

Теперь, если выбрать m больше максимума правых частей (7) и (5), а s такое, как в (4), то из (3) будет следовать:

$$\|R_{s,m}\|_{H^2(D_{\sigma+h})} < 6\epsilon \text{ в } K.$$

Итак, проведено восстановление функции из класса Харди H^2 . Если же $f(t_1, t_2) \in W_2$, то функция $f(t_1, t_2) \exp(-2\pi i(t_1 + t_2)) \in H_2$ восстанавливается изложенным методом.

Полученную оценку остаточного члена можно использовать для сравнения возможностей восстановления функции по различным решеткам. Например, пусть первая решетка состоит из точек вида $(1/k, 1/n)$, $k, n = 1, 2, \dots$. Точки второй решетки расположены режек: $(1/2s, 1/2m)$, $s, m = 1, 2, \dots$. Очевидно, что узлы обеих решеток удовлетворяют условию (1). Из формул (4), (5) и (7) видно, что необходимая точность достигается быстрее в первом случае, т. е. когда узлы решетки располагаются чаще.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность проф. Л. А. Айзенбергу за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Л. А. Аналог теоремы Котельникова для неравномерных отсчетов. Экстраполяция и интерполяция амплитуды спектра Фурье финитных сигналов // ДАН СССР.— 1988.— 300, № 2.
2. Айзенберг Л. А., Кравцов Б. А. Вычислительный эксперимент по аналитическому продолжению спектра Фурье одномерных финитных сигналов. Сверхразрешение // Автометрия.— 1989.— № 1.
3. Айзенберг Л. А., Кравцов Б. А., Шаимкулов Б. А. Об интерполяции сигналов с финитным спектром Фурье. Вычислительный эксперимент // Автометрия.— 1989.— № 4.
4. Трофимов О. Е. О теореме Котельникова в полярных координатах // Автометрия.— 1985.— № 5.
5. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Наука, 1969.— Т. III.
6. Колмогоров А. М., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа.— М.: Наука, 1981.
7. Кусис П. Введение в теорию пространств H^p с приложением доказательства Вольфа теоремы о короне.— М.: Мир, 1984.
8. Айзенберг Л. А. Множества единственности для классов Винера. Аналог теоремы Котельникова для неравномерных отсчетов. Обращение преобразования Радона по неполным данным.— Красноярск.— 1987.— (Препр./ИФ СО АН СССР; 38М).
9. Айзенберг Л. А. Экстраполяция функций, голоморфных в произведении полу-плоскостей или полос. Аналитическое продолжение спектра // ДАН СССР.— 1986.— 290, № 2.
10. Айзенберг Л. А. Экстраполяция функций, голоморфных в произведении полу-плоскостей или полос. Аналитическое продолжение спектра // СМЖ.— 1988.— 29, № 4.

Поступило в редакцию 14 сентября 1989 г.

УДК 535.345

Ю. В. ТРОИЦКИЙ
(Новосибирск)

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ПРИ ОТРАЖЕНИИ СВЕТА ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Потери в диэлектрических многослойных покрытиях могут иметь различную физическую природу и локализацию. Естественно, что от конкретного вида потерь зависит их влияние на важные свойства многослойной системы, например на спектральные, условные и поляризационные характеристики, на лучевую прочность и т. д. В [1] сравниваются два вида поглощения: в объеме диэлектриков и поверхностное, сосредоточенное на границах слоев («пограничное»). Расчеты для трех типов многослойных покрытий — зеркала из равнотолщинных слоев, фильтра Фабри — Перо и просветляющего покрытия — показали, что оба указанных вида потерь дают очень похожие спектральные характеристики. Два из рассмотренных объектов исследованы в сравнительно узком диапазоне частот, а третий — просветляющее покрытие — в широком, однако анализ последнего не обнаружил резких спектральных особенностей и вследствие этого его следует считать малоинформативным. Поэтому возникает необходимость в исследовании широкополосной системы с более «выразительной» характеристикой, сильно зависящей от поглощения. Такой системой может быть,

© 1990 Троицкий Ю. В.

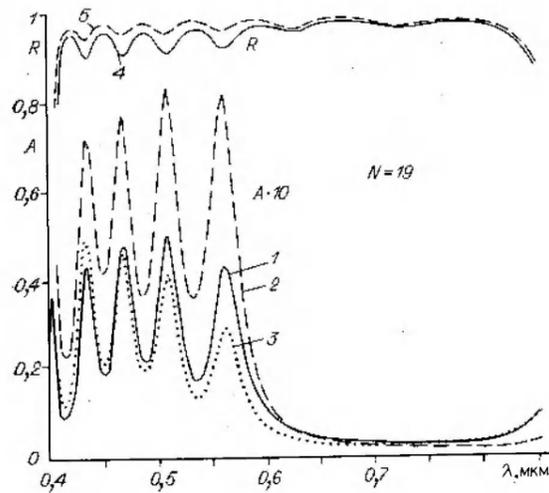


Рис. 1. Зависимость коэффициентов отражения R и поглощения A света для широкополосного 19-слойного диэлектрического зеркала [3] от длины волны:

кривые 1 и 4 относятся к случаю поверхностного пограничного поглощения, 2 и 3 — к объемному поглощению, кривая 5 получена в отсутствие поглощения [3]

например, широкополосное зеркало [2].

