

**МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ  
В ПРОХОДЯЩЕМ СВЕТЕ****Н. Д. Голдина***Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск  
E-mail: ngold@laser.nsc.ru*

Рассмотрена двухполостная структура металл–диэлектрик с четырьмя очень тонкими слоями серебра. Проведен расчет структуры в рамках двух моделей: сплошного слоя и проводящей поверхности. Параметры серебряных пленок измерены экспериментально. Показано, что результаты расчета спектрального коэффициента пропускания фильтра с экспериментально измеренными параметрами существенно отличаются от расчетов с оптическими константами массивных образцов.

**Введение.** Для увеличения максимального коэффициента пропускания металлодиэлектрических фильтров (МДФ) необходимо использовать очень тонкие металлические пленки. Их число в многослойной структуре должно быть достаточным для обеспечения существенного затухания в спектральных областях вне полосы пропускания [1].

Известно, что тонкие металлические пленки имеют островковую структуру, зависящую от толщины слоя и метода изготовления. Для математического описания тонких металлических пленок применяются две модели: модель однородного слоя (МОС) и модель проводящей поверхности (МПП). В МОС для характеристики металлического слоя используются три параметра: оптические константы  $n$ ,  $k$  и толщина  $d$ . В МПП вводятся два параметра:  $\xi' = 2nk\gamma$  и  $\xi'' = (n^2 - k^2)\gamma$ , где  $\gamma = 2\pi d/\lambda$ . В обеих моделях обычно рассчитывают указанные параметры из измеренных значений коэффициента пропускания  $T$  и коэффициентов отражения  $R$  и  $R'$  с двух сторон металлической пленки на диэлектрической подложке. В [2] приведены приближенные формулы (при  $d/\lambda \ll 1$ ) для расчета  $T$ ,  $R$  и  $R'$ , из которых следует, что основным параметром очень тонких пленок является произведение  $nk\gamma$ , а не их отдельные величины. Этот факт свидетельствует о целесообразности применения МПП. МОС удобна для расчетов многослойных структур, так как в ней используются те же параметры, что и для диэлектрических слоев. Однако в МОС используется физически неясный параметр – «толщина гранулярной пленки», которая обычно измеряется интерферометрическими методами. В [3] показано, что толщина очень тонких пленок совпадает со средним диаметром гранул.

В представленной работе проведен расчет МДФ для двух моделей описания тонких серебряных пленок: МОС и МПП. В отличие от работы [1], в которой используются оптические константы серебра для толстых пленок, здесь параметры тонких пленок серебра взяты из экспериментальных измерений.

**Экспериментальное определение  $\xi'$  и  $\xi''$ .** Для определения параметров  $\xi'$  и  $\xi''$  используется оригинальный угловой метод, состоящий в измерении псевдобрюстеровского угла и величины коэффициента отражения  $p$ -поляризованного света при этом угле.

Для МПП коэффициент отражения  $p$ -поляризованного света от металлической пленки на границе двух диэлектрических сред с показателями преломления  $n_0$  и  $n_s$  будет иметь вид

$$R_p = \frac{(n_0/\cos\theta_0 - n_s/\cos\theta_s - \xi')^2 + \xi''^2}{(n_0/\cos\theta_0 + n_s/\cos\theta_s + \xi')^2 + \xi''^2} \quad (1)$$

(здесь  $\theta_0$  – угол падения).

Из (1) следует, что  $R_p$  достигает минимума при условии

$$\xi' = n_0/\cos\theta_0 - n_s/\cos\theta_s. \quad (2)$$

Из формулы (2) можно найти  $\xi'$ , применив закон Снеллиуса  $n_0 \sin\theta_0 = n_s \sin\theta_s$  для определения угла  $\theta_s$ :  $\cos\theta_s = [1 - (n_0 \sin\theta_0/n_s)^2]^{1/2}$ .

