

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

УДК 535.345

Ю. В. Троицкий

(Новосибирск)

ПРЕДЕЛЫ СПРАВЕДЛИВОСТИ МОДЕЛИ
ПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ОПИСАНИИ ПОГРАНИЧНЫХ ПОТЕРЬ
В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНИКАХ

Описывается влияние тонких поглощающих «прослоек» вблизи границ слоев в диэлектрическом многослойнике. Расчеты, проведенные при различной толщине h , показателях преломления n и поглощения χ «прослоек», показывают, что на характеристики многослойника влияет не каждый из этих параметров в отдельности, а главным образом их произведение $n\chi h$. Это служит основанием для перехода к двумерному эквиваленту прослойки — модели проводящей поверхности, благодаря которой значительно ускоряется численный расчет многослойника.

Введение. Поглощение и рассеяние света в диэлектрических покрытиях — существенный ограничивающий фактор в современной оптике. Уровень потерь в покрытиях определяет максимальное значение добротности лазерных резонаторов, эффективность лазеров, разрешающую способность многолучевых интерферометров, возможность расширения диапазона перестройки лазеров, порог оптического повреждения и т. п. Становится общепризнанным, что расчет и синтез многослойных систем лазерного назначения необходимо вести с учетом поглощения в них. Поэтому характеристикам потерь, их локализации в многослойнике и методам расчета уделяется заметное внимание. Выяснилось, что обычное описание поглощения путем введения комплексного показателя преломления диэлектрических слоев не всегда соответствует реальной ситуации. В ряде работ [1—5] установлено, что часто поглощение не распределено равномерно в объеме диэлектриков, а сосредоточено в тонких областях вблизи границ слоев. Иногда в зависимости от технологии такие поглощающие «прослойки», возможно, появляются и внутри одного и того же диэлектрика [3]. Все это поднимает вопрос об адекватном математическом описании распространения света в многослойных системах с потерями (включая рассеяние), локализованными вблизи границ слоев. Прямолинейный подход к этой задаче состоит в том, чтобы рассматривать каждую поглощающую прослойку как однородный слой поглощающего диэлектрика толщиной h с комплексным показателем преломления $\tilde{n} = n - i\chi$ и использовать для численных расчетов обычные рекуррентные формулы. Однако этот путь имеет серьезные недостатки. Во-первых, увеличивается время расчетов из-за того, что вместо N -слойника приходится в общем случае рассматривать $2N + 1$ -слойник; дальнейшее замедление расчетов вызвано необходимостью считать показатель преломления дополнительных прослоек комплексным, а в случае наклонного падения учитывать также комплексность углов распространения света внутри них. Во-вторых, проведенные до сих пор эксперименты не дают сведений о

параметрах h , n и χ , которые к тому же должны зависеть от конкретной системы и технологии. В-третьих, требует доказательства сама возможность считать поглощающую прослойку однородным слоем. Примером возможного обобщения является работа [3], где каждая поглощающая прослойка, в свою очередь, считалась состоящей из четырех тонких дискретных пленок с общей толщиной около 5 нм. Еще один пример — теория «островковых» пленок, развиваемая в оптике металлических пленок.

Эффективный выход [6] из этих затруднений возникает в том случае, когда толщина поглощающей прослойки значительно меньше глубины скин-слоя в ее материале, а скачок фазы волны на этой прослойке также пренебрежимо мал. Тогда пограничная прослойка как бы теряет одно измерение, становится электродинамически двумерной и расчет ее влияния на распространение света значительно упрощается: вместо введения дополнительного слоя мы должны лишь слегка изменить граничные условия на каждой границе диэлектриков. Простые рекуррентные формулы, в которых учитывается изменение граничных условий, получены в [7—9]. Эти формулы представляют обобщение известного адмиттансного метода. Окрестность поглощающей границы можно трактовать как проводящую поверхность пренебрежимо малой толщины, которая характеризуется поверхностной проводимостью Y_s , в общем случае комплексной. Эта величина имеет размерность $(\text{Ом})^{-1}$ на квадратный участок поверхности и может зависеть от длины волны. Эффективность формул [7—9] подтверждается имеющейся у нас практикой расчетов. В качестве примера можно указать, что для многослойника с пограничным поглощением использование новых формул позволило довести скорость счета до 600 слоев в секунду (персональный компьютер ИЕМ АТ, процессор 80286 с сопроцессором 80287, 12 МГц, программа написана на Фортране). Это примерно в 2 раза больше полученной нами скорости счета для многослойника с объемным поглощением и в 4 раза — по сравнению с $2N + 1$ -слойником, включающим дополнительные поглощающие слои произвольной толщины, как описано выше. В случае наклонного падения света преимущество наших формул должно быть еще больше, так как при наличии только пограничного поглощения углы преломления в слоях являются действительными величинами.

