

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 535.345.6

О СПЕКТРАЛЬНОЙ АСИММЕТРИИ КОНТУРА УЗКОЙ ПОЛОСЫ ОТРАЖЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО ФИЛЬТРА

Н. Д. Голдина

*Учреждение Российской академии наук
Институт лазерной физики Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13/3
E-mail: ngold@laser.nsc.ru*

Предложен метод управления знаком асимметрии спектрального контура интенсивности отражённого от узкополосного фильтра света с помощью подгонки толщины диэлектрического слоя, прилегающего к тонкому слою металла.

Ключевые слова: тонкий металлический слой, многослойные покрытия, отражающий светофильтр.

Введение. Узкополосный пропускающий фильтр является тонкоплёночным аналогом интерферометра Фабри — Перо и состоит из двух высокоотражающих зеркал, разделённых промежуточным слоем с оптической толщиной, кратной половине рабочей длины волны. Узкополосный отражающий фильтр (ОФ) состоит из переднего несимметричного зеркала, установленного на расстоянии полуволны от поверхности высокоотражающего заднего зеркала, и является аналогом отражающего интерферометра [1–5]. Для исключения лишних потерь высокоотражающее зеркало должно иметь коэффициент отражения, близкий к единице. Несимметричное зеркало в удобном для практики варианте состоит из тонкой поглощающей плёнки и диэлектрической многослойной структуры, расположенной со стороны промежуточного слоя (разделительной интерференционной прослойки) [6]. От количества слоёв этой структуры (и, конечно, толщины прослойки) зависит ширина полосы отражения. Характеристики пропускающего фильтра типа Фабри — Перо определяются коэффициентом отражения зеркал и толщиной прослойки (порядком интерференции в промежуточном слое). Свойства ОФ, кроме того, зависят от параметров металлической плёнки — активной и реактивной составляющих комплексной проводимости: $\xi' = 2nk\gamma$ и $\xi'' = (n^2 - k^2)\gamma$, где n, k — оптические константы, $\gamma = 2\pi d/\lambda$ (d — толщина металлического слоя). Эти дополнительные параметры позволяют управлять такими характеристиками фильтра, как контраст и асимметрия полос. При согласовании активной части проводимости ξ' с внешней средой может быть получен идеальный контраст, т. е. коэффициент отражения фильтра $R_{\min} \approx 0$, что является преимуществом по сравнению с пропускающим фильтром, где $T_{\min} \neq 0$ [1, 2]. Отличительная особенность ОФ — заметная асимметрия контура узкой полосы отражения. Одна из характеристик фильтра — расстояние между максимумом и минимумом отражения (спектральный интервал в коротковолновой $\Delta\lambda_{\min}^k$ и длинноволновой $\Delta\lambda_{\min}^d$ областях). В данной работе исследуется возможность управления асимметрией ОФ, т. е. изменением ширины $\Delta\lambda_{\min}$ с обеих сторон.

Конструирование структуры ОФ с заданной асимметрией профиля отражения. При расчёте могут быть использованы два способа описания свойств тонкой металлической плёнки: традиционная модель однородного слоя (МОС), для чего потребуется знание оптических констант и толщины, и модель проводящей поверхности (МПП), ко-

торая оперирует комплексной проводимостью плёнки. Здесь воспользуемся более простой и наглядной МПП.

Применим для расчётов адмиттансный метод. Асимметрию можно изменять вариацией толщины прилегающего к металлической плёнке диэлектрического слоя с низким показателем преломления (более точно — с помощью нескольких слоёв). Это было продемонстрировано при синтезе отражающего интерферометра, когда изменялась асимметрия зависимости R от толщины интерферометра (для одной длины волны) [7]. В случае с ОФ появляется не только зависимость параметров металлической плёнки от длины волны, но и спектральная зависимость адмиттанса диэлектрической многослойной структуры на границе с металлической плёнкой ($Y = Y' + iY''$).

Рассчитаем следующую структуру: $A/ML'LHLHLL(HL)^6H/S$, где A — внешняя среда, M — металлическая плёнка, L и H — четвертьволновые слои (толщина равна $1,0$) с показателями преломления $1,35$ и $2,3$, L' — прилегающий к металлу диэлектрический слой, S — подложка. Полное число слоёв 19 , из них 13 четвертьволновых диэлектрических слоёв относятся к заднему зеркалу, LL — полуволновая прослойка. Переднее зеркало содержит четыре диэлектрических слоя.

