

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.417

**СИНТЕЗ МНОГОСЛОЙНЫХ ШИРОКОПОЛОСНЫХ
МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ****Н. В. Гришина***(кафедра математики)*

Рассматривается синтез широкополосных металлодиэлектрических покрытий с заданными спектральными свойствами. Синтезированы высококачественные теплоотражающие отрезающие фильтры, использующие прослойки серебра и меди, и покрытие с низким отражением и коэффициентом пропускания $\sim 10\%$ в видимом диапазоне спектра, включающее прослойки никеля.

Широкое применение многослойных оптических покрытий ставит задачу создания покрытий со все более разнообразными спектральными свойствами. Методы синтеза диэлектрических покрытий развиваются достаточно давно и позволяют в большинстве случаев достичь высокой степени точности в получении систем с различными заданными спектральными характеристиками. Но при проектировании широкополосных, т. е. работающих в широких спектральных диапазонах, диэлектрических покрытий требуемое число слоев системы может оказаться очень большим. Это затрудняет реализацию таких систем на практике и ухудшает качество получаемых покрытий из-за неизбежных погрешностей в параметрах слоев при напылении. В тех случаях, когда требуемый спектр покрытия должен иметь широкую область отражения, использование металлических прослоек позволяет значительно уменьшить (часто во много раз [1]) число слоев в синтезируемых системах. В тех же случаях, когда требуется создать покрытие с двумя одновременно заданными спектральными характеристиками (коэффициентом отражения и коэффициентом пропускания) или с заданным спектральным коэффициентом поглощения, использование металлических или других сильно поглощающих материалов становится необходимым.

Особенности и сложность синтеза металлодиэлектрических систем связаны, с одной стороны, с необходимостью учитывать поглощение и дисперсионные свойства металлов, т. е. рассматривать комплексные значения показателей преломления материалов $\tilde{n} = n + i\chi$ (мнимая часть показателя преломления — коэффициент экстинкции χ — отвечает за поглощение в данном материале) и учитывать зависимость показателя преломления и коэффициента экстинкции от длины волны λ . Другая сложность, с которой приходится сталкиваться при синтезе поглощающих покрытий, связана с выбором материалов и с заданием последовательности показателей преломления слоев (т. е. последовательности материалов) в покрытии. При создании диэлектрических покрытий обычно используются так называемые двухкомпонентные покрытия, состоящие из слоев с чередующимися показателями преломления n_L и n_H ($n_L < n_H$). Такие покрытия являются наиболее технологичными для современной напылительной техники. Кроме того, как показали математические исследования необходимых условий оптимальности системы [2, 3], именно в классе двухкомпонентных покрытий в большинстве случаев следует искать оптимальное решение задачи синтеза. При этом следует выбирать материалы с максималенно и минималенно возможными значениями показателя преломления. Для таких систем:

задача синтеза сводится к нахождению числа слоев и толщин слоев покрытия. Сложнее обстоит дело при использовании поглощающих материалов. В этом случае значения показателей преломления материалов располагаются уже не на действительной прямой, а на комплексной плоскости. При изменении длины волны падающего излучения положение этих точек сильно меняется за счет дисперсии. Поэтому выбор материалов и их последовательности при синтезе широкополосных покрытий оказывается непростой задачей. При создании широкополосных поглощающих покрытий необходимо искать не только толщины слоев, но и композицию материалов в покрытии.

К настоящему времени численно проводился синтез частных типов поглощающих покрытий, предназначенных для работы на одной длине волны (см., напр., [4, 5]) или в узком спектральном диапазоне (см., напр., [6, 7]). В этих случаях возможно введение металлического слоя без учета дисперсии. Что касается широкополосных металлodieлектрических покрытий, то в литературе рассматривался только один, хотя и очень важный для практики, класс покрытий — отрезающие фильтры. Отрезающие фильтры обладают высоким пропусканием на определенном участке спектра и высоким отражением в прилегающей к нему спектральной области. Такие системы необходимы при решении задач солнечной энергетики, приборостроения, светотехники. Ряд трехслойных металлodieлектрических отрезающих фильтров с прослойкой серебра был получен экспериментально путем наблюдения при напылении покрытия за максимумами (минимумами) пропускания (отражения) на определенной длине волны падающего света [8, 9]. Численно синтез широкополосных металлodieлектрических покрытий осуществлен в единственной работе [1], где синтезирован ряд отрезающих фильтров с одной прослойкой металла. В настоящей работе ставится целью получение отрезающих фильтров с лучшими спектральными свойствами, чем известными до сих пор, и создание покрытий с одновременно заданными спектральными коэффициентами отражения $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$. Вторая задача решается впервые.