При псевдобрюстеровском угле падения  $\theta_{0\text{Бр}}$  минимум  $R_p$  запишется в виде

$$R_{p\text{ min}} = \frac{\xi''^2}{(2n_0/\cos\theta_0)^2 + \xi''^2}.$$

Отсюда  $\xi''$  можно найти с точностью до знака:

$$\xi'' = \pm \frac{2n_0}{\cos\theta_0} \sqrt{\frac{R_{p\text{ min}}}{1 - R_{p\text{ min}}}} \approx \pm \frac{2n_0}{\cos\theta_0} \sqrt{R_{p\text{ min}}}. \quad (3)$$

Для экспериментальных измерений  $\theta_{0\text{Бр}}$  и  $R_{p\text{ min}}$  использовалось поворотное устройство со следящим фотоприемником (при изменении угла падения фотоприемник поворачивался на двойной угол). В этой установке для каждой длины волны можно было фиксировать псевдобрюстеровский угол, при котором  $R_p$  достигает минимума, с точностью не хуже 10'. Интервал углов  $\theta_{0\text{Бр}}$  составлял 57–69°. Величина  $R_{p\text{ min}}$  в спектральном диапазоне 420–800 нм не превышала 2,5 %, а относительная погрешность ее измерения составляла 2 %. Вначале было проверено соответствие экспериментальных и рассчитанных по формуле (1) угловых зависимостей  $R_p$  с параметрами  $\xi'$  и  $\xi''$ , измеренными при нормальном падении для  $\lambda = 0,63$  мкм. Результаты подтвердили независимость параметров  $\xi'$  и  $\xi''$  от угла, т. е. применимость МПП для измерения угловых характеристик.

Спектральная зависимость параметров  $\xi'$  (крестики) и  $|\xi''|$  (кружки) для серебряной пленки на кварцевой подложке приведена на рис. 1. (Две сплошные кривые сглаживают экспериментальные контуры.) Условия изготовле-

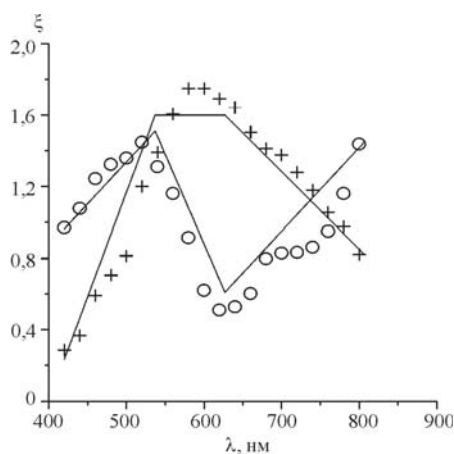


Рис. 1

ния металлического слоя соответствуют [4]. Для  $\lambda = 0,63$  мкм коэффициент пропускания Ag при нормальном падении равен 33 %. Знак при определении  $\xi''$  из (3) выявить нельзя, он находится по измерениям в стоячей волне [4]. По экспериментальным данным предлагаемой работы  $\xi'' < 0$  для Ag с  $T = 33$  %.

**Расчет параметров  $n$  и  $k$ .** На рис. 2 сплошными линиями изображены приблизительные спектральные зависимости  $n$  и  $k$ , рассчитанные из соотношений  $\xi' = 2nk\gamma$  и  $\xi'' = (n^2 - k^2)\gamma$ , при известных экспериментальных значениях  $\xi'$  и  $\xi''$  (см. рис. 1). По оси абсцисс отложена величина  $g = \lambda_0/\lambda$ , где  $\lambda_0 = 600$  нм. Толщина слоя предполагалась 10 нм, что совпадает с результатами работ [5, 6], где приведены спектральные зависимости величины  $2nk d$  для разных толщин Ag, и с экспериментальными измерениями толщины с применением интерферометра Физо в данной работе. Нужно отметить неразличимость параметров  $n$  и  $k$ , извлекаемых из  $\xi'$  и  $\xi''$ . Здесь принято, что  $k$  должно быть больше  $n$  согласно тому, что  $\xi'' < 0$ . Оптические константы слоя Ag толщиной 11 нм из [3] показаны на рис. 2 штриховыми линиями. Из сравнения сплошных и штриховых линий видно, что для малых толщин пленок

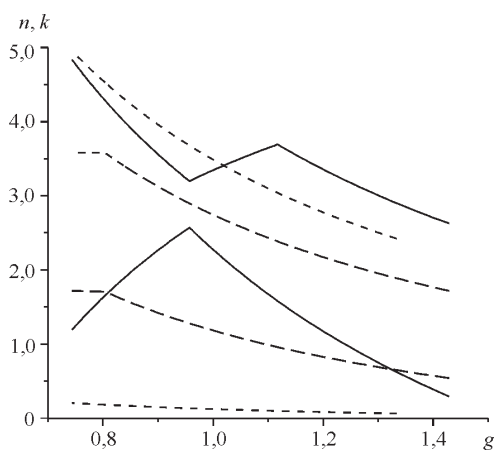


Рис. 2

Ag значения  $n$  и  $k$  могут заметно отличаться в разных экспериментах. Для сравнения пунктирными линиями показаны те же параметры для массивного Ag [7]. Эти данные использовались для расчета МДФ [1]. Видно разительное отличие дисперсионной зависимости для  $n$ , что подтверждает вывод о неприменимости оптических констант массивного серебра для очень тонких пленок, когда проявляется эффект аномального поглощения.