В настоящей работе, являющейся дополнением к [1], подробно исследуется влияние поглощения на зеркало, описанное в [3], — 19-слойное зеркало, предназначенное для интерферометра Фабри — Перо видимой области спектра. Положительная черта такого выбора объекта состоит в том,

что в [3] приводятся, кроме расчетных, также экспериментальные характеристики изготовленного экземпляра зеркала.

Рассматриваемое далее зеркало состоит из диэлектрических слоев с комплексными показателями преломления $\tilde{n}_H = n_H - i\chi_H$ и $\tilde{n}_L = n_L - i\chi_L$, подложка имеет коэффициент преломления n_G . В соответствии с [3] приняты значения $n_L = 1,33$ (криолит), $n_G = 1,5$. Считается, что диэлектрик большой плотности — сернистый цинк — обладает заметной дисперсией: $n_H = 2,252 + 1,57 \cdot 10^{-2}/\lambda^2 + 3,4 \cdot 10^{-4}/\lambda^4$, где длина волны λ измеряется в микронах [4]. В [3] найдены толщины каждого из 19 слоев, при которых обеспечивается высокое отражение ($R > 0,94$) в диапазоне $\lambda = 415-835$ нм. Расчеты производились в отсутствие поглощения ($\chi_H = \chi_L = 0$). Полученная в [3] зависимость $R(\lambda)$ изображена кривой 5 на рис. 1.

Мы рассчитали заново характеристики зеркала [3], сохраняя толщины и показатели преломления слоев, но вводя поглощение разной локализации, т. е. считая $\chi_H \neq 0$ или $\chi_L \neq 0$. Рассмотрен также случай пограничных потерь, которые описываются омически проводящими поверхностями на границах слоев и характеризуются величиной $\xi' = \text{Re } Y_s/Y_0$, где $1/Y_0 = 377$ Ом; Y_s — величина поверхностной проводимости. Считалось, что параметр ξ' одинаков для всех 20 границ слоев и равен $1,85 \cdot 10^{-3}$; при таком выборе четвертьволновый многослойник имел бы коэффициент поглощения $A^0 = 2 \cdot 10^{-3}$ [5]. Для удобства сравнения такое же значение A^0 задавалось и при наличии объемного поглощения, в результате чего выполнялось равенство $\xi' = (\pi/2)(\chi_H + \chi_L)$ (подробнее об этом см. [1]).

Кривая 4 на рис. 1 показывает зависимость $R(\lambda)$ при $\chi_H = \chi_L = 0$, $\xi' = 1,85 \times 10^{-3}$. Расчет проводился при помощи адмиттансных формул, приведенных в [2, 6]. Сравнивая кривую 4 с кривой 5, видим, что величина R заметно уменьшается, особенно на коротковолновой половине диапазона. Коэффициент пропускания T при этом не изменяется, а падение R происходит исключительно за счет роста коэффициента поглощения $A = 1 - R - T$. $A(\lambda)$ изображается кривой 1 в 10-кратно увеличенном масштабе. В рабочем диапазоне A изменяется от 1,3 (при $\lambda = 0,76$ мкм) до $25 A^0$ ($\lambda = 0,51$ мкм). Такие резкие изменения A типичны и для других описанных в литературе широкополосных зеркал [2].

Если потери носят чисто объемный характер ($\xi' = 0$), то коэффициент поглощения изображается кривыми 2 и 3. Для первой из них принято $\chi_H = 0$, $\chi_L = 1,17 \times 10^{-3}$; для второй — $\chi_L = 0$, $\chi_H = 1,17 \cdot 10^{-3}$. В первом случае A изменяется в пределах $0,75 \div 42 A^0$, во втором — $1,3 \div 25 A^0$.

Основные особенности и порядок величины потерь для кривых 1—3 примерно одинаковы (кривая 1 несколько ближе к кривой 3), и, следовательно, переход от пограничных потерь к объемным не вызывает существенного изменения характера кривых.

