

УДК 621.383.4

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВЕТОФИЛЬТРЫ

Тан Тай До, Л.А. Губанова

Представлена методика поиска оптимальной конструкции металлодиэлектрического интерференционного светофильтра и факторы, влияющие на спектральные характеристики металлодиэлектрического интерференционного светофильтра.

Ключевые слова: светофильтр, фильтр Фабри–Перо, металлодиэлектрический фильтр.

Введение

Узкополосные металлодиэлектрические светофильтры находят свое применение в различных отраслях науки и техники: в медицинских приборах, принцип действия которых основан на анализе структуры биологического материала на заданной длине волны; в экологических устройствах, оценивающих состав атмосферы по пропусканию одной или нескольких длин волн, в пищевой промышленности, когда анализ качества продукции основывается на анализе спектра отраженного излучения; в точном приборостроении; в фотолитографии; в приборах наблюдения; и т.д.

Основная проблема разработки конструкции и изготовления металлодиэлектрических светофильтров заключается в том, что в литературе:

- практически отсутствует методика выбора конструкций светофильтров, которая позволила бы создавать светофильтры с заданными характеристиками (максимальным коэффициентом пропускания на заданной длине волны, полушириной и контрастностью);
- нет данных о влиянии отклонений в параметрах слоев, формирующих светофильтр, на его эксплуатационные характеристики.

В работе рассмотрена возможность создания программы проектирования структуры металлодиэлектрических светофильтров с оптимальной конструкцией, а также анализ влияния конструкции металлодиэлектрического фильтра (толщины слоев металла и диэлектрика, показатели преломления и коэффициенты поглощения, формирующих светофильтр) на его выходные характеристики (полуширину, значения максимального пропускания, положения длины волны в максимуме).

Теоретический анализ

Узкополосные металлодиэлектрические светофильтры строятся на основе интерферометра Фабри–Перо, схематически их конструкции можно изобразить в следующем виде (рис. 1): зеркало – разделительный слой – зеркало – подложка (З – Р – З – П). В качестве зеркала чаще всего используются тонкие слои одного из двух металлов – серебра для видимой и инфракрасной области и алюминия для ультрафиолетовой области [1] спектра, разделительный слой формируется из диэлектрического материала, прозрачного в рабочей области спектра. Иногда, для защиты фильтра от воздействия окружающей его среды, он заклеивается между двумя стеклянными пластинами.

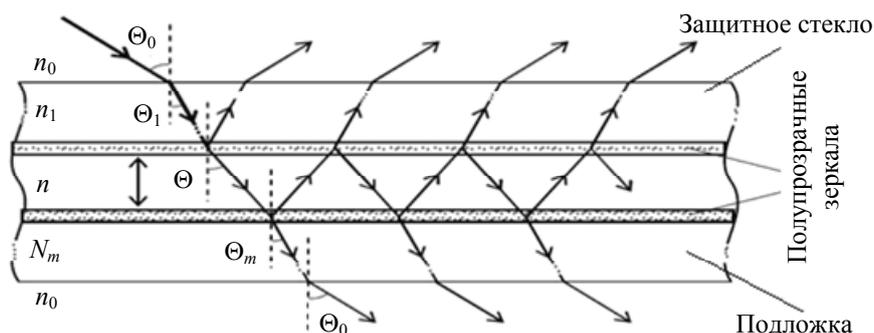


Рис. 1. Схема узкополосного интерференционного фильтра

Длина волны в максимуме, согласно [2], определяется следующим выражением:

$$\lambda_{\max} = \frac{2nd \cdot \cos \theta}{k - \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\pi}},$$

где k – порядок фильтра; n и d – показатель преломления и геометрическая толщина разделительного слоя; ρ_1 и ρ_2 – скачки между падающим и отражающим пучками на границах между первым и вторым зеркалами с разделительным слоем; θ – угол преломления в разделительном слое, если свет падает на фильтр нормально к ее поверхностям, то $\theta = 0$. Максимальное пропускание равно [2]

$$T_{\max} = \frac{T_p \cdot T^2}{(1 - T_p \cdot R)^2},$$

где T_p – коэффициент пропускания разделительного слоя $T_p \approx 1$; T, R – коэффициенты пропускания и отражения зеркала.