**Расчет фильтров.** В работе [1] проводился расчет МДФ по МОС с четырьмя металлическими пленками, внедренными в многослойную двухполостную диэлектрическую структуру. Для одной и той же структуры использовались поглощающие пленки разных металлов. Оптические константы  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  всех металлов для массивных образцов были взяты из справочника [7]. Принцип построения МДФ заключается в размещении поглощающих пленок на межслойных границах, где электрическое поле имеет небольшую величину. Чем больше число диэлектрических слоев в структуре фильтра, тем уже полоса пропускания. Вместе с тем происходит уменьшение коэффициента стоячей волны в узлах электрического поля и более резкое возрастание поля при отстройке от узлов, в которых размещены металлические слои. Для того чтобы получить наибольшую величину  $T_{\max}$ , необходима оптимизация при подборе толщин поглощающих пленок и числа диэлектрических слоев конкретной многослойной структуры. Число металлических пленок определяет величину затухания вне полосы пропускания. В работе [1] рассчитан один из вариантов МДФ, который состоит из двух резонансных полостей с четырьмя металлическими пленками, с целью получения П-образной формы полосы пропускания и отсекаания паразитных полос в широком спектральном диапазоне.

В данной работе приводится расчет МДФ в рамках двух моделей – МОС и МПП – для той же многослойной структуры с пленками Ag. Существенное его отличие состоит в том, что параметры серебряных пленок взяты из экспериментальных данных для полупрозрачных тонких пленок (см. рис. 1 и 2).

Расчетная зависимость коэффициента пропускания  $T(g)$  фильтра для МОС показана сплошной линией на рис. 3. Спектральный диапазон соответствует 400–800 нм, здесь  $g = \lambda_0/\lambda$  ( $\lambda_0 = 600$  нм). Приближенные кривые дисперсии оптических констант  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  введены в расчеты согласно рис. 2 (сплошные линии). Принято, что толщина всех четырех металлических пленок одинакова и равна 10 нм. Для сравнения на рис. 3 штриховой линией по-

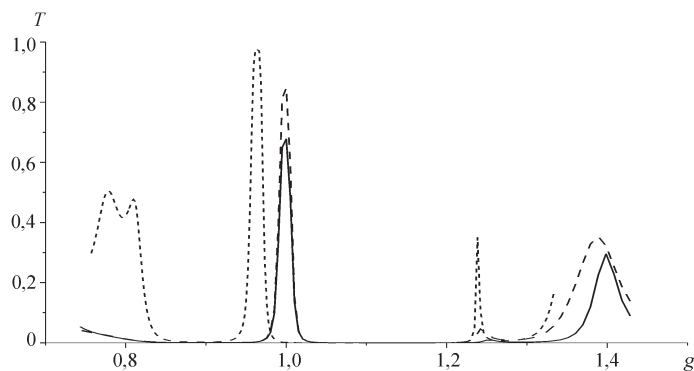


Рис. 3

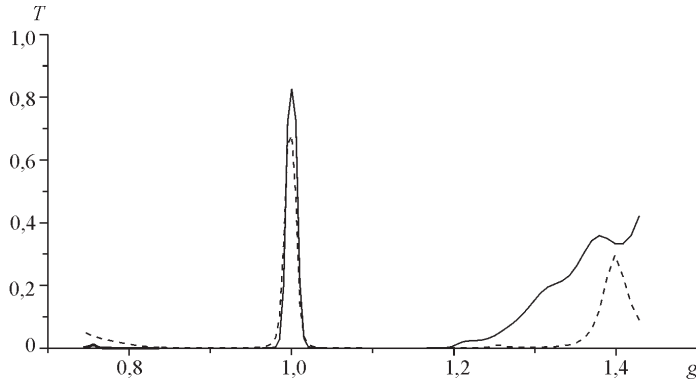


Рис. 4

казана зависимость  $T(g)$ , когда в расчеты вводятся оптические константы Ag из экспериментальной работы [3] для толщины 11 нм (см. рис. 2, штриховые линии). И, наконец, на рис. 3 пунктирной линией нанесен контур  $T(g)$ , рассчитанный в [1] с оптическими константами для массивного серебра (см. рис. 2, пунктирные линии). Из сравнения трех кривых  $T(g)$  видно сильное влияние выбора зависимостей  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  тонких гранулярных пленок. С длинноволновой стороны затухание  $T$  значительно больше для реально измеренных тонких пленок серебра. Величина  $T_{\max}$  первых двух кривых несколько меньше  $T_{\max}$  третьей кривой.

