

В. А. Агеев, ст. науч. сотрудник ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»;
А. К. Вершина, профессор; О. Ю. Пискунова, студентка

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕПРОДУКЦИИ ЦВЕТА ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫМИ ЗАЩИТНО-ДЕКОРАТИВНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Method of color reproduction by plasma vacuum protection decorative coatings is developed. Method is found on standard nonlinear optimization procedure of much variable function with limitations on base of determine complex of color co-ordinates. The spectral reflection coefficient of Schrodinger's optimal filter is using as a start approximation for this method.

Введение. Репродукция цвета, тождественного тестовому, является одной из основных задач при формировании на изделиях покрытий декоративного назначения. Обычно тестовый цвет регламентирован (кодирован) для конкретных условий наблюдения (освещение/наблюдатель/фон/окружение) тремя параметрами (например, яркостью /светлотой/ L , тоном /оттенком/ H и насыщенностью S либо интенсивностями красного R , зеленого G , синего B сигналов или голубого /циан/ C , пурпурного /мажента/ M , желтого Y и черного K красителей) [1] в одной из колориметрических моделей (HLS, XYZ, CIELAB, RGB, CMYK и др.) или из набора стандартных образцов цвета [2] (атласы Манселла, NCS, Освальда, RAL, Pantone, Normacolor, Метьюэна, АЦ-1000 и др.). Изменение условий наблюдения, например освещения (дневной солнечный свет, излучение ламп накаливания или люминесцентных ламп и др.), наблюдателя (отличающегося чувствительностью световоспринимающих элементов либо углом зрения $/2^\circ$ или 10° /), а также размеров, формы и структуры изделия (металл, бумага, ткань и др.) и т. п. влечет за собой изменение воспринимаемого цветового стимула. Это является одним из факторов, затрудняющих репродукцию цвета при смене номенклатуры изделий либо технологии их окрашивания.

1. Постановка задачи исследования. Фактором, затрудняющим воспроизведение регламентированного цвета защитно-декоративным покрытием (ЗДП), является нередкое задание требуемого цветового стимула изображением либо на экране монитора, либо в напечатанном виде, либо в виде окрашенного образца, а также возможностью сопоставления визуально воспринимаемого фотографического оформления реального изделия с отображенными электронными и печатными средствами массовой информации. Это обусловлено тем, что RGB- и CMYK-данные (для светящихся поверхностей типа экранов ЭЛТ, ЖКИ или цветных ламп обычно применяется аддитивная цветовая система RGB, а для отражающих поверхностей, например типографских красок, пленок и несветящихся экранов, обычно используется субтрактивная система

цветов CMY/K/) являются аппаратными данными, мало что говорящими о цветовых ощущениях без привязки к конкретному цветовоспроизводящему устройству. Необходимо отметить, что под цветовоспроизводящим устройством следует понимать не только сам аппарат, но и весь комплекс факторов, которые могут повлиять на цветовоспроизведение. Так, например, для монитора (помимо яркости, контраста и цветности фосфоров) – это цветовая температура белой точки, другие параметры настройки управляющей электроники, видеокарта и ее программное обеспечение; для принтера – это свойства запечатываемого материала (в частности, белизна, глянец и текстура бумаги), свойства красок, система программного управления (драйвер принтера или самостоятельный RIP), а для офсетного печатного станка – это еще аппараты и программное обеспечение для получения печатных форм. Более того, данные, полученные с помощью устройств оцифровки изображения цвета изделия с ЗДП (например, цифровых фотокамер или сканеров), также не являются данными о цвете, а представляют собой массив аппаратных данных. Они включают всю совокупность параметров цветорегистрирующего устройства (характеристики оптической системы, цветорегистрирующие свойства ПЗС-линейки или ПЗС-матрицы, программное обеспечение, условия освещения при фотографировании и т. д.), сказывающиеся впоследствии на цветовоспроизведении.

Добиться толерантного совпадения цветов, полученных на разных цветовоспроизводящих устройствах (в том числе и наносящих ЗДП плазменно-вакуумными методами) и описанных с помощью разных цветовых моделей, можно используя только один количественный способ – обеспечить равенство их цветовых координат.