$$T_{\max} = \frac{T^2}{(1 - R)^2}.$$

Минимальное пропускание равно [2]:

$$T_{\min} = \frac{T^2}{(1 + R)^2}.$$

Контрастность фильтра равна

$$C = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \left(\frac{1 + R}{1 - R} \right)^2.$$

Когда в зеркале присутствуют потери, что вызывается наличием поглощения в металле, $T + R \neq 1$. Величина, которая определяется выражением $A = 1 - (T + R)$, называется коэффициентом поглощения.

$$T_{\max} = \left(1 + \frac{A}{T} \right)^{-2}.$$

Существенной характеристикой фильтра является полуширина, которая определяется следующим образом [2]:

$$\delta\lambda_{0,5} = \frac{\lambda_{\max} \cdot (1 - R)}{[k\pi - (\rho_1 + \rho_2) \cdot \sqrt{R}]}.$$

Анализируя последнее выражение, можно сделать вывод, что полуширина фильтра тем уже, чем выше коэффициент отражения зеркал, формирующих фильтр (R), порядок фильтра (k), чем больше скачки фаз между падающим и отражающим пучками при отражении от зеркальных покрытий.

Более подробную информацию о терминологии, используемой в определении узкополосных фильтров можно найти в [1–5]. В настоящей работе для определения толщины металлического слоя зеркала используется «метод подбора». Суть метода состоит в том, что необходимо выбрать такую толщину металлического слоя, формирующего зеркало, при которой коэффициент отражения зеркала стремится к максимальному значению, а коэффициент пропускания зеркала стремится к минимальному значению, но не равен нулю.

Факторы, влияющие на характеристики интерференционных фильтров

В работе представлено несколько разработанных авторами методов поиска оптимальной толщины металлических слоев, формирующих светофильтр, толщины разделительного слоя и его химического состава. Особое внимание при поиске оптимальной конструкции светофильтра отводилось учету влияния скачка фаз на границе металл–диэлектрик. Все поиски осуществлялись при наличии дисперсии пленкообразующих материалов.

Поиск указанных величин базировался на анализе и обобщении данных по использованию различных структур фильтрующих покрытий, характерных для приборостроения, численных методах определения выходных параметров интерференционных металлодиэлектрических светофильтров, методах оптимизации конструктивных параметров металлодиэлектрических светофильтров по структуре и выходным параметрам.

Влияние толщины металлического слоя зеркала на характеристики фильтра. Из рис. 2 видно, что увеличение толщины металлического слоя зеркала приводит к увеличению максимального коэффициента пропускания и к сужению полуширины. Положение длины волны в максимуме почти не изменяется.

Влияние показателя преломления подложки на характеристики фильтра. На рис. 3 представлены спектральные зависимости коэффициента пропускания фильтра одной конструкции при их формировании на подложках с разным показателем преломления. Как видно из рисунка, с увеличением показателя преломления подложки коэффициент максимального пропускания уменьшается, полуширина незначительно сужается, положение длины волны в максимуме не изменяется.

Влияние показателя преломления разделительного слоя на характеристики фильтра. На рис. 4, 5 показано влияние на максимальное пропускание (рис. 4, а), полуширину (рис. 4, б) и положение λ_{\max} (рис. 5) показателя преломления разделительного слоя (n_p) фильтра. С увеличением показателя преломления разделительного слоя максимальное пропускание падает, полуширина сужается, положение длины волны в максимуме смещается в длинноволновую область спектра при следующих параметрах

конструкции фильтра: $d_{Ag} = 48$ нм; показатель преломления подложки $n = 1,45$; толщина разделительного слоя $d_p = 305$ нм.