Характеристики $A(\lambda)$, представленные на рис. 1, соответствуют тому случаю, когда свойства всех диэлектрических слоев и границ между ними одинаковы. Однако реально свойства слоев и границ могут быть различными. Например, поглощение на границах $H \rightarrow L$ и $L \rightarrow H$ при изготовлении многослойника может оказаться разным и отличающимся от параметров на границе с воздухом и подложкой. Для случая, когда потери вызваны рассеянием на шероховатых границах, среднеквадратичная высота шероховатостей и, следовательно, эффективная проводимость границ [5] зачастую меняются по мере нанесения слоев. Этот случай можно воспроизвести при расчете, задавая параметр ξ' индивидуально для каждой границы. При этом, конечно, зависимость $A(\lambda)$ может оказаться другой, чем на рис. 1. Рис. 2 иллюстрирует вклад некоторых границ в общие потери 19-слойника. Для расчета кривых а—г принималось, что $\xi' \neq 0$ только для одной границы: соответственно 1-й (с возду-

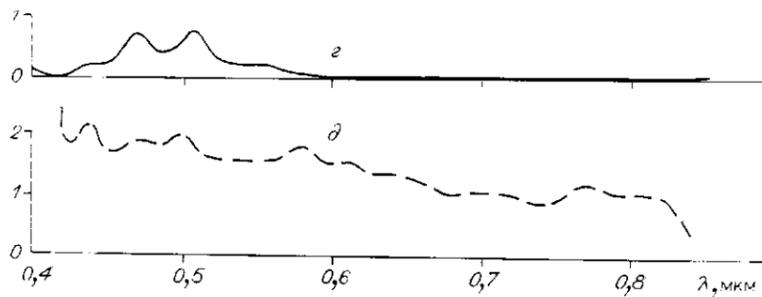


Рис. 2. Зависимость $A(\lambda)$ коэффициента поглощения зеркала от места расположения поглощающей границы:

кривые a и b соответствуют поглощению на 1-й, 2-й, 7-й или 10-й границах, считая от границы с воздухом, кривой b показана характеристика $A(\lambda)$, полученная из экспериментальных кривых работы [3]

хон), 2-, 7 и 10-й. Для каждой из них задавалось $\xi' = 1,85 \cdot 10^{-3}$.

Вклад каждой из границ различен по характеру и величине. Так, в длинноволновой части спектра потери определяются лишь 2-й границей $H \rightarrow L$, остальные дают в этой области пренебрежимо малый вклад. В коротковолновой части сказывается влияние почти всех границ, по каждой дает свою характеристику $A(\lambda)$, зависящую от распределения электрического поля по мере углубления в многослойник. Максимумы потерь соответствуют резонансам по λ в окрестности данной границы, 13-, 14-й и более далекие слои почти не влияют.

Имея измеренную зависимость $A(\lambda)$ готового зеркала, в принципе можно путем подголки определить значения ξ' на каждой из границ. Однако практически эту программу трудно реализовать из-за не очень высокой точности измерения A и наличия других источников потерь, кроме указанных выше. На рис. 3 из [3] приведены измеренные спектральные характеристики величин R и $1 - T$ для рассматриваемого 19-слойного зеркала, путем обмера которых может быть построена зависимость $A(\lambda) = 1 - T \cdot R$. Она приведена на рис. 2 (кривая b). Точность измерений и построения графиков в [3] неизвестна, поэтому кривую b на рис. 2 можно оценивать только качественно. Тем не менее видно, что эта кривая существенно отличается от всех остальных кривых рис. 1 и 2: глубина «модуляции» A с изменением λ значительно меньше, резонансы слабо выражены. Создается впечатление, что к потерям в объеме и на границах добавлена некоторая почти постоянная компонента, не зависящая от λ . Следовательно, потери в объеме и на границах — фактор, ответственный не более чем за 50% общих потерь, и существуют другие их источники. На рис. 2 показано, что причиной появления компоненты потерь, слабо зависящей от частоты, не может быть неоднородность поглощения в направлении, перпендикулярном к плоскости слоев. Например, если поглощение есть только на границе с воздухом (см. рис. 2, кривая a), то характеристика $A(\lambda)$ все равно имеет глубоко «изрезанный», резонансный вид.

Можно предположить следующий механизм нерезонансных потерь (см. рис. 3). Пусть на наружной поверхности многослойника имеется небольшое число крупных частиц неправильной формы (пыль, загрязнения, частицы плавящихся веществ), размер которых d значительно больше λ . Световой поток, падающий на такую частицу, поглощается или рассеивается, не давая вклада в

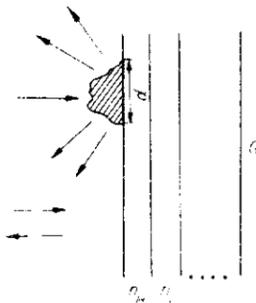


Рис. 3. Схема поглощения и рассеяния света крупными ($d \gg \lambda$) неоднородностями на поверхности диэлектрического покрытия

зеркальное отражение. Если загрязняющая крупная частица «замурована» внутри слоев, то на поверхности появляется «бугор», фазовая неоднородность, и падающий на нее свет отражается под углом, рассеивается и тоже не дает вклада в зеркальное отражение. Потери, связанные с этими крупными неоднородностями, при $d \gg \lambda$ зависят главным образом от геометрического фактора, изменение λ влияет мало.

