

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 681.7.064.4+539.216:535.34

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ КАРДА ДЛЯ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

© 2009 г. И. С. Гайнутдинов*, доктор техн. наук; Р. Д. Алиакберов*, канд. техн. наук; Р. Р. Гареев*, А. В. Михайлов**, канд. техн. наук; Н. Г. Мирханов*

* НПО “Государственный институт прикладной оптики”, Казань

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

Подробно рассмотрена методика расчета полосовых фильтров с металлическим слоем и выяснены ее особенности и недостатки. Показано, что эта методика в общем случае не достаточна для проведения расчетов структуры фильтров и необходима ее модернизация, указанная в данной работе. Показано, что электрическое поле волны внутри покрытия выталкивается из слоя металла, что и обеспечивает получение малого поглощения фильтром.

Ключевые слова: теплоотражающий фильтр, металлодиэлектрическое покрытие, максимальная прозрачность.

Коды OCIS: 310.3840

Поступила в редакцию 30.10.2008

Наряду с полупроводниковыми пленками оксидов олова и индия уже давно нашли применение в качестве эффективных теплоотражающих фильтров металлодиэлектрические покрытия [1]. Расчет подобных систем слоев проводился подробным расписыванием рекуррентных формул [2] с очень громоздким анализом и обычными для синтеза диэлектрических покрытий методами – путем нахождения минимума целевой функции, представляющей разность заданной спектральной характеристики и рассчитанной по обычным формулам [3, 4]. Эти методы вполне пригодны для любых покрытий без поглощения и дисперсии, но недостаточно эффективны для металлодиэлектрических систем слоев. Для подобного вывода есть две причины. По физическим соображениям ясно, что для получения минимального поглощения слой металла должен располагаться в узле стоячей волны, что не учитывается в методах синтеза диэлектрических покрытий. Но именно это обстоятельство коренным образом отличает металлодиэлектрические покрытия от диэлектрических интерференционных систем. Для синтеза металлодиэлектрических покрытий наиболее разумно использовать теорию П.Г. Карда [5], позволяющую получить покрытия с заданными оптическими свойствами наиболее простыми методами при специальном выделении параметров металлического слоя. Достижение максимальной прозрачности возможно только в одной точке спектра, что исполь-

зуется как основное условие для определения толщины металлического и части диэлектрических слоев системы [5, 6] и только затем при необходимости проводится рассмотрение всех остальных условий задачи и, в частности, спектральных характеристик. Второй важной причиной недостаточной эффективности обычных методов синтеза оказывается сильная дисперсия, характерная для металлов, что в значительной мере затрудняет проведение синтеза покрытия по его спектру, так как диэлектрическая функция металла и, следовательно, дисперсия зависят от толщины слоя металла. В методах, основанных на результатах работы [5], учет дисперсии не нужен, так как все основное рассмотрение системы происходит для одной длины волны, соответствующей максимуму прозрачности.

В работе [7] была рассмотрена методика синтеза наиболее простых систем – теплоотражающих металлодиэлектрических интерференционных фильтров. В качестве теплоотражающего фильтра используется обычно простейшая интерференционная система [1], состоящая из двух согласующих слоев диэлектрика и помещенного между ними тонкого, частично прозрачного слоя металла. При этом считается, что диэлектрические слои изготавливаются из одного материала. Это вполне оправдано при изготовлении узкополосных фильтров [6], но в случае теплоотражающих систем приводит к изменению коэффициента отражения в длинноволновой области спектра,

так как используемые слои диэлектрических материалов (обычно это оксид титана) поглощают излучение в области спектра 8–15 мкм, которая и является основной рабочей областью. Поэтому возникает закономерный вопрос о возможности использования несимметричных систем слоев для получения теплоотражающего фильтра.

Будем считать, что излучение падает на трехслойную систему из среды с показателем преломления n_0 , равного 1. Показатели преломления диэлектрических слоев системы n_1 и n_2 , их толщины h_1 и h_2 , показатель преломления металлического слоя $n-ik$ и толщина h , а показатель преломления подложки положим равным n_3 . Высокое отражение от системы в длинноволновой области спектра появляется естественным образом за счет использования слоя металла при условии отсутствия (или малости) поглощения в верхнем слое диэлектрика, отражение же в рабочей области прозрачности будем считать малым. Если не ограничиваться случаем теплоотражающих фильтров, то следует считать, что за отражение и пропускание на границах диэлектрических слоев отвечают многослойные диэлектрические покрытия, что позволяет получить произвольные коэффициенты отражения и пропускания в области прозрачности. Естественным, что в общем случае не следует ожидать больших коэффициентов отражения от полной системы в длинноволновой области спектра, так как в слоях диэлектрического покрытия всегда есть поглощение в длинноволновой части спектра. В этом случае в длинноволновой области спектра малым оказывается пропускание за счет малой прозрачности металла, что позволяет осуществлять эффективную фильтрацию излучения. Отражение же будет снижаться из-за поглощения в диэлектрических

слоях тем сильнее, чем больше диэлектрических слоев оказывается поверх слоя металла.

