

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ЭТАЛОНОВ ЦВЕТОВ В МИКРОСКОПИИ

Е.В. Клопов

klopovev@student.bmstu.ru

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация*

Представлены методы расчета однослойных и многослойных оптических покрытий. Рассмотрена зависимость цвета оптического излучения от длины волны. Объяснен выбор эталонных длин волн для красного, зеленого и синего цветов. Описан вид структуры, полученной в моделируемой программе, и приведены результаты расчета зависимости коэффициента пропускания от длины волны. Показан пример искажения цвета гальванического покрытия никеля на железе. Сделан вывод, что полученные результаты можно применять на практике для получения фильтров оптического микроскопа, обеспечивая повышение точности цветопередачи и качества визуализации.

**Ключевые слова:** оптическая микроскопия, ПЗС-матрица, однослойные системы, многослойное покрытие, длина волны, эталон цвета, OpenFilters, показатель преломления

**Введение.** В настоящее время оптическую микроскопию применяют во многих областях, например: в медицине, в биологических науках, а также для анализа поверхностей твердых тел. Важно получить достоверную картину исследуемого образца, однако не во всех микроскопах есть откалиброванная ПЗС-матрица и камера, хорошо передающая цвета. Аббревиатура ПЗС расшифровывается как «прибор с зарядовой связью» (в англоязычной терминологии CCD — Charge Coupled Device) [1]. Это полупроводниковая светочувствительная пластина, поделенная электрическим способом на части — пиксели.

Цель работы — моделирование оптических фильтров на объектив для выделения конкретного эталонного цвета на камере микроскопа.

**Постановка задачи.** Проектирование покрытий включает анализ и синтез [2]. Анализ позволяет вычислить коэффициенты  $T$  и  $R$  для готовой структуры. С помощью синтеза для требуемых характеристик подбирают структуру, что сложнее из-за нелинейных уравнений. Аналитически такие уравнения решаются только для простых случаев.

В расчетах однослойных систем (рис. 1) при нормальном падении света на границу раздела  $n_0-n_m$ , на которой расположен изотропный однородный бесконечно протяженный слой с оптической толщиной  $n_1d_1$  и фазовой толщиной  $\varphi_1$ , используют приведенные ниже формулы.

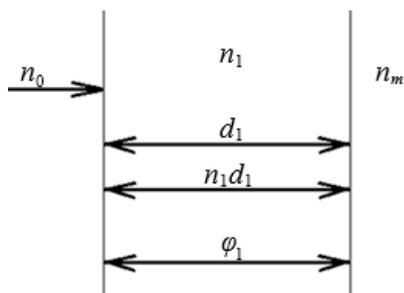


Рис. 1. Однослойная оптическая система [3]

Амплитудный коэффициент отражения

$$r = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22}) + i(n_0 n_m m_{12} + m_{21})},$$

где  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{21}$ ,  $m_{22}$  — элементы характеристической матрицы

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \varphi_j & \frac{i}{n_j} \sin \varphi_j \\ i n_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты отражения и пропускания соответственно равны:

$$R = |r|^2 = \frac{(n_0 m_{11} - n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} - m_{21})^2}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2};$$

$$T = \frac{4n_0 n_m}{(n_0 m_{11} + n_m m_{22})^2 + (n_0 n_m m_{12} + m_{21})^2}.$$

При расчетах многослойного покрытия (рис. 2) характеристическая матрица является произведением характеристических матриц его слоев:

$$M = M_m M_{m-1} \cdots M_1.$$

**Цвет света.** Когда все волны длиной от 380 до 780 нм попадают в глаз в определенных, почти равных количествах, мы получаем ощущение бесцветного (белого) света (см. таблицу). Если рассматривать монохроматическое излучение, то каждому цвету будет соответствовать свой диапазон длин волн оптического спектра.