Приведенные цифры носят предварительный характер и, может быть, зависят от конкретной структуры и даже от качества программирования. Однако положительный эффект представляется несомненным, и это является побудительной причиной для сравнения с традиционными расчетами. Естественно, возникает вопрос: при каких параметрах поглощающей прослойки, особенно толщины h , возможна замена ее проводящей поверхностью?

Возможность пренебрежения толщиной поглощающих прослоек в многослойнике. Для проверки справедливости той или иной идеализации, в принципе, необходимо сравнение с результатами эксперимента. Однако уровень экспериментирования в области слабопоглощающих многослойных структур в настоящее время недостаточен для однозначных выводов. Еще один способ проверки заключается в том, чтобы сравнить приближенный расчет с точным, основанным на знании физической структуры прослоек. Но этот путь сейчас также недоступен. Поэтому остается взять для сравнения какую-то известную модель, в которой толщина прослойки может варьироваться. Такой простейшей «эталонной» моделью может быть, например, однородный поглощающий слой с геометрической толщиной h и комплексным показателем преломления $\hat{n} = n - i\chi$. Уменьшая величину h , можно найти порог, при котором оптические свойства всей системы при одинаковом вносимом поглощении перестают зависеть от h . Тогда с практической точки зрения поглощающую прослойку можно считать двумерной. Этот порог зависит от многих факторов: конкретного вида структуры, числа слоев, параметров окружающих диэлектрических сред, величины n , требуемой точности расчетов и т. п. Для некоторых простых структур этот вопрос уже исследован. Например, случай одиночной поглощающей пленки на границе двух полубесконечных диэлектрических сред хорошо известен в теории металлических пленок, и первое приближение этой теории при $h \ll \lambda$ [10, 11], которым широко пользуются, соответствует

проводящей поверхности (дело только в переобозначении входящих в формулы величин). Поверхностная проводимость в оптической области выражается через толщину и объемные константы поглощающей пленки следующим образом [11]:

$$Y_s = iY_0(n - i\chi)^2 2\pi h/\lambda, \quad (1)$$

где $h \ll \lambda$, λ — длина волны в вакууме; Y_0 — волновая проводимость вакуума, равная 377 (Ом)^{-1} . В дальнейшем будем пользоваться безразмерным параметром $\xi = Y_s/Y_0$. Параметр ξ в общем случае комплексный, $\xi = \xi' + i\xi''$, и его действительная и мнимая части имеют вид:

$$\xi' = 4\pi n\chi h/\lambda, \quad (2)$$

$$\xi'' = 2\pi(n^2 - \chi^2)h/\lambda. \quad (3)$$

Основная задача настоящей статьи заключается в оценке возможности использования модели проводящей поверхности (МПП) в наиболее важном случае слабопоглощающих диэлектрических многослойников. Решаем эту задачу путем расчета частотных характеристик ряда типичных диэлектрических многослойников с варьруемой толщиной поглощающих пленок, расположенных на границах между основными диэлектрическими слоями.

На рис. 1, *a* показана многослойная система, состоящая из чередующихся слоев материалов с показателями преломления n_H , n_L и \hat{n} . Две первые среды будем считать непоглощающими, а третья среда обладает объемным погло-

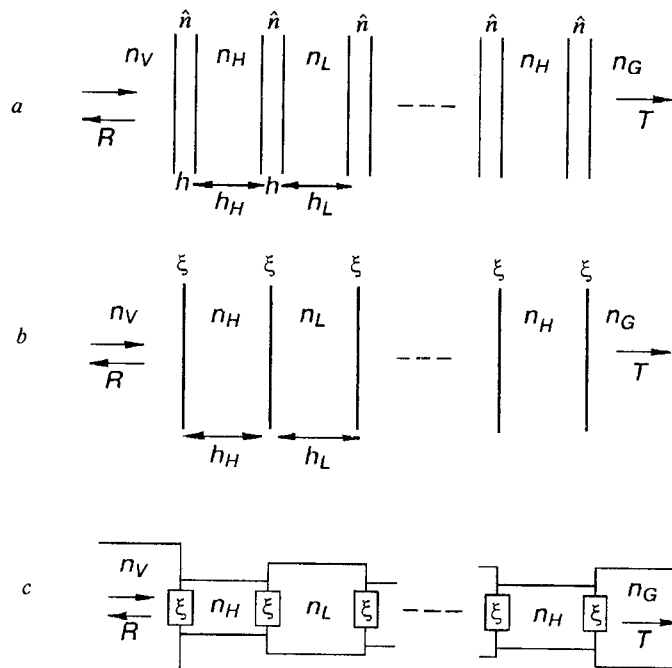


Рис. 1. Три возможных способа описания диэлектрических многослойников с поглощением в окрестности границ слоев:

a — поглощение сосредоточено в тонких однородных поглощающих прослойках с геометрической толщиной h и комплексным показателем преломления $\hat{n} = n - i\chi$; *b* — каждый поглощающий слой вследствие малой толщины h заменен проводящей поверхностью нулевой толщины, характеризующейся поверхностным адмиттансом $Y_s = \xi Y_0$; *c* — электрическая схема, эквивалентная рис. 1, *b* и состоящая из отрезков линий передачи с характеристическими адмиттансами n_H , n_L и параллельно включенных сосредоточенных адмиттансов

щением. Следовательно, n_H и n_L вещественны, а $\hat{n} \equiv n - i\chi$ — комплексный показатель преломления. Геометрические толщины слоев равны соответственно h_H , h_L и h . Число слоев основных диэлектриков n_H и n_L равно N , полное число слоев равно $2N + 1$. Многослойная система расположена между полубесконечными диэлектрическими средами n_V и n_G , свет падает из среды n_V .

Нас больше всего интересует случай, когда потери можно считать локализованными в области границы между диэлектриками n_H и n_L . Оптические свойства многослойника как целого зависят от h/λ , и можно оценить возможность замены поглощающего слоя конечной толщины поверхностью. Мы произвели численные расчеты для разных значений h/λ . Для определенности принимались значения: $N = 9$, $n_H = 2,3$, $n_L = 1,35$, $n_G = 1,46$, $n_V = 1$. Расчет производился адмиттантным методом [12]. Рассчитывалась спектральная зависимость коэффициентов отражения R , пропускания T и поглощения $A = 1 - R - T$ для структуры $(MHML)^4MHMG$, где L — четвертьволновые (для длины волны λ_0) слои диэлектрика n_L , $n_L h_L = \lambda_0/4$; H — слои диэлектрика n_H ; M — промежуточные слои поглощающего диэлектрика с $\hat{n} = n - i\chi$ толщиной h . Для кривых, представленных на рис. 2, принималось $n = n_H$ и $n_H(2h + h_H) = \lambda_0/4$. Иными словами, мы полагали, что поглощающие области расположены только в пределах диэлектрика n_H — в тех его частях, которые примыкают к слоям n_L . Каждый слой диэлектрика n_H мы считали как бы трехслойником MHM , компоненты которого имеют одинаковые показатели преломления, слои M имеют $\chi \neq 0$, а суммарная оптическая толщина трехслойника равна $\lambda_0/4$.

Чтобы можно было сравнивать кривые, вычисленные для разных h , для каждой кривой выбиралось свое индивидуальное значение χ : $A = 2 \cdot 10^{-3}$ при $\omega = \omega_0$.

На рис. 2 кривой 1 изображена зависимость A от ω/ω_0 при $h/\lambda_0 = 10^{-5}$. Эта кривая имеет минимум $A(\omega_0) = 2 \cdot 10^{-3}$ и два максимума при $\omega/\omega_0 = 0,76$ и $1,14$. Кривая 1 построена для $\chi = 6$. Точно такие же кривые получаются при $h/\lambda_0 = 10^{-4}$ и $h/\lambda_0 = 10^{-3}$ (соответственно было положено $\chi = 0,6$ и $\chi = 0,06$).

В случае $h/\lambda_0 = 10^{-2}$ ($\chi = 6 \cdot 10^{-3}$) получались несколько другие результаты (кривая 2). Еще большее отклонение наблюдалось при $h/\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-2}$

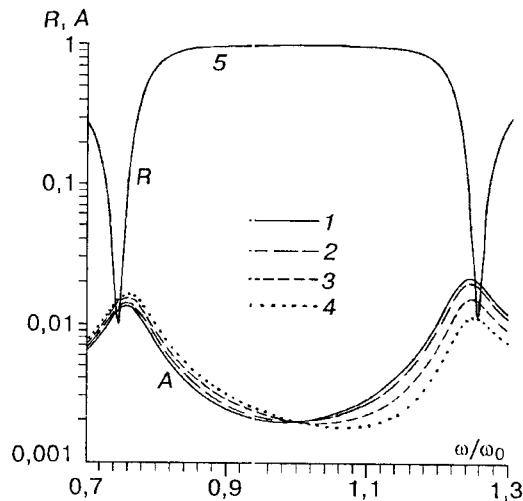


Рис. 2. Зависимость коэффициентов отражения (R) и поглощения (A) диэлектрического многослойника $(MHML)^4MHMG$ от частоты ω/ω_0 при различных значениях толщины h поглощающих пленок h .

