

ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА УЗКОПОЛОСНЫХ МЕТАЛЛ-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

© 2007 г. Н. Д. Голдина, канд. физ.-мат. наук

Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: ngold@laser.nsc.ru

Приведен анализ фильтров с индуцированным пропусканием с несколькими тонкими поглощающими пленками. Показано, что металл-диэлектрический фильтр с двумя резонансными полостями обеспечивает широкополосную отсечку с большой крутизной крыльев узкой полосы пропускания.

Коды OCIS: 350.2460.

Поступила в редакцию 12.10.2006.

Введение

Узкополосные многорезонаторные фильтры чебышевского типа обладают существенным преимуществом в крутизне крыльев резонансной кривой по сравнению со стандартными однополостными структурами. Определяющими параметрами при конструировании полностью диэлектрических фильтров (ДФ) являются число слоев в промежуточных зеркалах между полостями, число и порядок полостей.

Полвека назад появились узкополосные металл-диэлектрические фильтры (МДФ), названные фильтрами с индуцированным пропусканием [1]. Современные нанотехнологии позволяют совершенствовать конструкции этих фильтров благодаря точному контролю оптических параметров металлических пленок толщиной менее 10 нм. МДФ имеют преимущество перед ДФ в том, что обеспечивают эффективную отсечку боковых полос. Это обстоятельство может быть использовано для создания компактных спектрометров с широким спектральным диапазоном [2].

Однако до настоящего времени остаются существенные пробелы в анализе свойств МДФ из-за недостатка знаний о дисперсии оптических параметров очень тонких металлических пленок. Известно, что вследствие гранулярности структуры и сильной зависимости от метода нанесения слоев оптические константы металлов представлены в литературе с большим разбросом. Для очень тонких слоев они, как правило, не совпадают с константами для массивных образцов.

В данной работе рассматриваются диэлектрические фильтры, в структуру которых введены тонкие поглощающие пленки с целью отсечки боковых полос. Специфика конструкции требует исследования влияния параметров (толщины и дисперсии оптических констант) тонких металлических пленок на оптимальные характеристики фильтра. Помимо этого необходим поиск конфигурации диэлектрического многослойника для оптимального размещения поглощающих пленок.

В данной работе анализируется один из многочисленных вариантов МДФ, состоящий из двух резонансных полостей и нескольких металлических слоев, с целью получения формы полосы пропускания, близкой к П-образной.

Принцип создания МДФ с одной полостью

Изберем для конструирования четыре отличающихся по свойствам металла: Mo, Ni, Al, Ag, поскольку в данной работе ставится задача оценки влияния дисперсионных свойств металлических пленок на характеристику МДФ. Дисперсия оптических констант показана сплошными линиями на рис. 1 и взята из [3], где она приводится в основном для массивных образцов. При расчете использована приближенная зависимость n и k от $g = \omega/\omega_0$, отражающая общий характер поведения оптических констант для различных металлов.

На этом же рисунке штриховыми линиями приведена дисперсия параметра $\sigma = \sigma_1 + i\sigma_2$, который легко измеряется экспериментально [4]. В величины $\sigma_1 = 2nk\gamma$ и $\sigma_2 = -(n^2 - k^2)\gamma$, где $\gamma = 2\pi d/\lambda$, входит толщина пленки d . Толщина пленки является свободным параметром, на рис. 1 она равна 10 нм и далее такой использована в расчетах. Нужно отметить, что может быть несовпадение измеряемых параметров σ_1 и σ_2 с расчетными значениями, когда n и k взяты из справочных данных, особенно для малых толщин [4]. Эта проблема требует специального исследования в экспериментальной работе.

