводит к заметному стандартным наблюдателем изменению их цветовых характеристик.

Проведенные исследования позволяют оценить степень зависимости цветовых характеристик интерференционных фильтров от отклонения положения центральной длины волны от заданного и от изменения относительной полуширины.

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. И.В. Пенова. М.: Мир, 1982. 182 с.
3. MacAdam D.L. Maximum Visual Efficiency of Colored Materials // JOSA. 1935. V. 25. № 11. P. 361–367.
4. Colantoni P. Color Space Transformations. 2003. <http://www.raduga-ryazan.ru/files/doc/colorspacetransform03.pdf>.
5. Luo M.R. The CIE 2000 COLOUR DIFFERENCE FORMULA: CIEDE2000. http://www.iscc.org/aic2001/abstracts/symposium/How_CIE/Luo.doc.