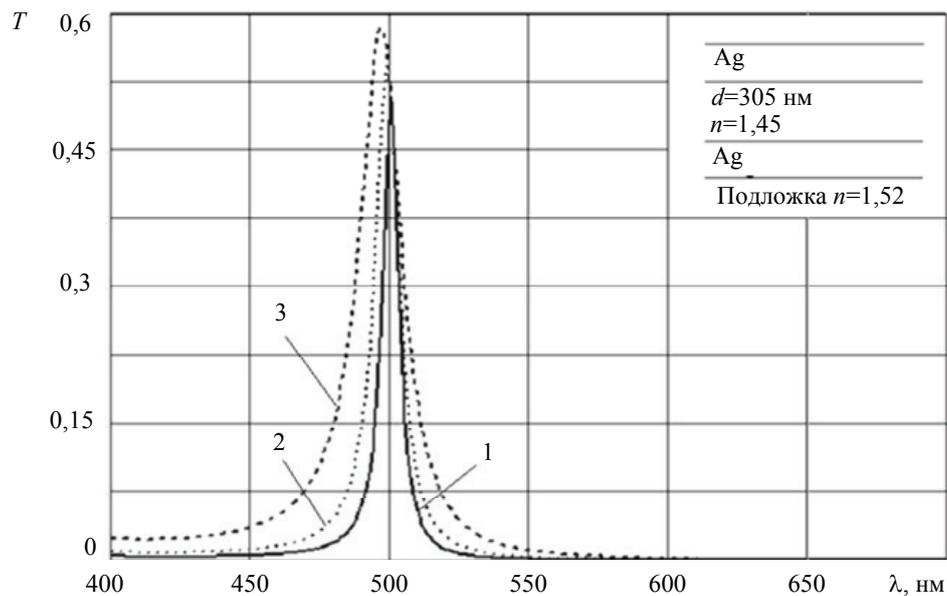


Рис. 2. Спектральные характеристики фильтров при различных толщинах металлического слоя, формирующего зеркало: 1 – 54 нм; 2 – 48 нм; 3 – 40 нм

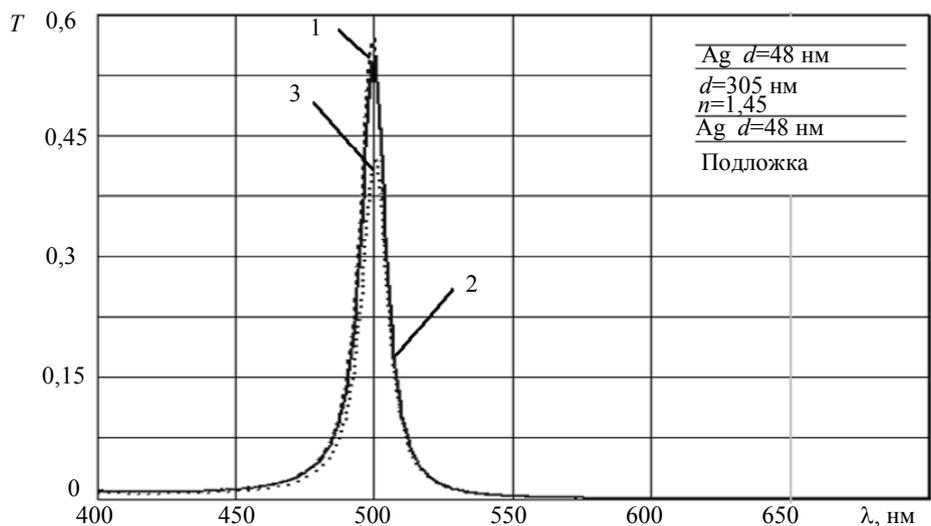


Рис. 3. Спектральные характеристики фильтров, сформированных на подложках с разным показателем преломления: 1 – $n_{\text{подл}}=1,45$; 2 – $n_{\text{подл}}=1,52$; 3 – $n_{\text{подл}}=1,95$