Коэффициент отражения фильтра в МПП определяется по формуле [2]

$$R(\lambda) = \frac{(n_A - Y' - \xi')^2 + (Y'' + \xi'')^2}{(n_A + Y' + \xi')^2 + (Y'' + \xi'')^2}.$$

Здесь n_A — показатель преломления среды, из которой падает свет.

На асимметрию формы спектральной кривой коэффициента отражения фильтра влияет спектральная зависимость суммарного адмиттанса ($Y'' + \xi''$). Для структуры переднего зеркала, состоящей из металлической плёнки, на которую справа нанесены четвертьволновые слои, при $\xi'' = 0$ зависимость $R(\lambda)$ была бы примерно симметричной. В этом случае $Y''(\lambda) = 0$ для длин волн, симметрично отстоящих от длины волны λ_0 , соответствующей максимуму отражения. В пределах полосы высокого отражения диэлектрических зеркал спектральная кривая Y'' может видоизменяться при варьировании толщины слоя, прилегающего к металлической плёнке.

Известно, что параметры металлических плёнок ξ' , ξ'' сильно зависят от толщины, длины волны и условий нанесения слоя. Для расчёта взята серебряная плёнка M из экспериментальных измерений [8], примерные спектральные зависимости ξ' и ξ'' которой показаны на рис. 1 сплошными линиями.

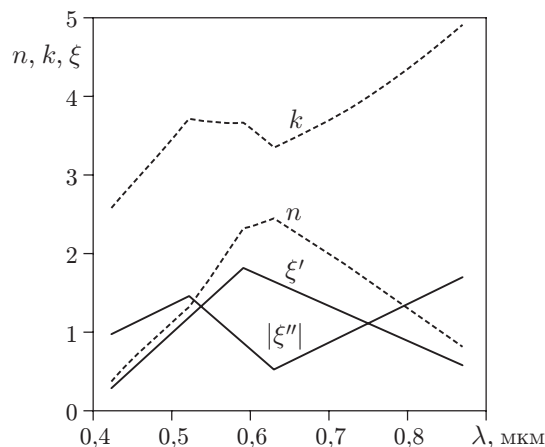


Рис. 1. Экспериментальные спектральные зависимости комплексной проводимости ξ для плёнки серебра и рассчитанные по ним оптические константы для толщины 10 нм

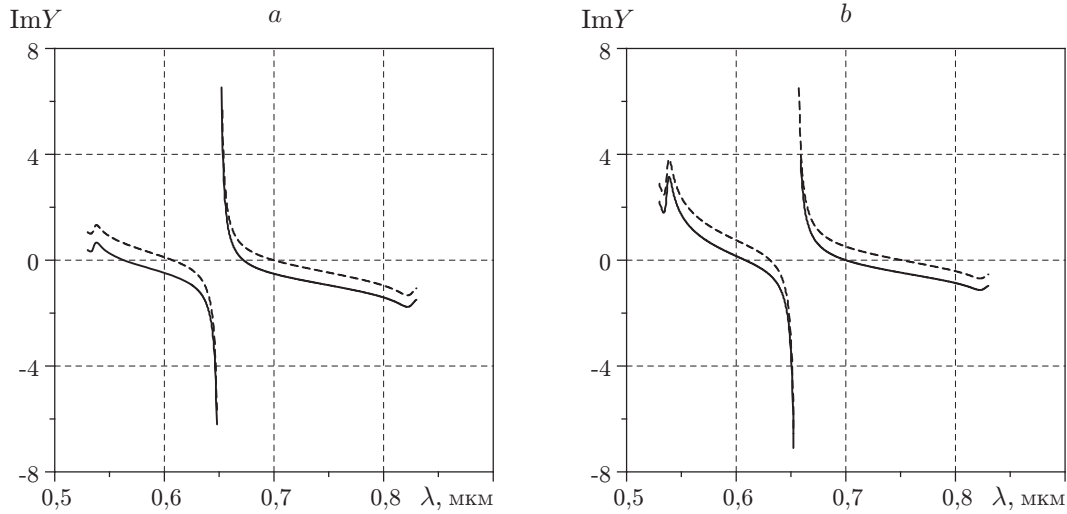


Рис. 2. Спектральные зависимости мнимой части адмиттанса металл-диэлектрических многослойных структур: *a* — все диэлектрические слои четвертьволновые; *b* — толщина прилегающего к металлу диэлектрического слоя увеличена. Штриховые кривые — структура без металлического слоя, сплошные — со слоем металла