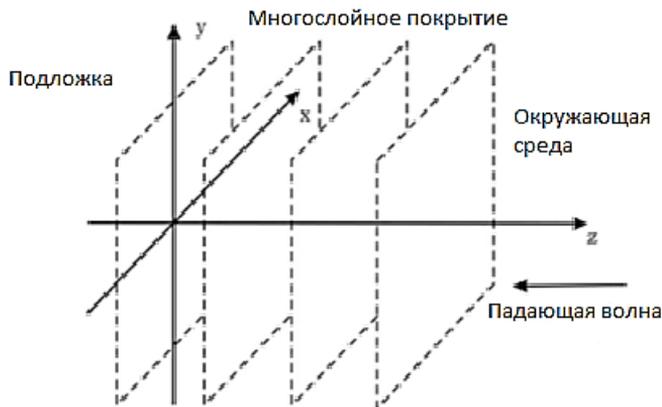


Рис. 2. Многослойная модель оптической системы

Зависимость между длиной волны излучений и вызываемыми ими ощущениями цвета [4]

Цвет	Длина волны монохроматических излучений, нм	Ширина участка спектра, нм
Красный	780–620	160
Оранжевый	620–585	35
Желтый	585–575	10
Желто-зеленый	575–550	25
Зеленый	550–510	40
Голубой	510–480	30
Синий	480–450	30
Фиолетовый	450–380	70

Эталонными являются красный, зеленый, синий, с длинами волн равными 700, 546,1 и 435,8 нм соответственно. Выбор основных длин волн 546,1 и 435,8 нм обусловлен их доступностью в виде стабильных и воспроизводимых монохроматических линий, излучаемых ртутным разрядом. Длина волны 700 нм, несмотря на трудности с ее точным воспроизведением в 1931 г., была выбрана по причине низкой чувствительности человеческого глаза к небольшим изменениям длины волны в этой области спектра, что минимизировало влияние погрешностей на результаты измерений [5]. При объединении пар этих трех цветов можно получить также малиновый, голубой и желтые цвета. При разном соотношении каждого из этих цветов можно получить все возможные оттенки.

**Цветовое пространство Международной комиссии по освещению.** Цветовое пространство CIE 1931, определяющее взаимосвязь человеческого зрения и чистого цвета световой волны, было введено Международной комиссией по освещению [6, 7]. Диаграмма цветности представляет собой координатную плоскость со значениями от 0 до 0,8. Оно включает в себя XYZ-модель, диаграмму цветности и функции сложения цветов [8].

**Моделирование покрытий.** Моделирование и расчет пропускательной способности были проведены в программе OpenFilters 1.1 (рис. 3–8). Главная задача моделирования — обеспечить в диапазоне длин волн максимальный коэффициент пропускания света, отвечающий за эталонный цвет.

Структуру покрытия можно записывать комбинацией параметров  $H$  и  $L$ , отвечающими за материал с высоким (high) и низким (low) показателями преломления. В основном в качестве материалов покрытий используются пленки оксидов, в [9] описаны их свойства и расчетные характеристики.

Для красного фильтра (рис. 3, 4) материал  $TiO_2-H$ ,  $SiO_2-L$ . Подложка сделана из кварцевого стекла. Опорная длина волны 700 нм. Свет неполяризованный, угол падения к поверхности  $0^\circ$ .

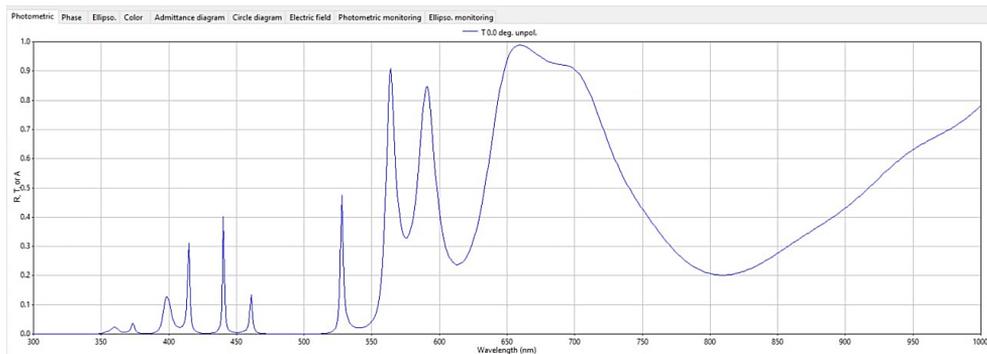


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания красного фильтра от длины волны

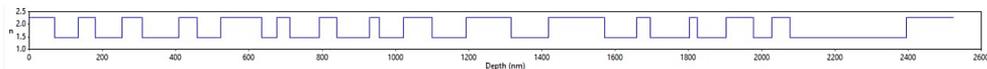


Рис. 4. Топология поверхности красного фильтра

Для зеленого фильтра (рис. 5, 6) материал  $TiO_2-H$ ,  $SiO_2-L$ . Подложка сделана из кварцевого стекла. Опорная длина волны 546,1 нм. Свет неполяризованный, угол падения к поверхности  $0^\circ$ .