В общем случае покрытие имеет вид, показанный на рис. 1. Обобщенные границы могут представляться многослойными диэлектрическими покрытиями, вырождающимися в частном случае фильтров, отсекающих длинноволновое излучение, в обычную границу между средами (воздух – первый согласующий слой и второй согласующий слой – подложка). Такое представление позволяет объединять рассмотрение любых металлодиэлектрических фильтров [6, 7].

Для проведения расчета свойств металлодиэлектрических фильтров обозначим через a_j отношение амплитудных отражения и прозрачности на j -ой границе, а через b_j – обратную величину амплитудной прозрачности на той же границе. Кроме того, введем обозначения

$$\begin{aligned} c_1 &= n^2 + k^2 + n_1^2, \quad c_2 = n^2 + k^2 - n_1^2, \\ c_3 &= n^2 + k^2 + n_2^2, \quad c_4 = n^2 + k^2 - n_2^2, \\ c_5 &= 2n_1(n^2 + k^2), \quad c_6 = 2n_2(n^2 + k^2), \\ c_7 &= (nk)/(n^2 + k^2), \quad c_8 = 4n_1n_2(n^2 + k^2), \\ c_9 &= 4n_1n_2n^2, \quad c_{10} = 4n_1n_2k^2, \quad c_{11} = ch \left(\frac{4\pi kh}{\lambda} \right), \\ c_{12} &= sh \left(\frac{4\pi kh}{\lambda} \right), \quad c_{13} = \cos \left(\frac{4\pi nh}{\lambda} \right), \\ c_{14} &= \sin \left(\frac{4\pi nh}{\lambda} \right). \end{aligned}$$

Эти обозначения позволяют выразить основные параметры металлического слоя, участвующие в описании оптических свойств полной рассматриваемой системы.

Коэффициенты пропускания и отражения системы можно записать в виде

$$1/T = \sum_{j=1}^4 A_j, \quad R/T = \sum_{j=1}^4 B_j. \quad (1)$$

Величины A_j и B_j выражаются через параметры системы.

$$\begin{aligned} A_1 &= b_1^2 b_2^2 f_1 + a_1^2 a_2^2 f_2 + a_1^2 b_2^2 f_3 + b_1^2 a_2^2 f_4, \\ A_2 &= a_2 b_2 \left[f_5 \cos z_2 + (a_1^2 + b_1^2) f_6 \cos(z_2 + z_3 - z_4) \right], \\ A_3 &= -a_1 b_1 \left[f_7 \cos z_1 + (a_2^2 + b_2^2) f_8 \cos(z_1 + z_5 - z_6) \right], \\ A_4 &= 2a_1 b_1 a_2 b_2 \left[f_9 \cos(z_1 + z_2 + z_7 - z_4 - z_6) + \right. \\ &\quad \left. + f_{10} \cos(z_1 - z_2 - z_8 + z_4 - z_6) \right], \\ B_1 &= a_1^2 b_2^2 f_1 + b_1^2 a_2^2 f_2 + b_1^2 b_2^2 f_3 + a_1^2 a_2^2 f_4, \\ B_2 &= -a_2 b_2 \left[f_5 \cos z_2 - (a_1^2 + b_1^2) f_6 \cos(z_2 + z_3 - z_4) \right], \\ B_3 &= A_3, \quad B_4 = A_4. \end{aligned} \quad (2)$$

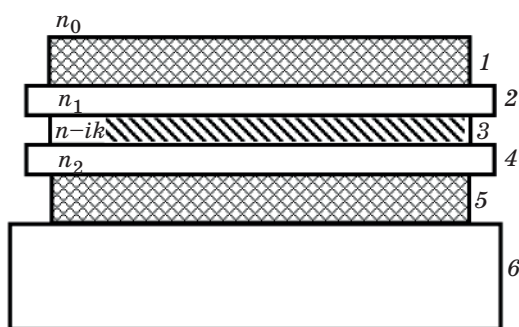


Рис. 1. Схема общего покрытия. Исходная среда (воздух). 1 – первая обобщенная граница покрытия, 2 – первый согласующий слой с показателем преломления n_1 , 3 – металлический слой, 4 – второй согласующий слой с показателем преломления n_2 , 5 – вторая обобщенная граница покрытия, 6 – подложка.