В работе [10] подробно описывалась программа синтеза многослойных оптических покрытий, имеющих заданные спектральные характеристики, с учетом дисперсии и поглощения материалов. Для оценки близости спектральных характеристик получаемого покрытия к требуемым функциям вводится оценочный функционал F . Задача синтеза рассматривается в вариационной постановке и сводится к минимизации оценочного функционала по толщинам слоев d_j ($j=1, 2, \dots, N$) при заданном числе слоев N и при заданной композиции материалов. На первом этапе минимизация проводится методом градиентного спуска, а затем при приближении к локальному минимуму, для преодоления сложностей, связанных с «овражистой» структурой функционала — методом сопряженных градиентов. Для расчета энергетических коэффициентов отражения $R(\lambda)$ и пропускания $T(\lambda)$ используются рекуррентные формулы для амплитудных коэффициентов отражения и пропускания, которые при наличии поглощения оказываются более эффективными, чем матричные. В работе выведены и используются эффективные рекуррентные формулы для расчета производных спектральных коэффициентов по толщинам слоев ($dR/d(d_j)$ и $dT/d(d_j)$), входящих в градиент функционала F . Дисперсия и поглощение материалов при синтезе могут задаваться либо аналитически, либо таблично.

В данной работе при синтезе металлodieлектрических покрытий, как и в работе [1], используется этот же подход. При выборе компо-

зиции материалов система строится постепенно. К найденной системе с малым числом слоев либо со стороны подложки, либо со стороны внешней среды добавляется новый слой. Выбирается материал этого слоя, и в качестве начальных приближений при минимизации F задаются системы с уже найденными толщинами старых слоев и несколькими значениями (как правило, 4—6 значений для диэлектрического слоя и 2 значения для металлического слоя) толщины нового слоя. В процессе минимизации F все толщины слоев оптимизируются. Тот материал и те значения толщин слоев, которые соответствуют наиболее глубокому найденному локальному минимуму оценочного функционала, используются на следующем шаге конструирования системы. Такой подход не требует больших затрат машинного времени и позволяет достичь хороших результатов синтеза.

Начнем с рассмотрения синтеза очень важных для практики теплоотражающих отрезающих фильтров. Эти покрытия должны иметь высокое пропускание в видимом диапазоне длин волн от 0,4 до 0,8 мкм и высокое отражение в ближнем ИК-диапазоне длин волн (0,8—2,0 мкм). Такие системы необходимы в светотехнике для создания эффективных источников света, в приборостроении для предотвращения нагревания приборов, во многих других практических применениях. При синтезе покрытий с заданным энергетическим коэффициентом отражения $R(\lambda)$ оценочный функционал вводится в виде

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) [R(\lambda) - \hat{R}(\lambda)]^2 d\lambda,$$

где $[\lambda_1, \lambda_2]$ — диапазон длин волн, в котором проводится синтез, $R(\lambda)$ — энергетический коэффициент отражения покрытия, $v(\lambda)$ — весовая функция. В данной задаче $\lambda_1 = 0,4$ мкм, $\lambda_2 = 2,0$ мкм, $\hat{R}(\lambda) = 0$ в диапазоне длин волн 0,4—0,8 мкм и $\hat{R}(\lambda) = 1$ в диапазоне 0,8—2,0 мкм, функция $v(\lambda)$ выбиралась тождественно равной единице на всем интервале длин волн, за исключением точки $\lambda = 0,8$ мкм, где $v(\lambda)$ выбиралась равной нулю.