Как известно, первые интерференционные фильтры представляли собой два металлических слоя, разделенных диэлектрической прослойкой. Они имели большую полуширину и низкий пик пропус-

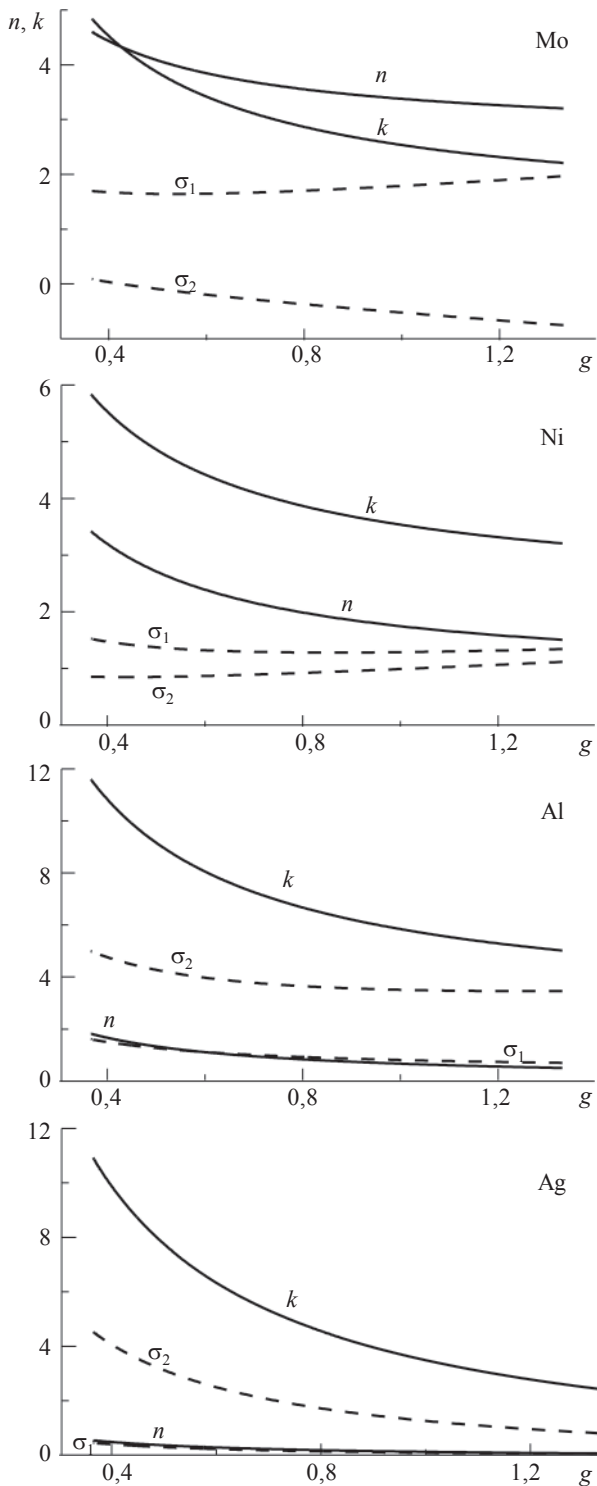


Рис. 1. Спектральная зависимость оптических констант и параметров σ_1, σ_2 от относительной частоты $g = \omega/\omega_0 = \lambda_0/\lambda$ для четырех металлов ($\lambda_0 = 0,6$ мкм).

кания. Первая структура фильтра с индуцированным пропусканием имела один металлический слой, окруженный с двух сторон диэлектрическими многослойниками [1]. В данной работе рассмотрим составной вариант из двух металлических (2М) слоев

с диэлектрической прослойкой, окруженный с двух сторон специально подобранными многослойниками. Коэффициент пропускания симметричного двухзеркального фильтра с диэлектрической прослойкой определяется по формуле Airy:

$$\tilde{T} = \tilde{\psi} (1 + F \sin^2 \varphi)^{-1}, \quad \tilde{\psi} = \psi^2,$$

где $\psi = (1 + A/T)^{-1}$ – потенциальное пропускание одного зеркала (считаем, что ψ одинаковы для каждого из M слоев), $F = 4R/(1 - R)^2$ – фактор резкости, T, R, A – коэффициенты пропускания, отражения и поглощения одного зеркала, $\varphi = (2l\omega/c - \alpha)$ – фазовая толщина прослойки, l – оптическая толщина прослойки, α – фазовый сдвиг при отражении от каждого из зеркал резонансной полости.