Пусть на зеркало падает световой пучок с распределением электрического поля $E_{пад} = E_0 f(x, y)$, где x, y — координаты поперечной плоскости. Отраженный пучок имеет распределение $E_{отр} = \rho E_{пад}$, где $\rho = 0$ в области неоднородностей и $\rho = \rho_0 \neq 0$ в остальной части зеркала. Находим при помощи дифракционной формулы Кирхгофа поле E в дальней зоне на оси системы, получаем

$$E = \rho_0 C E_0 \int \int_{\rho \neq 0} f(x, y) dx dy,$$

C — постоянная, а интегрирование выполняется по части поверхности зеркала, не включающей неоднородности. Для нахождения поля $E_{ид}$ идеального однородного отражателя следует положить $\rho_0 = 1$ и интегрировать по всей площади зеркала

$$E_{ид} = C E_0 \int \int f(x, y) dx dy.$$

Таким образом, амплитудный коэффициент отражения зеркала с неоднородностями имеет вид

$$r = E/E_{ид} = \rho_0(1 - S),$$

где

$$S = \int \int_{\rho \neq 0} f(x, y) dx dy / \int \int f(x, y) dx dy$$

представляет собой долю поверхности зеркала, занимаемую неоднородностями $\rho \neq 0$. Энергетический коэффициент зеркального отражения равен $R = |\rho_0|^2(1 - S)^2$. Рассматривая таким же образом проходящий свет, для энергетического пропускания многослойника по интенсивности на оси в дальней зоне получаем выражение $T = |\tau_0|^2(1 - S)^2$, где τ_0 — амплитудный коэффициент пропускания основной части зеркала вне «загрязняющих» частей. «Эффективный» коэффициент поглощения, учитывающий потери на поглощение и рассеяние, равен $A_{эф} = 1 - T$. $R = 1 - (1 - S)^2(|\tau_0|^2 + |\rho_0|^2)$. Если собственное поглощение многослойника $A_0 = 1 - |\tau_0|^2 - |\rho_0|^2$ мало, то при $S \ll 1$ получаем полные потери энергии $A_{эф} \approx A_0 + 2S$. Эта формула справедлива не только для зеркала, но и для любых других диэлектрических структур. Таким образом, при $2S \gg A_0$ эффективные потери света $A_{эф} \approx 2S$ не зависят от λ . Постоянная составляющая, которая проявляется на рис. 2 (кривая δ), соответствует примерно $S \sim 0,005$.

В заключение можно сказать, что объемное и пограничное (равное для всех границ) поглощение влияет на спектральные характеристики типичного широкополосного зеркала почти одинаково. Моделирование потерь при помощи проводящих поверхностей с присвоением каждой границе своего веса позволяет учесть «перекос» границ; например, в случае рассеяния на шероховатостях можно учесть изменение этого параметра от слоя к слою, если оно известно.

Для объяснения результатов измерения в рассмотренном нами конкретном примере необходимо учесть механизм потерь, слабо зависящий от длины волны. В качестве такого механизма предлагается дифракция света от небольшого числа крупных частиц, «загрязняющих» поверхность зеркала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троицкий Ю. В. Сравнение диэлектрических многослойников с объемными и пограничными потерями // Оптика и спектроскопия.— 1990.— 68, № 1.
2. Троицкий Ю. В. Влияние поглощения на характеристики широкополосных диэлектрических зеркал // Оптика и спектроскопия.— 1988.— 65, № 6.
3. Aufmuth P., Brandt H.-W., Kiehl J. R. Berechnung und Herstellung von Systemen dünner dielektrischer Schichten für optische Anwendungen // Optik.— 1978.— 50, N 4.— S. 329.
4. Pelletier E., Giacomo P. Contrôle et réalisation de revêtements multidiélectriques présentant des caractéristiques spectrales imposée // Nouv. Rev. d'Opt. appl.— 1972.— 3, N 3.— P. 133.
5. Троицкий Ю. В. Проводящая поверхность как модель для описания потерь на границах слоев диэлектрического многослойника // Оптика и спектроскопия.— 1988.— 64, № 1.
6. Троицкий Ю. В. Расчет диэлектрических многослойников с потерями на границах слоев // Автометрия.— 1989.— № 2.

Поступило в редакцию 24 января 1990 г.