В работе [1] при синтезе теплоотражающих покрытий с одной прослойкой металла в качестве металлических материалов рассматривались серебро, медь, алюминий и хром. Лучшие системы были получены при использовании слоя серебра. При выборе других металлов наилучшие по качеству спектральных характеристик результаты дает использование слоя меди, затем идут системы, использующие алюминий. В данной работе при создании теплоотражающих покрытий в качестве металлических материалов выбирались серебро, медь и алюминий. Диэлектрические слои имеют показатели преломления $n_L = 1,45$ (SiO_2) и $n_H = 2,30$ (TiO_2) (среди широко распространенных высокотехнологических материалов были выбраны материалы с наибольшим и наименьшим значениями показателей преломления), показатель преломления подложки $n_l = 1,52$ (стекло), внешняя среда — воздух ($n_0 = 1,0$). За начальные системы были взяты трехслойные фильтры, приведенные в работе [1]. Везде в дальнейшем слои будут отсчитываться от подложки.

Рассмотрим более подробно синтез систем, использующих серебро. В таблице приведены значения оценочных функционалов лучших полученных систем для различных рассматривавшихся композиций материалов в покрытии. Как видно из этой таблицы, не только среди трехслойных [1], но и среди четырехслойных и пятислойных систем

Число слоев в системе	Число металлических слоев	Последовательность материалов (от подложки)	Значение оценочного функционала
3	1	$n_H/Ag/n_H$	$4,56 \cdot 10^{-2}$
4	1	$n_H/Ag/n_H/n_L$	$4,69 \cdot 10^{-2}$
	2	$Ag/n_H/n_L/n_H$ $n_H/Ag/n_H/Ag$	$4,14 \cdot 10^{-2}$ $3,36 \cdot 10^{-2}$
5	1	$n_H/Ag/n_H/n_L/n_H$	$2,63 \cdot 10^{-2}$
	2	$n_H/Ag/n_H/Ag/n_L$ $n_H/Ag/n_H/Ag/n_H$	$2,03 \cdot 10^{-2}$ $1,66 \cdot 10^{-2}$
6	1	$n_H/Ag/n_H/n_L/n_H/n_L$	$2,20 \cdot 10^{-2}$
	2	$n_H/Ag/n_H/Ag/n_H/n_L$	$1,63 \cdot 10^{-2}$

наилучшие результаты достигаются среди двухкомпонентных покрытий, состоящих из прослоек серебра и диэлектрических слоев с показателями преломления n_H . На рис. 1 приведены коэффициенты отражения лучших полученных трех-, четырех- и пятислойных систем. Кривая 1 соответствует трехслойной системе с последовательностью слоев от подложки $n_H/Ag/n_H$ ($F=4,56 \cdot 10^{-2}$) и геометрическими толщинами

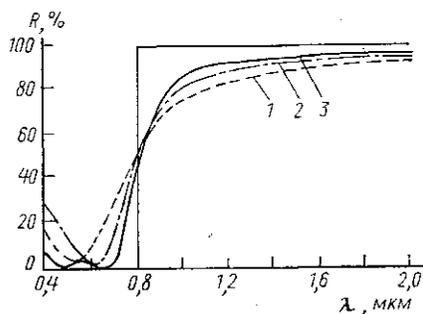


Рис. 1

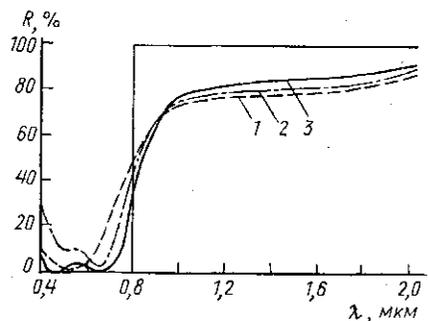


Рис. 2

слоев 331, 209 и 347 Å, кривая 2 — четырехслойной системе $n_H/Ag/n_H/Ag$ ($F=3,36 \cdot 10^{-2}$) с толщинами слоев 293, 139, 562 и 69 Å, кривая 3 — пятислойной системе $n_H/Ag/n_H/Ag/n_H$ ($F=1,66 \cdot 10^{-2}$) с толщинами слоев 284, 130, 700, 152 и 324 Å.