Для МДФ важно рассчитать величину $\psi_{\max} = [1 + (A/T)_{\min}]^{-1}$, которая зависит от оптимального значения выходного адмиттанса Y_{opt} справа от пленки, как показано на вставке рис. 2. Приближенная формула для Y_{opt} дана в [4]: $Y_{\text{opt}} \approx (0,86 + i1,5)/\gamma$. Там же дано графическое представление для подбора структуры диэлектрического многослойника, имеющего заданное значение Y_{opt} . Здесь мы используем расчетное значение Y_{opt} в качестве начального приближения. Обычно многослойник имеет два подгоночных слоя с толщиной $\neq \lambda_0/4$, но в данной работе используется один подгоночный слой H' , прилегающий к металлической пленке. При этом значение ψ близко к $\psi_{\max}$. После задания $d = 10$ нм и $\lambda_0 = 0,6$ мкм, т. е. γ , для всех металлов получаем расчетное значение $Y_{\text{opt}} = 8,2 + i14,3$.

В [4] было показано, что один металлический слой с выходным адмиттансом Y_{opt} имеет $\psi = \psi_{\max}$ при

$$(A/T)_{\min} \approx (\sigma_1 \gamma^2 / 3) \times \\ \times \left(\sigma_1 / 2 + 2\sqrt{3/4\gamma^2 + \sigma_2 / 2\gamma + \sigma_1^2 / 10 + \sigma_2^2 / 20} \right).$$

На рис. 2 штриховыми линиями для Mo и Al показаны рассчитанные по этим формулам спектральные зависимости $\psi_{\max}^2$ для двух металлических слоев, которые входят в структуру, показанную на рис. 2 на отдельной вставке. Если бы адмиттанс Y_{opt} сохранял постоянное значение по всему спектру и отсутствовала бы дисперсия оптических констант металла, то величина $\psi^2(g)$ имела бы зависимость, показанную пунктиром. Если учесть дисперсию n и k , то потенциальное пропускание ψ^2 будет иметь зависимость, изображенную сплошной линией. Из этого рисунка следует, что дисперсия оптических констант способствует ослаблению потенциального пропускания в ИК области, как это было показано в [5].

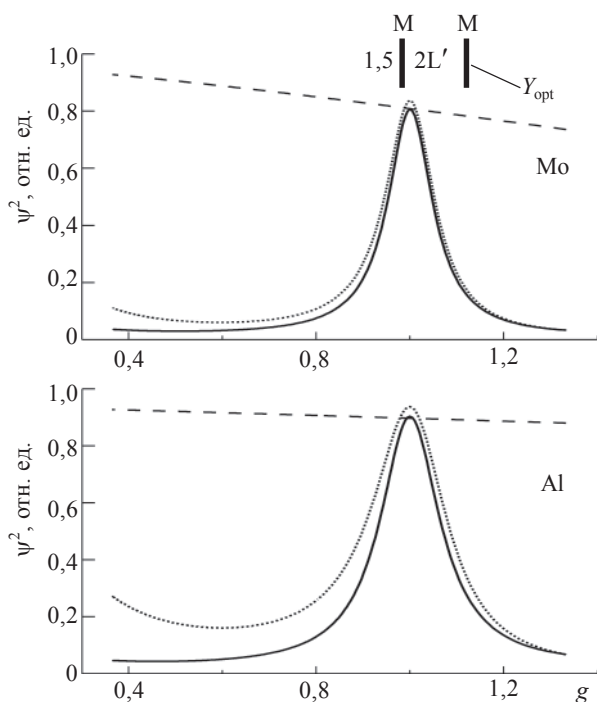


Рис. 2. Спектральная зависимость потенциального пропускания 2М-фильтра с оптимальным выходным адмиттансом без дисперсии (пунктир) и с дисперсией (сплошная линия) оптических констант для молибдена и алюминия. (На вставке показана рассчитываемая структура.)