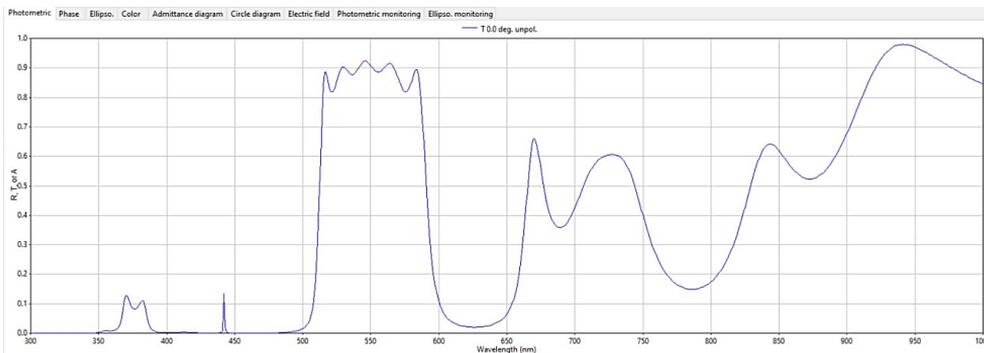


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропускания зеленого фильтра от длины волны

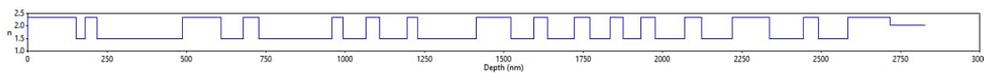


Рис. 6. Топология поверхности зеленого фильтра

Для синего фильтра (рис. 7, 8) материал  $TiO_2-H$ ,  $SiO_2-L$ . Подложка сделана из кварцевого стекла. Опорная длина волны 435,8 нм. Свет неполяризованный, угол падения к поверхности  $0^\circ$ .