Вначале проведём расчёт по упрощённой схеме. Допустим, что для $\lambda = 0,65$ мкм параметр $\xi = 1,55 - i0,63$ и плавно изменяется с длиной волны пропорционально величине d/λ , которая входит в ξ . В спектральном диапазоне $\lambda = 0,52-0,85$ мкм пределы изменения составят $\xi' = 1,84-1,39$ и $\xi'' = -(0,66-0,50)$. Плёнки с близкими параметрами могут быть получены экспериментально.

Спектральная зависимость мнимой части адмиттанса диэлектрической многослойной структуры Y'' из 18 слоёв (17 четвертьволновых и один полуволновой LL для $\lambda_0 = 0,65$ мкм) на границе с металлической плёнкой $Y''(\lambda)$ дана на рис. 2, *a* штриховой кривой. Здесь в крупном масштабе показаны только части кривой вблизи горизонтальной оси, т. е. значения Y'' вблизи λ_0 не приводятся. Из рисунка видно, что $Y''(\lambda) = 0$ для 0,6 и 0,7 мкм. При сложении с отрицательной величиной $\xi''(\lambda) = -0,63$ точки пересечения горизонтальной оси сдвигаются к 0,56 и 0,67, поэтому контур $R(\lambda)$ становится асимметричным. Чтобы восстановить симметрию, необходимо поднять кривую $Y''(\lambda)$ вверх. Это можно сделать, увеличив толщину слоя L' до $d_L = 1,25$ (в долях $\lambda_0/4$). На рис. 2, *b* вследствие увеличения толщины прилегающего слоя зависимость $Y''(\lambda)$ слегка приподнята. В результате условие $Y''(\lambda) + \xi''(\lambda) = 0$ выполняется для $\Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{к}} \approx \Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{д}}$. Если толщину прилегающего слоя сделать меньше четвертьволновой, то результатом будет уменьшение расстояния $\Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{д}}$ — кривая станет более асимметричной по сравнению с четвертьволновой многослойной структурой.

Результаты расчёта зависимости $R(\lambda)$ показаны на рис. 3. Видно, что в небольших пределах можно изменять асимметрию кривых $R(\lambda)$. На рисунке приведены кривые для трёх толщин d_L прилегающего к металлической плёнке L' -слоя: 0,77, 1,25 и 1,35. Это соответствует трём разным случаям асимметрии: $\Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{к}} > \Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{д}}$, $\Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{к}} \approx \Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{д}}$, $\Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{к}} < \Delta\lambda_{\text{мин}}^{\text{д}}$. Длины волн максимумов отражения слегка смещены в этих трёх случаях, но их можно совместить, изменив толщину промежуточного слоя.

Далее сделаны расчёты с учётом экспериментальных зависимостей ξ' и ξ'' , показанных на рис. 1. Как следует из рис. 4, аномалии в спектральной зависимости параметров металлической плёнки приводят к многообразию вариантов и потребуют дополнительных усилий, чтобы удовлетворить заданным требованиям по асимметрии кривой.