Здесь принято, как было указано ранее, что оптические параметры границ (коэффициенты отражения и пропускания) входят в систему как

$$a_j = (r_j/t_j)\exp[i(\Delta_j - \delta_j)], \quad b_j = (1/t_j)\exp[(-i\delta_j)],$$

где Δ_j и δ_j – сдвиги фаз при отражении и пропускании излучения через границу с номером j . В выражении (2) все эти величины входят только как модули, фазы же внесены в тригонометрические функции. Величины f_j – параметры системы, зависящие только от толщины и оптических свойств слоя металла. Так как часть величин f_j комплексна, то в выражение (2) входят их модули, а соответствующие фазы включены в тригонометрические функции. Величины f_j выражаются следующими формулами:

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{c_1 c_3 + c_9}{2c_8} c_{11} + \frac{c_1 n_2 + c_3 n_1}{c_8} n c_{12} - \\ &\quad - \frac{c_2 c_4 - c_{10}}{2c_8} c_{13} + \frac{c_2 n_2 + c_4 n_1}{c_8} k c_{14}, \\ f_2 &= \frac{c_1 c_3 + c_9}{2c_8} c_{11} - \frac{c_1 n_2 + c_3 n_1}{c_8} n c_{12} - \\ &\quad - \frac{c_2 c_4 - c_{10}}{2c_8} c_{13} - \frac{c_2 n_2 + c_4 n_1}{c_8} k c_{14}, \\ f_3 &= \frac{c_1 c_3 - c_9}{2c_8} c_{11} + \frac{c_1 n_2 - c_3 n_1}{c_8} n c_{12} - \\ &\quad - \frac{c_2 c_4 + c_{10}}{2c_8} c_{13} - \frac{c_2 n_2 - c_4 n_1}{c_8} k c_{14}, \\ f_4 &= \frac{c_1 c_3 - c_9}{2c_8} c_{11} - \frac{c_1 n_2 - c_3 n_1}{c_8} n c_{12} - \\ &\quad - \frac{c_2 c_4 + c_{10}}{2c_8} c_{13} + \frac{c_2 n_2 - c_4 n_1}{c_8} k c_{14}, \\ f_5 \exp iz_4 &= \frac{c_3}{c_6} k c_{14} + \frac{c_4}{c_6} n c_{12} + i c_7 (c_{11} - c_{13}), \\ f_6 \exp iz_3 &= \frac{c_1 c_4}{c_8} c_{11} - \frac{c_2 c_3}{c_8} c_{13} + i \left(\frac{c_1 c_{12}}{c_5} k - \frac{c_2 c_{14}}{c_5} n \right), \\ f_7 \exp iz_6 &= \frac{c_1}{c_5} k c_{14} + \frac{c_2}{c_5} n c_{12} + i c_7 (c_{11} - c_{13}), \\ f_8 \exp iz_5 &= \frac{c_2 c_3}{c_8} c_{11} - \frac{c_1 c_4}{c_8} c_{13} + i \left(\frac{c_3 c_{12}}{c_6} k - \frac{c_4 c_{14}}{c_6} n \right), \\ f_{10} \exp iz_8 &= \frac{c_1 c_3 - c_9}{2c_8} c_{13} - \frac{c_2 c_4 + c_{10}}{2c_8} c_{11} + \\ &\quad + i \left(\frac{c_1 n_2 - c_3 n_1}{c_8} n c_{14} + \frac{c_2 n_2 - c_4 n_1}{c_8} k c_{12} \right), \\ z_1 &= 4\pi n_1 h_1 / \lambda + \Delta_1 - 2\delta_1 + z_6, \\ z_2 &= 4\pi n_2 h_2 / \lambda - \Delta_2 + z_4. \end{aligned}$$

Подстановка этих формул в выражение (2) позволяет находить коэффициенты пропускания и

отражения света от системы при любой толщине слоев, входящих в эту систему.