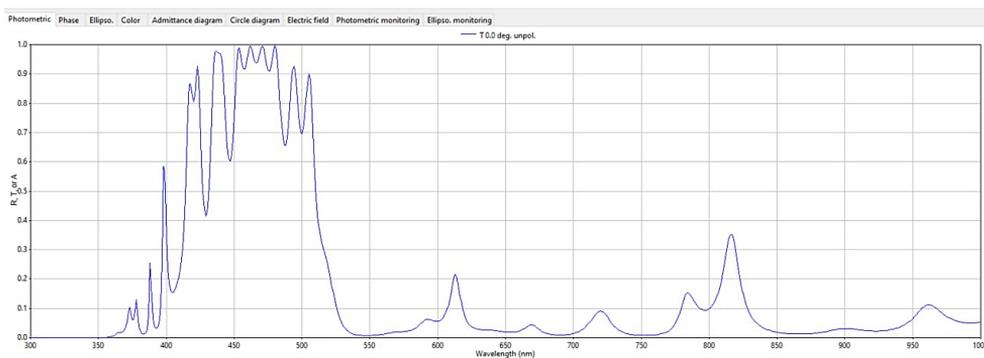


Рис. 7. Зависимость коэффициента пропускания синего фильтра от длины волны

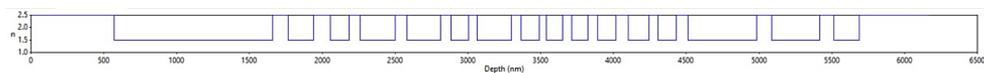


Рис. 8. Топология поверхности синего фильтра

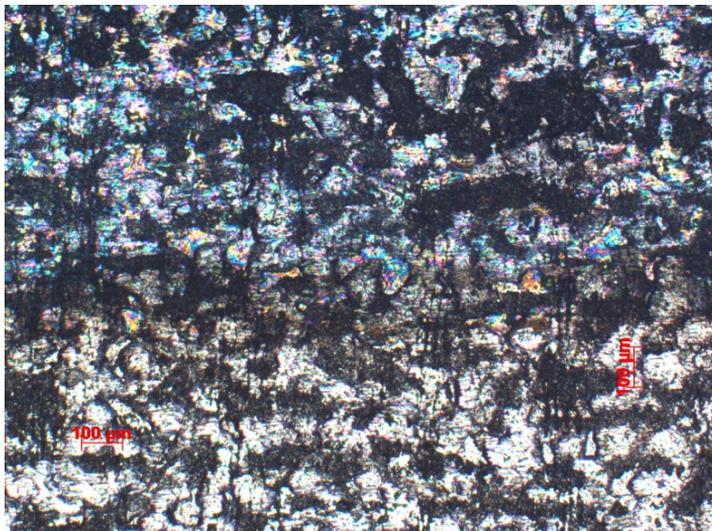


Рис. 9. Покрытие из никеля на железе

Построенные модели могут помочь в микроскопии тем, что полученные изображения образцов, снятые с использованием полученных фильтров, не будут иметь искажения цветов. Это значительно улучшит диагностику различных компонентов.

Цвет химического никелевого покрытия — серый с желтым оттенком [10]. Зная качество материала, можно оценить цветопередачу микроскопа. На рис. 9 цвет передан слегка некорректно, что говорит о необходимости фильтра для используемого аппарата.

**Заключение.** В данной работе были рассмотрены методы расчета однослойных и многослойных покрытий. Приведены результаты моделирования оптических фильтров вместе с топологией полученной структуры. Показано искажения цвета при съемке образца без калибровки. Полученные результаты можно использовать на практике для получения фильтров оптического микроскопа.

## Литература

- [1] Колбин А.И., Николаева Е.А. *ПЗС-фотометрия переменных звезд*. Казань, Казан. ун-т, 2023, 74 с.
- [2] Машин А.И., Ершов А.В., Грачев Д.А. *Задачи синтеза и анализа в проектировании многослойных оптических покрытий: практикум*. Н. Новгород, ННГУ, 2014, 35 с.

- [3] Путилин Э.С. *Оптические покрытия*. Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО, 2010, 227 с.
- [4] Рубаник В.В., Лаппо Н.М. *Р 82 Основы теории цвета*. Витебск, УО «ВГТУ», 2009, 105 с.
- [5] Христов А.А. Колориметрические системы МКО и их анализ. *Теория и практика современной науки*, 2017, № 3 (21), с. 815–823.
- [6] Горбунова Е.В., Чертов А.Н. *Типовые расчеты по колориметрии источников излучения*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2014, 90 с.
- [7] ГОСТ Р 52489–2005. *Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Часть 1. Основные положения*. Москва, Стандартинформ, 2006, 10 с.
- [8] Гуревич М.М. *Цвет и его измерение*. Москва, Ленинград, Изд-во Акад. наук СССР, 1950, 268 с.
- [9] ] Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбулин И.Б. *Интерференционные покрытия для оптического приборостроения*. Казань, ФЭН, 2002, 592 с.
- [10] ГОСТ 9.301–86. *Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллическое неорганические. Общие требования*. Москва, Стандартинформ, 2010, 15 с.

**Поступила в редакцию 31.05.2025**

**Клопов Егор Вячеславович** — студент кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Сагателян Гайк Рафаэлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии приборостроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Клопов Е.В. Моделирование многослойных оптических фильтров для эталонов цветов в микроскопии. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/las/1075.html>

## MODELING MULTILAYER OPTICAL FILTERS FOR COLOR STANDARDS IN MICROSCOPY

E.V. Klopov

klopovev@student.bmstu.ru

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

Methods for calculating single-layer and multilayer optical coatings are presented. The dependence of the color of optical radiation on the wavelength is considered. The choice of wavelength ranges for red, green, and blue colors is explained. The type of structure obtained in the simulated program is described, and the results of calculating the dependence of the transmission coefficient on the wavelength are presented. An example of the color distortion of a nickel electroplating on an iron is shown. It is concluded that the obtained results can be applied in practice for optical microscope filters, providing improved color accuracy and visualization quality.

**Keywords:** optical microscopy, CCD matrix, single-layer systems, multilayer coating, wavelength, color standard, OpenFilters, refractive index

---

***Received 31.05.2025***

**Klopov E.V.** — Student of Department of Instrumentation Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Sagatelian G.R., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Instrumentation Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Klopov E.V. Modeling multilayer optical filters for color standards in microscopy. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/iemim/las/1075.html>