2. Методы исследования. Известно [1], что воспринимаемый цветовой стимул несамосвещающегося (отражающего) нелюминисцирующего объекта определяется спектральным распределением энергии излучения $E(\lambda) \cdot R(\lambda)$, достигающего глаза наблюдателя, светочувствительные характеристики приемников излучения которого стандартизованы и табулированы так называемыми функциями сложения (обозначаемыми,

например, $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ в базовой системе МКО Y_{xy} :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = k \sum_{i=1}^n R(\lambda_i) \cdot E(\lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{bmatrix};$$

$$k = 100 / \sum_{i=1}^n R(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i),$$

где $E(\lambda_i)$ – энергетическое распределение освещающего излучения, i – число интервалов, на которые разделена видимая область спектра.

Единственный независимый от условий наблюдения и непривязанный к конкретному цветовоспроизводящему устройству параметр, в цифровом виде однозначно характеризующий защитно-декоративное покрытие (ЗДП) как цветоформирующий слой – это спектральный коэффициент отражения (СКО) $R(\lambda)$. Он определяется как отношение интенсивностей отраженного от поверхности изделия светового потока к падающему для видимого диапазона (380–780 нм) электромагнитных волн.

Таким образом, знание $R(\lambda)$ позволяет задавать необходимые компонентно-композиционные параметры ЗДП для воспроизведения требуемого цветового стимула, воспринимаемого наблюдателем.

В этой связи определение СКО по известным цветовым характеристикам (т. е. обратное преобразование /декодирование/) является необходимым этапом при плазменно-вакуумных методах синтеза ЗДП. Однако математическое выражение обратного преобразования отсутствует, так как одинаковые значения цветовых характеристик могут быть получены с помощью отличающихся кривых отражения.

Поскольку энергия излучения, достигающего глаза наблюдателя $E(\lambda) \cdot R(\lambda)$, и функции сложения $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ не зависят друг от друга, очевидно, что значения соответствующих координат цвета $[X, Y, Z]$ могут быть одинаковыми при различных сочетаниях величин сомножителей, причем теоретически таких сочетаний существует бесчисленное множество. Следовательно, в принципе всегда можно найти как минимум два образца с разными спектральными коэффициентами отражения, но имеющими одинаковый цвет при идентичных условиях наблюдения (одном и том же наблюдателе и спектральном составе источника освещения), т. е. любому немонахроматическому стимулу всегда можно подобрать тождественные по цвету стимулы других спектральных составов. Это свойство цветоприятия человека называется колориметриче-

ским метамеризмом [3] и позволяет достигать совпадения цветовых ощущений без тщательного подбора идентичности спектрального состава отраженного образца света. Поскольку равенство цветовых координат означает равенство цветовых ощущений, то репродуцирование требуемого цвета может быть выполнено формированием спектрального коэффициента ЗДП, обеспечивающего для одинаковых условий наблюдения регламентированные цветовые координаты. Однако если поставлена задача воспроизведения заданного цвета для разных условий наблюдения, то в большинстве случаев сравниваемые объекты должны иметь идентичные спектральные коэффициенты отражения, т. е. быть изомерными.

3. Результаты и их обсуждение. В общем случае тождественность соответствующих цветовых координат возможна при метамеризме приемников излучения (наблюдателя), различающихся спектральной чувствительностью регистрационных каналов (триады функций сложения), но дающих одинаковые значения соответствующих цветовых координат для излучений с совпадающим спектром, что может быть записано в виде равенств:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = k \sum_{i=1}^n R_i(\lambda_i) \cdot E_i(\lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{cases} k \sum_{i=1}^n R_2(\lambda_i) \cdot E_1(\lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{bmatrix} \\ k \sum_{i=1}^n R_1(\lambda_i) \cdot E_2(\lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{bmatrix} \\ k \sum_{i=1}^n R_1(\lambda_i) \cdot E_1(\lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}'(\lambda_i) \\ \bar{y}'(\lambda_i) \\ \bar{z}'(\lambda_i) \end{bmatrix} \end{cases}$$

Степень метамеризма оценивается с помощью параметра, называемого «индекс метамеризма»:

– общие индексы метамеризма представляют собой характеристики, определяющие метамерность двух цветовых стимулов, идентичных в одинаковых условиях наблюдения, включающих спектральные зависимости излучения источника освещения и чувствительности наблюдателя;

– специальные индексы метамеризма рассчитываются отдельно для источника излучения $E(\lambda)$, либо для спектральной функции объекта $R(\lambda)$.

Следует также отметить, что помимо колориметрического метамеризма зачастую имеет место несовпадающий с ним визуальный метамеризм, который может быть вызван как особенностями наблюдения сравниваемых объектов, так и психофизическими явлениями, например эффектом константности цветовосприятия [4]. Последнее определяется как «приблизительное постоянство воспринимаемого цвета объекта, несмотря на смену внешнего освещения, приводящего к изменениям в интенсивности и спектральном составе результирующего света, стимулирующего зрение».