Совершенно очевидно, что система с металлическим слоем будет работать эффективно в том случае, когда поглощение минимально. Находя из выражения (1) поглощение можно убедиться, что оно оказывается минимальным при выполнении следующих условий:

$$z_2 = \pi \quad (3)$$

и

$$r_2^2 = \frac{S - \operatorname{sh} \varphi}{S + \operatorname{sh} \varphi}, \quad (4)$$

где $S = (f_1 - f_2 - f_3 + f_4)/2$, а φ определяется из выражения $\operatorname{ch} \varphi = (n^2 c_{11} + k^2 c_{13}) / (n^2 + k^2)$, т.е. условия минимальности поглощения определяются только оптическими свойствами металла и его толщиной.

Максимально возможная прозрачность системы на длине волны λ оценивается по простой формуле [5]:

$$T = \exp(-\varphi). \quad (5)$$

В целях получения максимальной прозрачности фильтра следует выбирать металл с минимальным значением действительной части комплексного показателя преломления n , так как в этом случае оптическая толщина металлического слоя минимальна, и он полностью размещается в узле стоячей волны. Получение максимальной прозрачности, естественно, возможно при минимальном поглощении и равенстве нулю отражения от системы. Для получения минимального поглощения должны выполняться условия (3) и (4), а для получения нулевого отражения на длине волны λ система должна быть симметричной, т.е. должно быть $n_1 = n_2$, и отражение от границ должно определяться условием (4). Именно такие системы рассматривались в [6]. На рис. 2 показаны зависимость коэффициента отражения от обобщенной границы, вычисленная по (4), в зависимости от толщины слоя серебра, используемого для изготовления фильтров [1, 6, 8, 9], и максимально достижимая прозрачность системы.

Для проведения расчета использованы оптические свойства серебра из работы [10] без учета зависимости оптических постоянных n и k серебра от толщины слоя. Для демонстрации общего характера зависимости требуемого отражения излучения границей и максимальной прозрачности системы от толщины слоя металла это

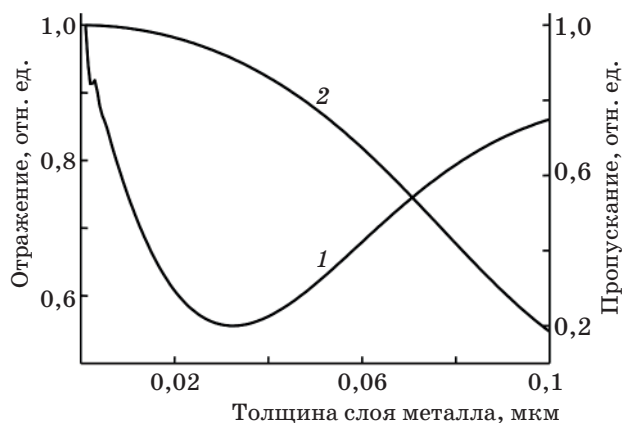


Рис. 2. Зависимости коэффициента отражения от второй границы системы (1) и максимальной прозрачности системы (2) от толщины слоя металла.

не имеет значения. Из приведенного рисунка видно, что требуемое минимальное отражение от границы соединительного слоя с подложкой оказывается значительно больше френелевского для простой границы между двумя средами и соответствует многослойному интерференционному покрытию. Этот случай подробно рассмотрен в работе [6]. Фильтр, получаемый в таких условиях, оказывается довольно узкополосным, а наличие многослойного покрытия не позволяет обеспечить высокое отражение в длинноволновой области спектра. Прозрачность в видимой области спектра достаточно высока даже при сравнительно толстом слое металла. Сравнительно большая толщина слоя металла в этом варианте позволяет легко добиваться малой фоновой прозрачности фильтра во всей длинноволновой области спектра, не прибегая к изготовлению дополнительных “отрезающих” фильтров.

Если не выполняется условие (4), то поглощение в системе немного вырастает, но самое главное, вырастает отражение от системы и как следствие снижается прозрачность в рабочей области спектра. Снижения отражения от системы можно добиться аналогичным выбором толщины согласующего слоя. Обычно считается, что раз система остается симметричной по показателю преломления второго согласующего слоя, то и его толщина должна быть равна первой. Это оказывается верным только при выполнении условий (4) с обеих сторон от слоя металла. При нарушении этого условия толщина верхнего согласующего слоя оказывается иной для достижения минимума коэффициента отражения от системы в целом. Для получения минимального