Далее Y_{opt} заменяется на выходе реальным диэлектрическим многослойником, у которого выходной адмиттанс Y зависит от λ . Для выбранной $\lambda_0 = 0,6$ мкм $Y = Y_{opt}$. С другой стороны добавляется точно такой же многослойник для создания симметричной структуры фильтра (показана на вставке рис. 3). Для данного примера многослойник состоит из 5 слоев попеременно чередующихся материалов с показателями преломления $n_H = 2,3$ и $n_L = 1,35$. Прилегающие слои имеют толщину $H' = 0,93$ (в долях четвертьволновой толщины). Толщина резонансной прослойки фильтра $2L' = 1,91$ и выбрана для выполнения фазового условия на λ_0 . При этом коэффициент отражения всей структуры $\tilde{R} \rightarrow 0$. Из рис. 3 видно, что в ИК области Мо и Al ведут себя по-разному: Al имеет большую асимметрию контура T и с ИК стороны имеет “плечо” вблизи пика. Здесь штриховыми линиями также показана зависимость ψ^2_{max} . Для демонстрации того, что отсечка боковых полос зависит от спектральной зависимости потенциального пропускания, пунктиром показана зависимость $\psi^2(g)$.

Двойной МДФ с 4М слоями

Известно, что диэлектрический фильтр с двумя полостями имеет контур T с двумя максимумами,

которые при настройке могут сблизиться так, что будет получена плоская вершина без провалов [6]. Это явление связано с тем, что сглаживается петля аномальной дисперсии фазового сдвига при отражении от всего фильтра. На небольшом участке длин волн возникает “бездисперсионный” режим. Для чисто диэлектрического тонкопленочного фильтра настройка связана с оптической толщиной слоев, размещаемых между двумя полостями. В соответствии с [6] число слоев в центре фильтра должно превышать число слоев во внешнем многослойнике.

По этому принципу составлена двухполостная структура ДФ, которая состоит из двух резонансных полостей $2L$, соединенных диэлектрическим многослойником из $11 \lambda_0/4$ -слоев и двух внешних многослойников из $5 \lambda_0/4$ -слоев. Общее количество слоев структуры равно 25 ($1,5/H L H L H \ 2L \ H L H L H L H L H \ 2L \ H L H L H / 1,5$). Затем в эту структуру внесены четыре металлических слоя $1,5/H L H L H' \ M 2L' \ M \ H' L H L H L H L H L H' \ M \ 2L' M \ H' L H L H / 1,5$.

По-прежнему для оптимизации потенциального пропускания число слоев внешних многослойников равно 5, как на рис. 3. На рис. 4 представлены спектральные зависимости фильтров, составленных по этой схеме. В конструкциях использованы

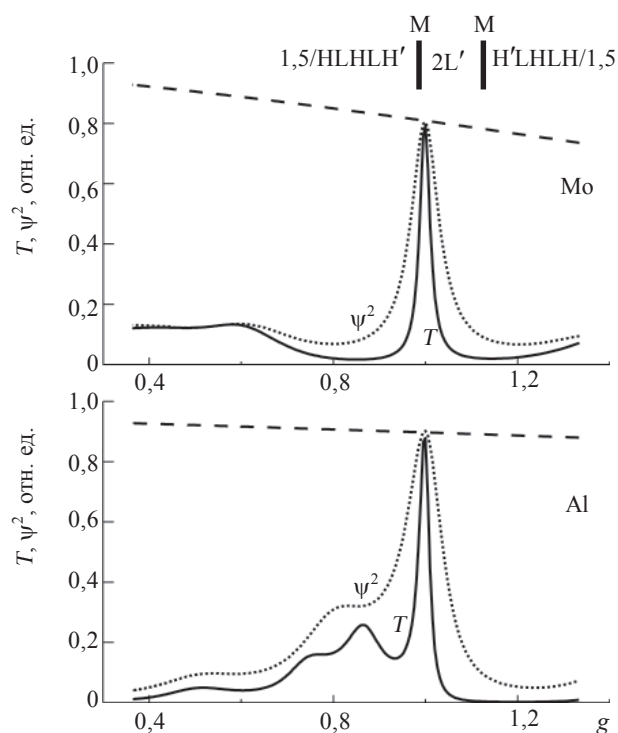


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента пропускания и потенциального пропускания симметричного МДФ с 2М слоями Мо и Al.