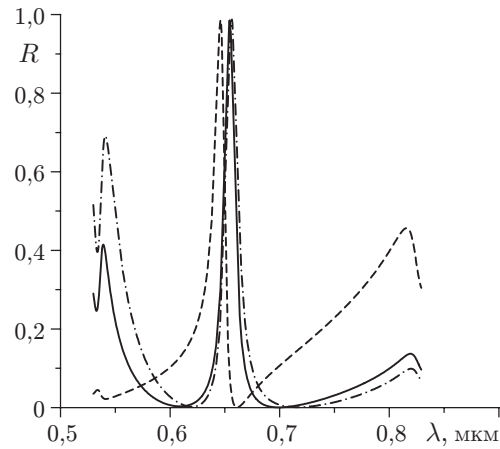


Рис. 3. Коэффициент отражения фильтра для трёх случаев асимметрии, 19-слойная структура с варьируемой толщиной прилегающего слоя L' : 0,77 (штриховая кривая), 1,25 (сплошная), 1,35 (штрихпунктирная)

Эти расчёты выполнены с применением МПП для металлического слоя. Для расчётов по модели МОС необходимо извлечь оптические константы из экспериментальных величин ξ' и ξ'' . При предположении, что толщина плёнки $d = 10$ нм, оптические константы могут быть получены по формуле

$$n, k = \sqrt{\frac{1}{2\gamma} \left(\sqrt{\xi'^2 + \xi''^2} \pm \xi'' \right)}.$$

Заметим, что величины n и k неразличимы при вычислении по данной формуле, и только экспериментальное измерение знака ξ'' устраняет эту неопределённость. Знак ξ'' можно найти, например, из измерений в схеме отражающего интерферометра [7]. Для данной плёнки ξ'' имеет отрицательное значение во всём спектральном диапазоне, т. е. $k > n$. На рис. 1 оптические константы, вычисленные по этой формуле, показаны штриховыми линиями. Результаты расчётов $R(\lambda)$ по МОС с использованием этих оптических констант хорошо совпадают с расчётами по МПП.

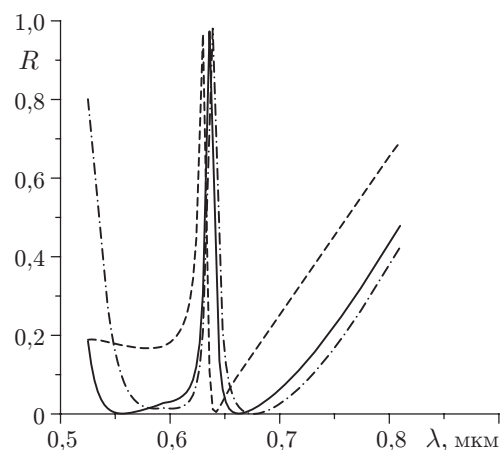


Рис. 4. Те же кривые, что на рис. 3, но с учётом дисперсии параметров металлической плёнки

Закключение. Как уже отмечалось, вариации асимметрии для рассчитанного случая могут быть получены только в небольших пределах. Но это имеет существенное значение, если нужно выделить слабую спектральную линию вблизи более сильной или убрать какой-то цвет при декорации. Многообразие вариантов возможно для других параметров металлической плёнки и диэлектрических слоёв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кард П. Г.** Теория узкополосного отражательного интерференционного светофильтра // Оптика и спектроскопия. 1965. **18**, вып. 4. С. 684–689.
2. **Голдина Н. Д., Троицкий Ю. В.** Узкополосные фильтры в отраженном свете // Оптика и спектроскопия. 1976. **40**, № 5. С. 935–938.
3. **Zheng S. Y., Lit W. Y.** Design of a narrow-band reflection IR multilayer // Can. Journ. Phys. 1983. **61**, N 2. P. 361–368.
4. **Gamble R., Lissberger P. H.** Reflection filter multilayers of metallic and dielectric thin films // Appl. Opt. 1989. **28**, N 14. P. 2838–2846.
5. **Tan M., Lin Y., Zhao D.** Reflection filter with high reflectivity and narrow bandwidth // Appl. Opt. 1997. **36**, N 4. P. 827–830.
6. **Голдина Н. Д.** Расчет несимметричных зеркал с тонкой поглощающей пленкой // Оптика и спектроскопия. 1979. **47**, № 4. С. 776–779.
7. **Голдина Н. Д., Захаров М. И., Троицкий Ю. В.** Синтез характеристик многолучевого отражающего интерферометра // Автометрия. 1975. № 3. С. 107–118.
8. **Голдина Н. Д.** Металлодиэлектрические фильтры в проходящем свете // Автометрия. 2008. **44**, № 2. С. 107–112.

Поступила в редакцию 1 сентября 2011 г.