поглощения необходимо, прежде всего, выполнение условия (3). Все диэлектрические не поглощающие излучения слои, располагающиеся выше металлического слоя, на поглощение не влияют [5]. Для нахождения условия получения минимального отражения подставим (3) в (1), что позволяет рассматривать коэффициенты отражения и пропускания как функции одной переменной z_1 , и выделим переменную z_1 . В этом случае выражение (1) примет вид

$$1/T = L_0 - L_1 \cos z_1 + L_2 \sin z_1, \quad (6)$$

и

$$R/T = G_0 - L_1 \cos z_1 + L_2 \sin z_1, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} L_0 &= A_1 - a_2 b_2 \left[f_5 + (a_1^2 + b_1^2) f_6 \cos(z_3 - z_4) \right], \\ G_0 &= B_1 + a_2 b_2 \left[f_5 - (a_1^2 + b_1^2) f_6 \cos(z_3 - z_4) \right], \\ L_1 &= a_1 b_1 \left[f_7 + (a_2^2 + b_2^2) f_8 \cos(z_5 - z_6) \right] + \\ &+ 2a_1 b_1 a_2 b_2 \left[f_9 \cos(z_7 - z_4 - z_6) + f_{10} \cos(z_4 - z_8 - z_6) \right], \\ L_2 &= a_1 b_1 \left[(a_2^2 + b_2^2) f_8 \sin(z_5 - z_6) \right] + \\ &+ 2a_1 b_1 a_2 b_2 \left[f_9 \sin(z_7 - z_4 - z_6) + f_{10} \sin(z_4 - z_8 - z_6) \right]. \end{aligned}$$

Минимальное значение отражения и максимальная прозрачность системы достигаются при выполнении равенства

$$\operatorname{tg} z_1 = -(L_2/L_1). \quad (8)$$

На рис. 3 кривой 1 выражает зависимость прозрачности системы от толщины слоя металла при выполнении условий (3) и (8). Кривая 2 на этом

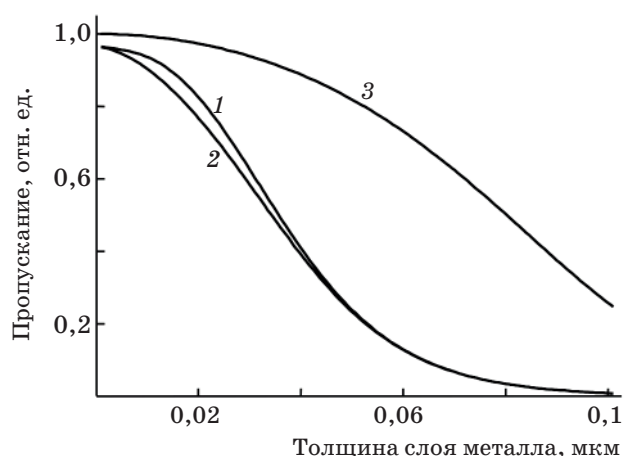


Рис. 3. Зависимости максимальной прозрачности от толщины металлического слоя. 1 – выполнение условий (3) и (8), 2 – случай равной оптической толщины диэлектрических слоев, 3 – максимально возможное пропускание системы по (5).

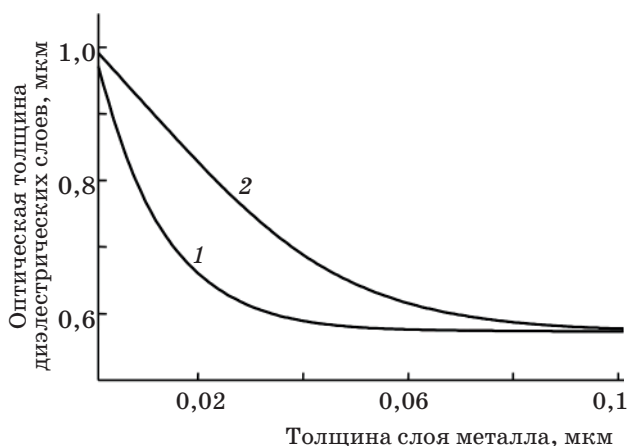


Рис. 4. Зависимости оптической толщины диэлектрических слоев от толщины слоя металла. 1 – верхний слой, 2 – нижний слой.

же рисунке соответствует принятому в работе [9] равенству $z_1 = z_2$, а кривая 3 показывает максимально достигаемое значение прозрачности при выполнении условия (4) и полной симметрии системы, т. е. для $R = 0$.