Далее приведем расчет структуры МДФ с применением МПП, когда для характеристики поглощающих пленок вводятся параметры  $\xi'$  и  $\xi''$  (см. рис. 1): сплошными линиями показаны сглаженные кривые дисперсии  $\xi'$  и  $|\xi''|$  для введения в расчет  $T(g)$ . В отличие от МОС расчет по МПП осуществляется проще: считается обычная диэлектрическая структура, а на определенных границах, где размещены металлические пленки, к адмиттансу нагрузки  $Y_i$  добавляется комплексная величина  $\xi = \xi' + i\xi''$  [8]. Потенциальное пропускание фильтра  $\psi$  равно произведению величин потенциального пропускания для каждой металлической пленки, рассчитанных по формуле  $\psi_i = [1 + \xi'/\text{Re}(Y_i + \xi)]^{-1}$ . Коэффициент пропускания считается по формуле  $T = (1 - R)\psi$ , где  $R$  – коэффициент отражения всего фильтра.

На рис. 4 сплошной линией показана зависимость  $T(g)$  по МПП и для сравнения пунктирной линией – та же зависимость по МОС (на рис. 3 это сплошная линия). В пределах  $1,2 > g > 0,8$ , которые соответствуют краям зоны высокого отражения зеркал, обе модели дают примерно одинаковые результаты. Величина пика в МПП несколько больше. Полуширина полосы пропускания фильтра равна 10 нм, ширина на уровне  $0,01T_{\max}$  в 3 раза больше. Окончательный вывод о применении МПП или МОС в расчетах может дать экспериментальная проверка.

**Заключение.** Сложность определения параметров металла может быть упрощена для очень тонких пленок, перспективных для применения в оптических многослойных структурах. В данной работе рассчитана двухполостная структура фильтра с четырьмя одинаковыми тонкими серебряными пленками. Параметры  $\xi'$  и  $\xi''$  экспериментально измерены в видимой области спектра и из них извлечены оптические константы  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  при реальном предположении, что толщина пленки равна 10 нм. Расчеты спектрального ко-

эфициента пропускания фильтра с экспериментально определенными параметрами тонких пленок серебра в рамках двух моделей – МПП и МОС – дали примерно одинаковые результаты, которые существенно отличаются от расчетов с использованием оптических констант массивных образцов [1].

Результаты численного моделирования многослойных структур с тонкими металлическими слоями могут быть использованы для решения ряда практических задач в нанотехнологии, например в преобразователях солнечной энергии, в биосенсорах и т. д.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Голдина Н. Д.** Дисперсионные свойства узкополосных металл-диэлектрических фильтров // Оптический журнал. 2007. **74**, № 6. С. 75.
2. **Wolter H.** Optik dünner Schichten // Handbuch der Physik. Berlin: Springer, 1956. Bd. 24. S. 461.
3. **Шкляревский И. Н., Корнеева Т. И.** Оптические постоянные тонких серебряных пленок // Оптика и спектроскопия. 1971. **31**, № 2. С. 270.
4. **Голдина Н. Д., Захаров М. И., Троицкий Ю. В.** Синтез характеристик многолучевого отражающего интерферометра // Автометрия. 1975. № 3. С. 107.
5. **Rasigni G.** Absorption par les couches metalliques // Rev. d'Optique. 1962. **41**. P. 398.
6. **Rouard P.** Sur le phenomene d'absorption optique anormale des couches minces metalliques // Appl. Opt. 1965. **4**, N 8. P. 947.
7. **American Institute of Physics Handbook** /Ed. D. Gray. N. Y.: McGraw-Hill, 1972. P. 6.
8. **Голдина Н. Д., Захаров М. И.** Металл-диэлектрические фильтры в проходящем свете // Оптика и спектроскопия. 1980. **48**, № 1. С. 137.

*Поступила в редакцию 4 июля 2007 г.*