Однако для большинства технологических приложений решение задачи конструирования СКО по известным цветовым характеристикам, по-видимому, может сводиться к нахождению хотя бы одной из кривых отражения, формирующей цветовой стимул, колориметрически метамерный по отношению к тестовому.

Разработке методов синтеза виртуальных колориметрически метамерных цветов посвящено большое количество работ (см., например, [1, 5]). Однако их результаты в ряде случаев, в частности при высокой чистоте цвета, трудно применимы на практике, так как обычно требуют либо использования сложного математического аппарата, либо рассчитанная кривая отражения характеризуется многочисленными резкими изломами [6], либо не гарантируют для всех длин волн λ реализации ограничения

$$0 \leq R_m(\lambda) \leq 1.$$

В этой связи нами была рассмотрена возможность применения одной из стандартных процедур нелинейной оптимизации, в частности симплексного метода Нелдера – Мида (поиска по деформируемому многограннику) [7] минимизации функции многих переменных с ограничениями, для расчета технологически приемлемых значений $R(\lambda)$ ПВ ЗДП на основе заданного набора координат цвета. Целевая функция F записывалась как минимум суммы квадрата разности между начальным и конечным СКО [8]:

$$F = \min \left\{ \sum_{i=1}^m [R_m(\lambda_i) - R_0(\lambda_i)]^2 \right\}$$

при ограничениях

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m - X_0 \\ Y_m - Y_0 \\ Z_m - Z_0 \end{bmatrix} =$$

$$= k \sum_{i=1}^m [R_m(\lambda_i) - R_0(\lambda_i)] \cdot E(\lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{bmatrix}$$

$$= k \sum_{i=1}^m \Delta R(\lambda_i) \cdot E(\lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{bmatrix},$$

и

$$-R_0(\lambda) \leq [R_m(\lambda) - R_0(\lambda)] \leq 1 - R_0(\lambda),$$

где X_0, Y_0, Z_0 – координаты цвета тестового образца при регламентированных условиях наблюдения (например, для излучения D65 и стандартного наблюдателя МКО 1931 г. с углом зрения 2°), $R_m(\lambda)$ – текущее (конечное) значение СКО, для которого координаты цвета X_m, Y_m, Z_m определены соотношением (1), $31 \geq m = i \geq 1$ при $400 \text{ нм} \leq \lambda \leq 700 \text{ нм}$.

В качестве начальной (стартовой) использовалась кривая СКО $R(\lambda)$ образца с координатами цвета $[X_p, Y_p, Z_p]$ из набора Munsell ColorChecker Charts (всего 24 образца) или атласа Манселла (всего 1269 образцов), цветовое отличие которого было минимально относительно регламентированного:

$$\min \left\{ \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} \right\} =$$

$$= \min \left\{ \sqrt{(X_0 - X_p)^2 + (Y_0 - Y_p)^2 + (Z_0 - Z_p)^2} \right\}.$$

Кроме того, в качестве стартового $R(\lambda)$ использовался также СКО оптимального фильтра Шредингера, рассчитанный для доминирующей длины волны λ_d и яркости Y_0 , соответствующих цветовым характеристикам тестового образца [9].

В качестве тестовой использовались одна из кривых отражения $R(\lambda)$ и цветовые характеристики (координаты цвета X_0, Y_0, Z_0 при условиях наблюдения $C/2^\circ$) золотосодержащих соединений [10].

На рис. 1 представлены спектральные коэффициенты отражения сплава AuCu/50 ($X_0 = 73,36, Y_0 = 69,54, Z_0 = 44,58; 6,96YR 8,8/4,7; \lambda_d = 583 \text{ нм}, p = 36,4\%$) (1), образца с цветовыми координатами 2,9YR 6,7/11 (Hue Value/Chroma) по атласу Манселла (3) и синтезированного по нему виртуального образца (2), метамерного к сплаву, а на рис. 2 – спектральные коэффициенты отражения этого же сплава (3), оптимального фильтра Шредингера с доминирующей длиной волны $\lambda_d = 583 \text{ нм}$ и яркостью $Y_{m=1} = 69,54$, тождественными сплаву (1), и синтезированного по нему виртуального образца (2), метамерного к золотосодержащей композиции.

Полученные результаты показали возможность применения описанного метода для проектирования значений $R(\lambda)$ плазменно-вакуумных ЗДП на основе заданного набора координат цвета.