Рис. 3 показывает, что трехслойная система с минимальным поглощением, используемая для изготовления фильтра, не является полностью оптимальной, так как при ее изготовлении не учитывается условие (4), что приводит к отличному от нуля отражению и, соответственно, снижению прозрачности. Одновременно рис. 3

отражает необходимость выполнения условия (8) при использовании достаточно тонких слоев металла для получения фильтра с высокой прозрачностью в видимой области спектра. На рис. 5 показана зависимость оптической толщины согласующих слоев системы в долях четверти длины волны, соответствующих максимуму прозрачности системы, т. е. выполнению условий (3) и (8).

Обращает на себя внимание то, что при расчете максимальной прозрачности и минимального отражения уравнения (6) и (7) имеют одно и то же решение. В реальных интерференционных покрытиях с поглощающими слоями положение максимума прозрачности не совпадает с положением минимума отражения. При этом положение минимума поглощения сдвинуто от положения экстремумов пропускания и отражения. Полученный нами результат есть следствие попытки совмещения всех экстремумов. На самом деле при использовании теории П.Г. Карда мы находим только положение минимума поглощения. Совмещение экстремумов в расчете приводит к снижению максимальной прозрачности и повы-

шению минимального отражения. Это означает, что эту теорию можно использовать только как оценочную и только для нахождения соотношения между толщиной слоев в покрытии. Полностью она выполняется только при выполнении дополнительного условия (4).

На рис. 5 приведены расчетные оптические свойства системы на основе пленок TiO_2 и Ag при выполнении условий (3) и (8).

При проведении расчета игнорировались дисперсия показателя преломления и поглощение в слоях оксида титана. Дисперсия в слоях диэлектрика не велика и не очень существенно влияет на основные свойства системы, а поглощение сказывается только в длинноволновой области спектра на значение коэффициента отражения (происходит снижение отражения). Данных же по поглощению очень тонких пленок диэлектриков в длинноволновой области спектра нет из-за сложности проведения измерений отдельных тонких пленок. Из рисунка видно, что максимальная прозрачность системы выше, а минимальное отражение ниже, чем приведенные на рис. 3. Анализ данных расчета показал, что в точке минимума функции относительного поглощения $A/T = 1/T - R/T - 1$ значения пропускания и отражения соответствуют приведенному выше рассмотрению. Теперь становится ясным основной недостаток теории [5]. Он заключается в том, что все расчеты оказываются привязанными к минимуму функции A/T , а не к основным рабочим характеристикам (пропускание и отражение системы). При малых отражениях от границ диэлектрических слоев функция A/T изменяется незначительно по спектру, поэтому выполнение

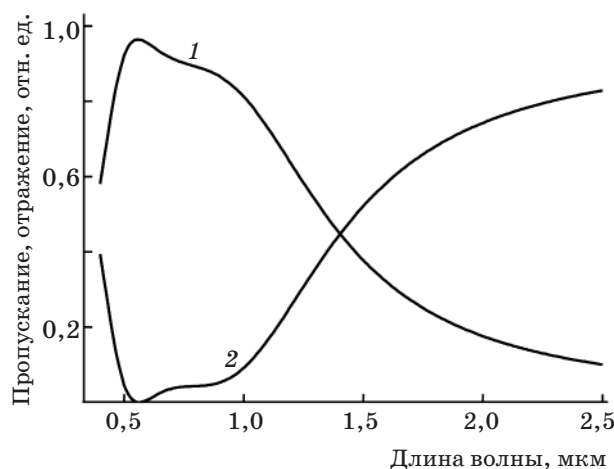


Рис. 5. Спектральное пропускание (1) и отражение (2) полосового фильтра.

условия минимума поглощения, вообще говоря, может быть не очень строгим. Гораздо более существенным является нахождение положения максимума прозрачности и минимума отражения, но в этом случае толщина диэлектрических слоев, очевидно, будет иной. Условие получения максимальной прозрачности или минимального отражения довольно просто получить из выражения (1), приравнявая нулю производные от пропускания или отражения по величинам z_1 и z_2 , т. е. необходимо решение следующих систем уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz_2}(A_2 + A_4) &= 0 \\ \frac{d}{dz_1}(A_3 + A_4) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

для определения положения максимума пропускания и

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz_2}(B_2 + B_4) &= 0 \\ \frac{d}{dz_1}(B_3 + B_4) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

для определения положения минимума отражения.