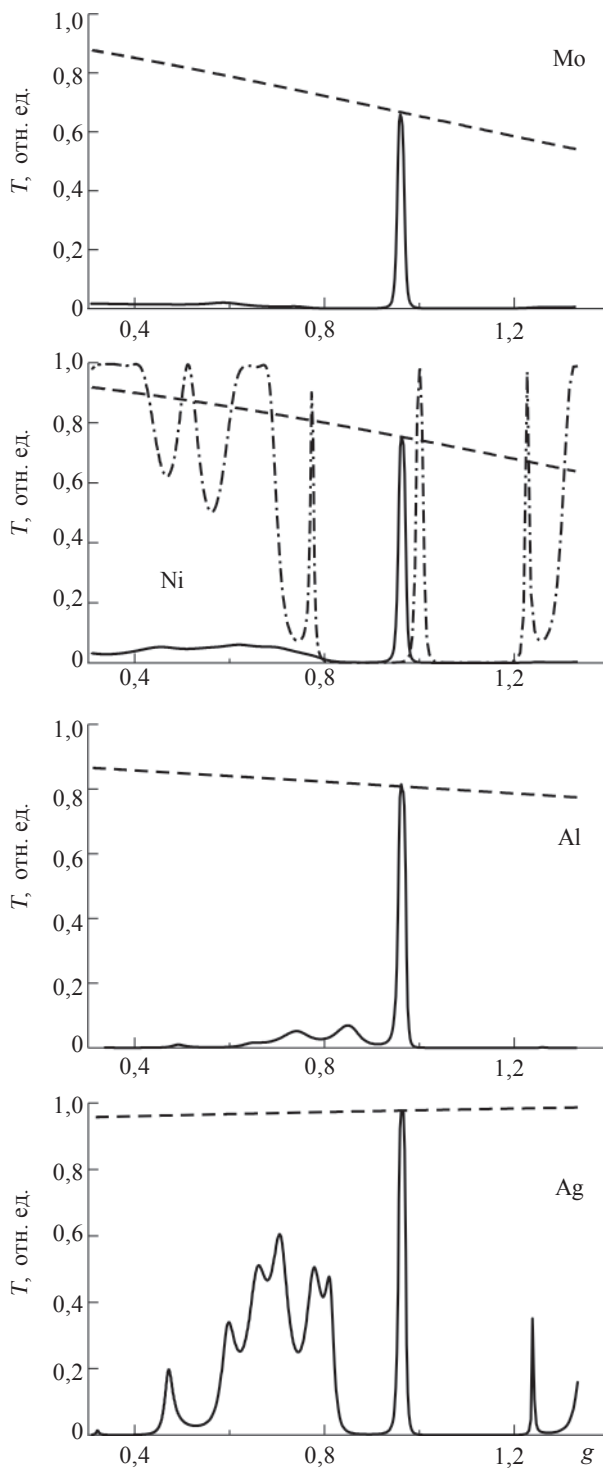


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициента пропускания симметричного двойного МДФ с 4М слоями четырех металлов.

четыре металла – Mo, Ni, Al, Ag, дисперсия оптических констант которых показана на рис. 1. Все четыре металлических пленки имеют одинаковую толщину $d = 10$ нм. Толщина прослойки всех фильтров $2L' = 1,91$, толщина подгоночных слоев $H' = 0,93$, эти толщины варьируются с целью получения максимума T . Штриховыми линиями показана расчетная величина $\psi_{\max}^4$, которая увеличивается в ИК об-