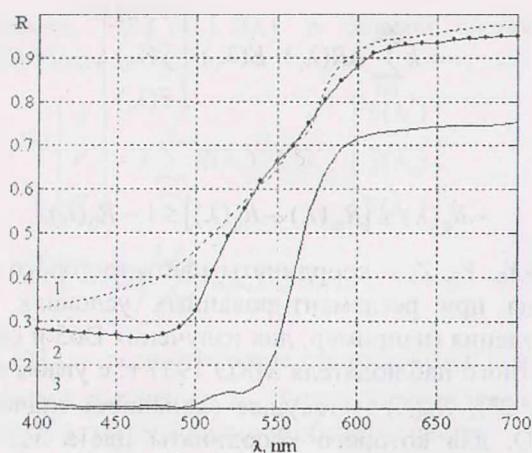


Рис. 1. Спектральные коэффициенты отражения сплава AuCu/50 (1), образца с характеристиками 2,9YR 6,7/11 (Hue Value/Chroma) по атласу Манселла (стартовая кривая) (3) и синтезированного по нему виртуального образца (2), колориметрически метамерного к золотосодержащей композиции

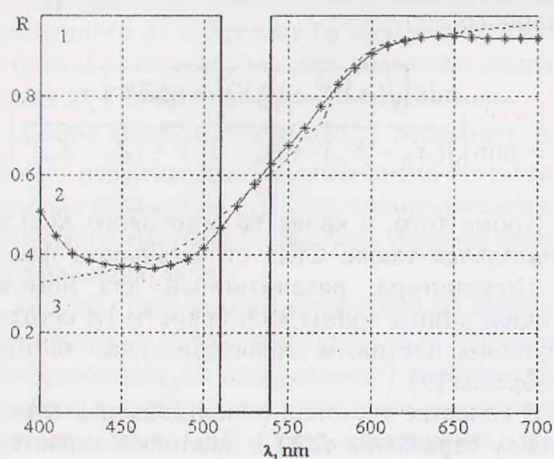


Рис. 2. Спектральные коэффициенты отражения сплава AuCu/50 (3), оптимального фильтра Шредингера с λ_d и Y , идентичными сплаву (1), и синтезированного по нему виртуального образца (2), колориметрически метамерного к золотосодержащей композиции

Выводы. 1. Разработан метод репродукции цвета плазменно-вакуумными защитно-декоративными покрытиями, основанный на метамерном аддитивном принципе колориметрии цветовых стимулов.

2. Показано, что симплексный метод Нелдера – Мида минимизации функции многих переменных позволяет определить технологически приемлемое значение СКО на основе заданного набора координат цвета и цветности. При этом в качестве стартового приближения может быть использован СКО оптимального фильтра Шредингера, рассчитанный для доминирующей длины волны и яркости, соответствующих колориметрическим характеристикам тестового объекта.

Литература

1. Джадд, Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М.: Мир, 1978. – 592 с.
2. Юстова, Е. Н. Цветовые измерения в НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» / Е. Н. Юстова // Измерительная техника. – 1985. – № 6. – С. 20–21.
3. Wyszecki, G. Evaluation of metameric colors / G. Wyszecki // J. Opt. Soc. Am. – 1958. – V. 48, N 7. – P. 451–454.
4. Tiplitz-Blackwell, K. Quantitative studies of color constancy / K. Tiplitz-Blackwell, G. Buchsbaum // J. Opt. Soc. Am. A. – 1988. – V. 5, N 10. – P. 1772–1780.
5. Worthey, J. A. Calculation of metameric reflectances / J. A. Worthey // Color Res Appl. – 1988. – V. 13, N 1. – P. 76–84.
6. Van Trigt, C. Metameric blacks and estimating reflectance / C. Van Trigt // J. Opt. Soc. Am. A. – 1994. – V. 11, N 3. – P. 1003–1024.
7. Wang, G. Improving the Hawkyard method for generating reflectance functions / G. Wang, C. Li, M. R. Luo // Color Res. Appl. – 2005. – V. 30, N 4. – P. 283–287.
8. Фиакко, А. Нелинейное программирование: Методы последовательной безусловной минимизации / А. Фиакко, Г. Мак-Кормик – М.: Мир. – 1972. – 240 с.
9. Ohta, N. Generating metameric object colors / N. Ohta // J. Opt. Soc. Am. – 1975. – V. 65, N 9. – P. 1081–1082.
10. Агеев, В. А. Цветовые характеристики золотосодержащих систем / В. А. Агеев, А. К. Вершина // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. – Минск: Экоперспектива. – 2006. – С. 469–479.