Уравнения (9) и (10) легко разрешаются численными методами. Решения для максимума пропускания и минимума отражения в этом случае оказываются различными, что и должно быть, поскольку положения этих экстремумов для поглощающей системы не совпадают между собой. Найденные из (9) и (10) значения оптической толщины диэлектрических слоев позволяют вполне уверенно строить систему фильтра. Следует отметить, что общий ход зависимости оптической толщины диэлектрических слоев оказывается идентичным рис. 5, поэтому можно воспользоваться полученными выше значениями оптической толщины слоев диэлектрика, имея в виду, что положение максимальной прозрачности в спектре пропускания сдвинется в длинноволновую область. Это не позволяет спроектировать фильтр с точно заданным пиком прозрачности. Использование уравнений (9) или (10) эту задачу решает полностью. Задавая допустимые значения максимальной прозрачности, можно легко определить толщину слоя металла, обеспечивающую получение заданных оптических свойств.

В целях получения большей крутизны спада пропускания в длинноволновой области следует

объединить несколько подобных систем [5, 9]. Естественно при этом снизится максимальная прозрачность, но это снижение не велико по сравнению с получаемым эффектом резкого роста крутизны.

Так как оптические постоянные n , k полупрозрачных металлических пленок зависят от толщины и от размерных эффектов, в которых проявляется зависимость от размеров зерна, т. е. от технологии получения пленок, то наиболее правильным будет использовать для проведения расчета значения эффективных n - ik , получаемых из эксперимента при строгом фиксировании условий получения пленок. Спектральные оптические свойства общей интерференционной системы очевидным образом, прежде всего, зависят от дисперсии оптических постоянных металлического слоя, которая за счет квантовых размерных эффектов [11, 14] будет зависеть от толщины слоя и от условий изготовления пленки.

Тепловой фильтр должен быть прозрачным в видимой области спектра и отражать тепловую инфракрасную энергию. При полной прозрачности материала диэлектрических слоев в инфракрасной области спектра задача может считаться решенной. Однако для изготовления фильтров используются оксиды металлов (необходимо дополнительно обеспечение высокой прочности покрытия и стойкости в условиях эксплуатации), для которых характерно наличие поглощения в наиболее значимой области спектра 8–12 мкм. Поглощение в диэлектрических слоях резко изменяет характеристику системы. Вместо высокого отражения излучения в тепловой области спектра оно начинает сильно поглощаться системой, что резко снижает свойства теплозащиты. Возникает закономерный вопрос о возможности использования асимметричных по показателям преломления диэлектрических слоев систем. Специальные исследования, проведенные авторами настоящей работы, показали, что максимально достижимая прозрачность асимметричных систем оказывается значительно ниже, чем для симметричных. Это вполне понятно. Симметричная система генетически опирается на полуволновый слой диэлектрика, в середину которого вводится очень тонкий слой металла. Асимметричная система генетически восходит к двухслойному диэлектрическому покрытию. В первом случае для слоя металла нулевой толщины оптические характеристики системы в заданной спектральной точке не изменяются, а во втором случае изменяются очень сильно. Именно это изменение и проявляется в асимметричной системе. Для сим-

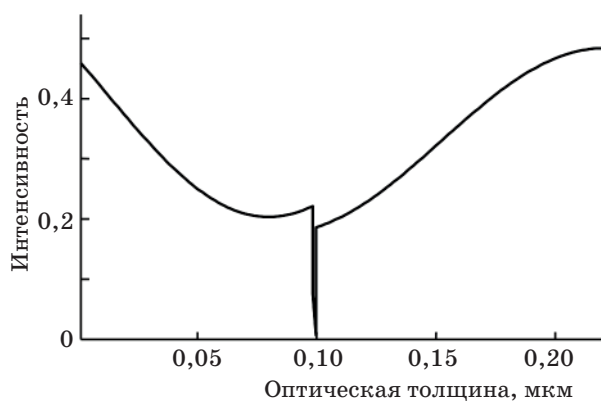


Рис. 6. Распределение интенсивности электрического поля в системе.

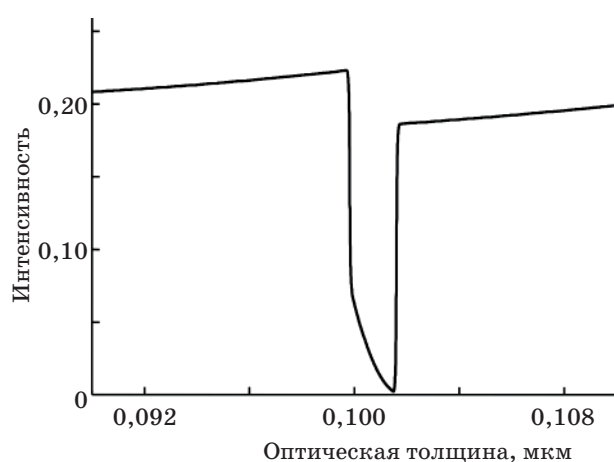


Рис. 7. Распределение поля в слое металла.