Каждые три слоя MHM в сумме имеют оптическую толщину $\lambda_0/4$

($\chi = 3 \cdot 10^{-3}$), кривая 3. Кривая 4 построена для $h/\lambda_0 = 0,05435$ ($\chi = 1,1 \cdot 10^{-3}$), когда $nh = \lambda_0/4$ и $n_H h_H = 0$, т. е. поглощение распределено равномерно во всем объеме диэлектрика n_H .

Во всех рассмотренных случаях коэффициент отражения многослойника одинаков и на рис. 2 изображается кривой 5. Можно сделать вывод, что при очень малой толщине h поглощающих областей их влияние на характеристики многослойника не зависит от h , лишь бы произведение χh и, следовательно, параметр ξ оставались неизменными. При $h/\lambda_0 \geq 10^{-2}$ параметр h начинает влиять как независимая величина. Это значение h соответствует 9 % толщины четвертьволнового слоя.

В ряде случаев следует быть готовым к тому, что показатель преломления \hat{n} поглощающей прослойки неизвестен. Эта неопределенность не страшна, если h очень мало. На рис. 3 приведены результаты численных расчетов $A(\omega/\omega_0)$ для той же системы слоев, когда не только χ , но и n изменяется при вариации h . При этом считалось, что все время выполняется условие $n = \chi$, т. е., согласно формуле (3), поглощающие прослойки являются «безреактивными». Кроме того, все непоглощающие слои считались четвертьволновыми: $n_H h_H = n_L h_L = \lambda_0/4$.

Кривая 1 на рис. 3 получена при $h/\lambda_0 = 10^{-5}$ для $n = \chi = 3,71$. Эта кривая в точности аналогична кривой 1 на рис. 2. Кривая, рассчитанная для $h = 10^{-4}\lambda$ (при $n = \chi = 1,17$), на рис. 3 не показана, так как полностью сливается с кривой 1. Слабое расхождение намечается лишь при $h/\lambda_0 = 10^{-3}$ ($n = \chi = 0,37$, кривая 2). Наконец, при $h/\lambda_0 = 10^{-2}$ ($n = \chi = 0,117$, кривая 3) отклонение от кривой 1 становится довольно большим.

Сравнивая кривые рис. 2 и 3, видим, что при $h \leq 10^{-3}$ имеем возможность в очень больших пределах варьировать значения h , n и χ , не изменяя оптических свойств многослойника. Результат вычислений зависит не от h , а лишь от величины $n\chi h$, которая при таких малых h характеризует активную часть приведенной поверхностной проводимости. Таким образом, вместо трех параметров n , χ и h , поглощающий слой полностью описывается единственным параметром ξ' . Благодаря этому многослойник, изображенный на рис. 1, а, сводится к многослойнику на рис. 1, б с двукратным снижением полного числа слоев (N вместо $2N + 1$) и с некоторым усложнением граничных условий из-за того, что на границах находятся проводящие поверхности.

Известна аналогия между распространением электромагнитных волн в пространстве и волн тока и напряжения в линиях передачи. Поэтому система на рис. 1, б эквивалентна системе из отрезков линий с характеристическими адмиттансами n_H и n_L , изображенной на рис. 1, с. Проводящие поверхности аналогичны параллельно включенным сосредоточенным проводимостям ξ .

Влияние реактивной компоненты поверхностной проводимости. В

большинстве случаев поверхности можно считать омически проводящими и положить $\xi'' = 0$. Конечно, параметр ξ'' тоже влияет на характеристики, но значительно меньше,

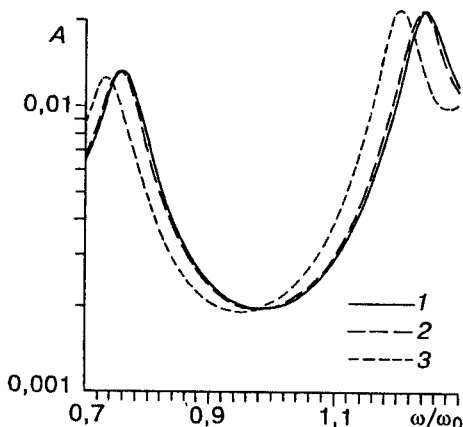


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения (A) диэлектрического многослойника $(MHL)^4 MHL$ от частоты ω/ω_0 при различных значениях толщины h поглощающих пленок M .