Аналогичные результаты были получены и при синтезе теплоотражающих покрытий с использованием слоев меди. Здесь также наилучшими оказались двухкомпонентные покрытия. На рис. 2 приведены коэффициенты отражения лучших из синтезированных трех-, четырех- и пятислойных систем, использующих медные прослойки. Кривая 1 соответствует трехслойной системе с последовательностью слоев от подложки $n_H/Cu/n_H$ ($F=7,45 \cdot 10^{-2}$) с геометрическими толщинами слоев 333, 239 и 337 Å; кривая 2 — четырехслойной системе $n_H/Cu/n_H/Cu$ ($F=7,37 \cdot 10^{-2}$) с толщинами 314, 158, 562 и 78 Å, кривая 3 — пятислой-

ной системе $n_H/\text{Cu}/n_H/\text{Cu}/n_H$ ($F=5,09 \cdot 10^{-2}$) с толщинами слоев 320, 143, 724, 176 и 337 Å. Покрытия, использующие медь, уступают по своим спектральным свойствам покрытиям, включающим серебро, но они и значительно дешевле, так что во многих случаях могут оказаться предпочтительнее на практике. Заметим, что при синтезе диэлектрических систем с числом слоев до 25—30 аналогичные спектральные характеристики не достигаются. То есть введение металлических материалов при синтезе теплоотражающих покрытий позволяет сократить число слоев системы более чем в 5—10 раз. Что касается покрытий, использующих в качестве металлического материала алюминий, то они оказываются значительно хуже по своим спектральным качествам, чем системы с серебром и медью, и здесь не приводятся.

Теперь рассмотрим синтез покрытия с двумя одновременно заданными спектральными характеристиками. При создании плат для вычислительной техники требуются покрытия, имеющие коэффициент пропускания около 10% и низкое отражение в диапазоне длин волн падающего излучения 0,4—0,7 мкм. То есть коэффициент поглощения такого покрытия должен быть порядка 90% во всем интересующем нас диапазоне. Без использования металлических слоев здесь не обойтись. Оценочный функционал в этой задаче выбирался в виде

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [R(\lambda) - \hat{R}(\lambda)]^2 d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [T(\lambda) - \hat{T}(\lambda)]^2 d\lambda,$$

где $\lambda_1=0,4$ мкм, $\lambda_2=0,7$ мкм; $\hat{R}(\lambda)=0$ и $\hat{T}(\lambda)=0,1$ во всем заданном интервале. Рассматривались металлические прослойки из серебра, меди, алюминия, никеля и хрома. Диэлектрические материалы и подложка

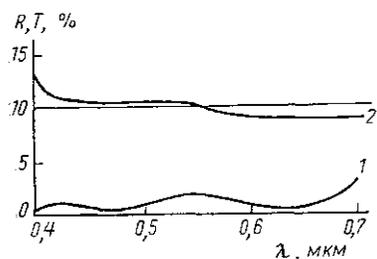


Рис. 3

использовались те же, что и в предыдущей задаче. Синтез покрытия с требуемыми свойствами проводился аналогично описанному ранее, но оказался более длительным и сложным. Лучшие результаты получены при использовании прослоек из никеля. Окончательная система имеет девять слоев (из них три прослойки из никеля). Последовательность материалов от подложки: $n_H/\text{Ni}/n_H/n_L/n_H/\text{Ni}/n_L/\text{Ni}/n_L$, геометрические толщины слоев: 821, 137, 742, 937, 144, 106, 996, 77 и 708 Å. На рис. 3 при-

ведены коэффициенты отражения (кривая 1) и пропускания (кривая 2) синтезированной системы. Это первая полученная система с двумя одновременно заданными спектральными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гришина Н. В. // *Опт. и спектр.* 1988. 64, № 1. С. 151. [2] Тихонравов А. В. // *Дифф. уравнения.* 1985. 21, № 9. С. 1516. [3] Свешников А. Г., Тихонравов А. В., Яншин С. А. // *ЖВМ и МФ.* 1983. 23, № 4. С. 929. [4] Az-zam R. M. A., Bu-Habib E., Casset J., Chassaing G., Gravier P. // *Appl. Opt.* 1987. 26, N 4. P. 719. [5] Lee C.-C., Chu C.-W. // *Appl. Opt.* 1987. 26, N 3. P. 2544. [6] Голдина Н. Д., Троицкий Ю. В. // *Опт. и спектр.* 1976. 40, № 5. С. 935. [7] Southwell W. H. // *Appl. Opt.* 1980. 19, N 16. P. 2688. [8] Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия. Л., 1977. С. 195. [9] *Физика тонких пленок*/Ред. Г. Хасс, Р. Э. Тун. М., 1967. Т. 2. С. 310—313. [10] Гришина Н. В., Тихонравов А. В. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* 1985. 26, № 1. С. 11.