метричной системы показатель преломления диэлектрических слоев должен быть по возможности больше, что ведет к большим коэффициентам отражения от границ диэлектрик – обрамляющая среда. Трехслойная система оказывается достаточно широкополосной из-за малой толщины диэлектрических слоев и постоянства фазы отражения на границах. При замене простой границы на многослойное диэлектрическое зеркало появляется сильное изменение фаз отражения от границ, что приводит к уменьшению ширины полосы пропускания системы [6].

До сих пор считалось, что повышение прозрачности рассматриваемой системы связано только с тем обстоятельством, что металлический слой располагается в узле стоячей волны внутри системы, где поле минимально. Расчет действующей интенсивности внутри системы

показывает, что поле выталкивается из металлического слоя. Пример распределения интенсивности излучения в системе приведен на рис. 6 и 7. На рис. 6 дано общее распределение поля в системе, а на рис. 7 выделен только слой металла с малой частью толщины диэлектрических слоев. Этот рисунок наглядно показывает, что поле выталкивается из слоя металла, что и обеспечивает получение малого коэффициента поглощения покрытия в целом. Показанный на рис. 6 и 7 эффект требует более пристального внимания и специального исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jachimowski M. The wide-band transparent filters reflecting infrared radiation, their preparation and some applications // Scientific bulletins of the Stanislaw Staszic university of mining and metallurgy. Cracow-1982. V. 902. № 56.
2. Дмитриева О.А., Уханов С.Н., Козак В.В., Серебренников В.В. Расчет многослойных теплоотражающих экранов // Известия ВУЗ'ов Физика. 1984. № 2. С. 86–91.
3. Гришина И.В. Синтез металлодиэлектрических оптических покрытий // Опт. и спектр. 1988. Т. 64. № 1. С. 151–157.
4. Гришина И.В. Синтез широкополосных металлодиэлектрических покрытий // Опт. и спектр. 1992. Т. 72. № 4. С. 1033–1041.
5. Кард П.Г. Анализ и синтез многослойных интерференционных пленок. Таллин: Валгус, 1971. 235 с.
6. Матшина Н.П., Несмелов Е.А., Нагимов И.Х., Валидов Р.М., Соболева Н.Н. К теории узкополосных фильтров с индуцированным пропусканием // ЖПС. 1991. Т. 55. № 6. С. 1000–1007.
7. Биряльцева А.Р., Несмелов Е.А., Сафин Р.Г. Простой метод расчета металлодиэлектрических теплоотражающих фильтров // Оптический журнал. 1995. № 3. С. 72–73.
8. Memarzadeh K., Woollam J.A. Belkind Abe Variable angle of incidence spectroscopic ellipsometric characterization of $\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$ optical coatings // J. Appl. Phys. 1988. V.64. № 7. P. 3407–3411.
9. Lee J., Lee S., Yoo K., Kim N., Hwangbo C. Deposition of a conductive near-infrared cutoff filter by radio-frequency magnetron sputtering // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 16. P. 3061–3067.
10. David W.L., Hunter W.R. Comments on the optical constants of metals and an introduction to the data

for several metals // Handbook of optical constants of solids/ Ed. by Palik E.D. Academic Press, INC. 1985. P. 275–369.

11. *Бойко Б.Т., Ефимовский В.В., Шкалето В.И.* Субструктура и аномальные оптические свойства островковых конденсатов серебра // *Опт. и спектр.* 1974. Т. 37. № 1. С. 198–203.
12. *Мейксин З.Г.* Несплошные и керметные пленки // *Физика тонких пленок* / Под общей ред.

Хасса Г., Франкамба, М., Гофмана Р. М.: Мир, 1978. Т. 8. С. 106–180.

13. *Эфрос Ал.Л., Эфрос Ал.* Межзонное поглощение в полупроводниковом шаре // *ФТП.* 1982. Т. 16. № 7. С. 1209–1214.
14. *Мазин И.И., Максимов Е.Г. Ракшеев С.Н., Успенский Ю.А.* Микроскопический расчет диэлектрических функций отклика металлов // *Труды ФИАН.* 1988. Т. 190. С. 3–71.