Все слои H и L четвертьволновые, а коэффициент преломления $\hat{n} = n - i\chi$ для каждой поглощающей пленки M выбран так, чтобы $n = \chi$

чем ξ' . Влияние реактивности сводится к некоторым дополнительным сдвигам фазы волны, падающей на границу. Как следует из [11], при $\xi'' = 0$ фаза коэффициента отражения границы равна нулю или π , а фаза коэффициента пропускания — нулю. При $\xi'' \neq 0$ фазы отличаются от указанных значений. Это в какой-то степени может быть скомпенсировано увеличением или уменьшением толщины диэлектрического слоя, на границе которого находится проводящая поверхность. Существует как бы эквивалентность между ξ'' и толщинами прилегающих слоев. Так как величину ξ'' труднее измерить, чем ξ' , то имеет смысл оценить, можно ли ее пренебречь при расчете. Эта оценка исходит из практически достижимой точности нанесения диэлектрических слоев. Пусть, например, слой $\lambda/4$ можно изготовить с точностью 1 %, т. е. ошибка по набегу фазы может составить $\Delta\varphi = \pm\pi/200$. Фаза коэффициента пропускания поверхности, находящейся на границе двух диэлектрических сред n_1 и n_2 , согласно [11], равна

$$\Phi_s = -\text{arctg} \frac{\xi''}{n_1 + n_2 + \xi'}$$

Посмотрим, какому значению ξ'' соответствует указанная выше ошибка $\Delta\varphi$. Примем $n_1 = 1,35$, $n_2 = 2,3$, $\xi' = 1,73 \cdot 10^{-3}$. Тогда условие $\Phi_s = \Delta\varphi$ будет выполнено при $\xi'' = \pm 0,057 = \pm 33\xi'$. Если при расчете взять очень большое значение $\xi'' = \pm 30\xi'$, то получим такое же отклонение от варианта $\xi'' = 0$, как при ошибке в нанесении слоя. Следовательно, при расчетах можно принимать $\xi'' = 0$ без ущерба для точности.

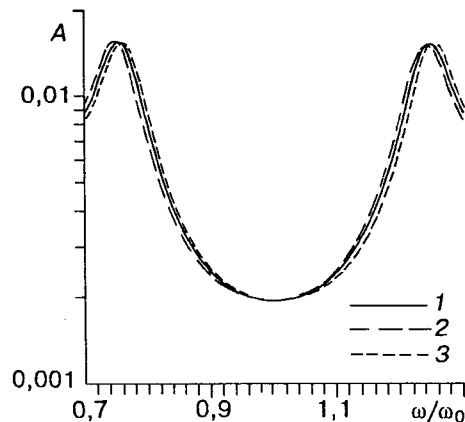
Изложенное иллюстрируется рис. 4, где приведены результаты расчета 9-слойника, описанного выше, на каждой из 10 границ которого находились одинаковые проводящие поверхности $\xi' = 1,73 \cdot 10^{-3}$. Для кривой 1 принято $\xi'' = 0$, а для кривых 2 и 3 — соответственно $\xi'' = 20\xi'$ и $\xi'' = -20\xi'$. Видно, что реактивность вызывает лишь несущественный сдвиг кривых по горизонтали.

Следует обратить внимание, что кривые на рис. 4 в отличие от кривых на рис. 2 и 3 почти симметричны относительно точки $\omega = \omega_0$. Это связано с тем, что для каждой кривой принято предположение, что $\xi = \text{const}$, т. е. отсутствует частотная дисперсия. В то же время при расчете кривых рис. 2 и 3 принято постоянство n и χ по диапазону, и вследствие этого величина ξ пропорциональна ω , так как она равна $i(n - i\chi)^2\omega h/c$. Отличие кривых 1 на рис. 2 и 3 и кривых на рис. 4 связано с тем, что в первом случае ξ обладает частотной дисперсией, а во втором случае дисперсии ξ нет. Вопрос о дисперсии поверхностной проводимости важен для расчета широкополосных многослойных систем и должен решаться при помощи измерений или путем изучения физической природы конкретных поглощающих пленок.