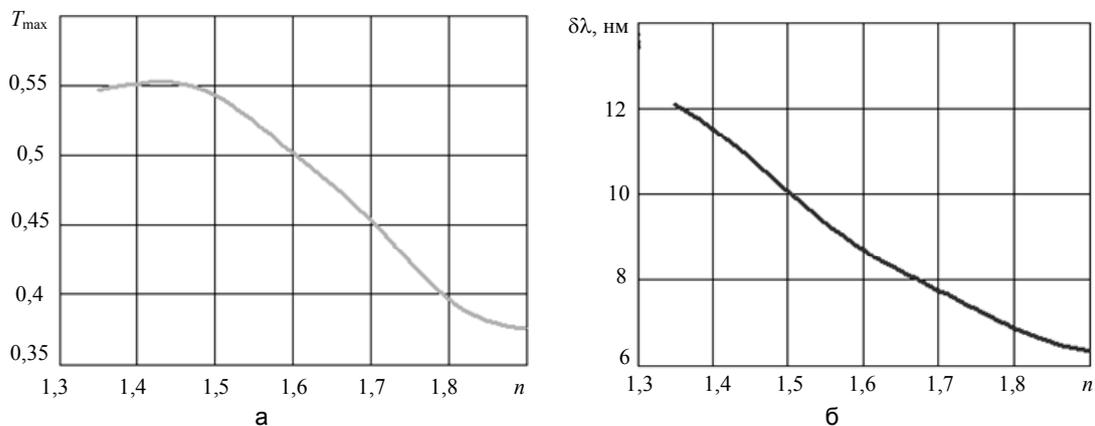


Рис. 4. Зависимости максимального пропускания (а) и полуширины (б) от показателя преломления разделительного слоя

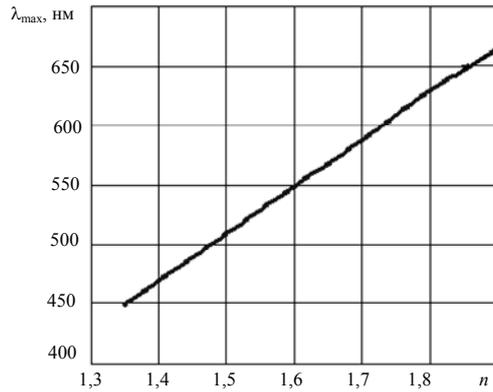


Рис. 5. Зависимость λ_{\max} от показателя преломления разделительного слоя

Результат исследований

В результате проведенных исследований была выбрана конструкция светофильтра ($d_{Ag}=48$ нм, подложки с $n=1,45$, толщина разделительного слоя $d_p=305$ нм, $n_p=1,45$), которая обеспечивает $T_{\max}=58\%$ на $\lambda_{\max}=500$ нм с полушириной $\delta\lambda=10$ нм. Спектральная характеристика такого фильтра представлена на рис. 6.

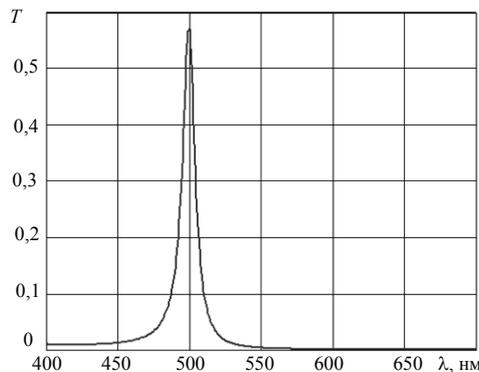


Рис. 6. Спектральная характеристика узкополосного фильтра на основе серебра

Заключение

Представленный в работе анализ влияния конструкций металлодиэлектрических светофильтров на его выходные параметры показал, что определяющим параметром является коэффициент отражения зеркал, формирующих светофильтр, т.е. толщина слоя металла и его природа. Структура подложки, состав разделительного слоя менее критичны при формировании металлодиэлектрического узкополосного фильтра. Отклонения толщин слоев, формирующих светофильтр, и их показателей преломления от расчетных в процессе формирования покрытий существенно искажают спектральное распределение коэффициента пропускания получаемого покрытия. Разработка методики корректировки толщины слоев в процессе изготовления светофильтров с целью получения заданных выходных параметров позволит получать светофильтры с заданными характеристиками.

Литература

1. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 223 с.
2. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. – М.: Высшая школа, 1966. – 555 с.
3. Путилин Э.С. Оптические покрытия. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 199 с.
4. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
5. Macleod H.A. Thin Film Optical Filters. – 4th ed. – Tucson: CRC, 2010. – 772 p.

До Тан Тай

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, tantaido@yahoo.com

Губанова Людмила Александровна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, la7777@mail.ru