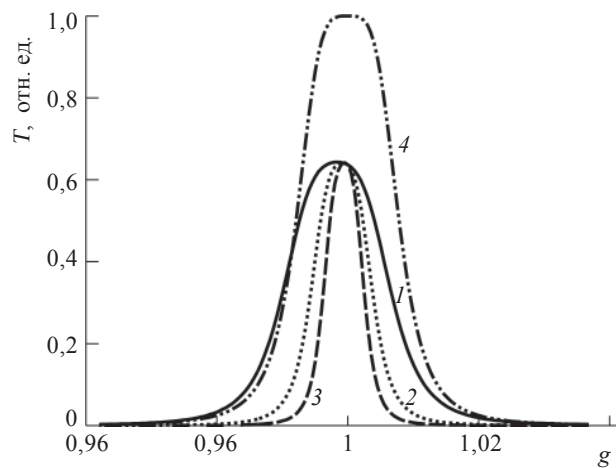


Рис. 5. Спектральная зависимость коэффициента пропускания Mo (сплошная линия); та же структура с прослойкой $L'2HL'$ (пунктир); та же структура с прослойкой $3L'2H3L'$ (штрихи). Для сравнения показан контур ДФ (штрихпунктир).

ласти. На втором из рисунков для сравнения показан коэффициент пропускания 25-слойной диэлектрической структуры без металлических пленок. Из сравнения кривых T видно, что наиболее эффективная ИК-отсечка происходит для “серых” металлов, типа Mo и Ni. Высокоотражающие “светлые” металлы, типа Al и Ag, с большим отношением k/n имеют больший коэффициент пропускания в максимуме, но недостаточно отсекают ИК полосы при такой толщине поглощающих слоев.

На рис. 5 сплошной линией приведен контур полосы пропускания МДФ с 4М-слоями молибдена. Полуширина полосы равна 2,7 нм, отношение ширин на уровнях $0,01T_{\max}$ и $0,5T_{\max}$ равно 3. Для сравнения штрихпунктиром показан контур ДФ из 25 слоев с плоской вершиной. Полуширина и крутизна обоих контуров примерно одинакова, но ДФ имеет больший коэффициент пропускания в максимуме.

Дальнейшая модификация формы полос пропускания может быть осуществлена путем некоторых известных методов. Согласно [7] введение дополнительного полуволнового слоя $2H$ в центр прослойки ($L'2H L'$) сужает полосу пропускания в 1,5 раза, как показано на рис. 5 пунктиром. Кроме того, вместо увеличения полуволновой толщины полостей можно увеличить фазовую дисперсию за счет увеличения толщины прилегающих слоев ($3L'2H 3L'$) и сузить полосу пропускания до 1 нм.

Заключение

На примере анализа двухполостного МДФ с четырьмя тонкими металлическими пленками показано, что такие фильтры не имеют паразитных по-

лос в широком спектральном диапазоне. При этом сохраняется узкополосность с большой крутизной крыльев полосы пропускания и относительно высоким пропусканием в максимуме. Продемонстрирована определяющая роль дисперсии оптических параметров металлических пленок в конкретных конструкциях фильтров с пленками четырех различных металлов одинаковой толщины. Для МДФ с четырьмя слоями Мо толщиной 10 нм получена отсечка всех боковых полос в диапазоне 0,45–1,65 мкм до уровня пропускания менее двух процентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Berning P.H., Turner A.F.* Induced transmission in absorbing films applied to band pass filter design // JOSA. 1957. V. 47. P. 230–239.
2. *Piegari A.* Variable narrowband transmission filters with a wide rejection band for spectrometry // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 3768–3773.
3. American Institute of Physics Handbook / ed. Gray D. N. Y., 1972. P. 6–124.
4. *Голдина Н.Д., Захаров М.И.* Металл-диэлектрические интерференционные фильтры в проходящем свете // Опт. и спектр. 1980. Т. 48. С. 135–145.
5. *Baumeister P.W.* Radiant power flow and absorptance in thin films // Appl. Opt. 1969. V. 8. P. 423–436.
6. *Smith S.D.* Design of multilayer filters by considering two effective interfaces // JOSA. 1958. V. 48. P. 43–50.
7. *Baumeister P.W.* Design of wavelength-division multiplexing bandpass with quasi-Chebyshev spectral shape // Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 1132–1137.