Подводя итоги изложенному в этом разделе, можно сказать, что модель проводящей поверхности дает такие же результаты, как рассмотренное однородное поглощающее слоя с толщиной менее $(10^{-2} - 10^{-3})\lambda$.

Рис. 4. Влияние реактивной компоненты проводимости ξ'' на спектральные характеристики $A(\omega/\omega_0)$ многослойника $(HL)^4HG$ с проводящими поверхностями на границах.

Параметры диэлектриков такие же, как для рис. 2 и 3; $\xi' = 1,73 \cdot 10^{-3}$, $\xi'' = 0$ (кривая 1), $\xi'' = 20\xi'$ (кривая 2) и $\xi'' = -20\xi'$ (кривая 3)



Заключение. Представленные расчеты показывают, что однородная поглощающая пленка очень малой толщины, расположенная на границе диэлектрических слоев в многослойнике, влияет на характеристики многослойника так же, как проводящая поверхность. Влияние этой пленки при малых h зависит не от параметров h , n и χ по отдельности, а главным образом от их произведения $n\chi h$. Это облегчает расчет многослойников в тех случаях, когда параметры пограничных поглощающих прослоек неизвестны, и открывает возможность применения удобных рекуррентных формул [7—9]. Расчеты относились лишь к диэлектрическим зеркалам, но одновременно демонстрируют метод, который может быть использован и в других многослойных структурах с локализованным поглощением.

Сравнение двух методов расчета, основанных на однородной пленке и на проводящей поверхности, не обязательно подразумевает, что во всех случаях первый из этих методов является точным, а второй дает меньшую точность. Обе эти модели идеализированные, и можно даже представить реальную структуру поглощающей прослойки и диапазон ее размеров, при которых модель проводящей поверхности даст фактически большую точность, чем модель однородного слоя.

Если данные о заметном ускорении расчетов при использовании МПП получают дальнейшее практическое подтверждение, то не исключено, что этот метод станет основным инструментом расчета слабопоглощающих диэлектрических структур, за исключением лишь тех случаев, когда локализация потерь имеет принципиальное значение. Представляется интересным распространение МПП на матричный метод расчета многослойных систем.

Настоящая работа частично финансировалась за счет Межотраслевой научно-технической программы России «Оптика. Лазерная физика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Temple P. A. Measurement of thin-film optical absorption at air-film interface, within the film and at the film-substrate interface // *Appl. Phys. Lett.* 1979. 34. P. 677.
2. Walther H. G., Welsch E., Opfermann J. Calculation and measurement of the absorption in multilayer films by means of photoacoustics // *Thin Solid Films.* 1986. 142. P. 27.
3. Yamaguchi T., Tamura H., Taga S., Tsuchiya S. Interfacial optical absorption in TiO_2 — SiO_2 multilayer coatings prepared by rf magnetron sputtering // *Appl. Opt.* 1986. 25. P. 2703.
4. Котликов Е. Н. Исследование поглощения в зеркалах и пленках из селенида цинка и фторидов // *Оптика и спектроскопия.* 1991. 70, № 4. С. 838.
5. Guenther K. H. Recent progress in optical coating technology: low voltage ion plating deposition // *Proc. SPIE.* 1990. 1270. P. 211.
6. Троицкий Ю. В. Проводящая поверхность как модель для описания потерь на границах слоев диэлектрического многослойника // *Оптика и спектроскопия.* 1988. 64, № 1. С. 140.
7. Троицкий Ю. В. Расчет диэлектрических многослойников с потерями на границах слоев // *Автометрия.* 1989. № 2. С. 97.
8. Троицкий Ю. В. Наклонное падение света на многослойную систему с поглощением на границах слоев // *Радиотехника и электроника.* 1991. 36, № 10. С. 1896.
9. Troitski Y. V. Optical losses in dielectric multilayer coatings and their influence on characteristics of laser resonators // *Proc. SPIE.* 1993. 1782. P. 85.
10. Wolter H. *Optik dünner Schichten* // *Handbuch der Physik.* 1956. 24. S. 461.
11. Троицкий Ю. В. Модель проводящей поверхности при изучении оптических свойств тонких металлических пленок // *Автометрия.* 1972. № 6. С. 91.
12. Бернинг П. Х. Теория и расчет оптических тонких пленок // *Физика тонких пленок.* М.: Мир, 1967. Т. 1. С. 91.

Поступила в редакцию 12 марта 1997 г.