

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 6 — 1976

УДК 535.417

А. В. ТИХОНРАВОВ, А. Ю. КЛЕМЕНТЬЕВА

СИНТЕЗ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ГРАДИЕНТНОГО СПУСКА

Рассматривается задача синтеза многослойных покрытий с коэффициентом пропускания, приближающимся к требуемому с некоторой заданной точностью. Метод не требует задания начальной системы. Приводятся примеры получения трех видов покрытий, применяющихся на практике.

Синтез многослойных покрытий представляет одну из наиболее сложных проблем оптики тонких пленок, поскольку получение аналитических выражений для параметров слоев, при которых система имеет требуемую спектральную характеристику, в общем случае невозможно.

Многообразие интерференционных покрытий, применяющихся в настоящее время, очень широко, число слоев достигает 10—15 и более, что и обуславливает развитие методов синтеза систем с большим числом слоев. Общей чертой методов синтеза покрытий с большим N является использование в составе покрытий отдельных подсистем, имеющих некоторые свойства синтезируемой системы.

Таковы методы Эпштейна [1], Телена [2], Эльснер [3]. Параметры части слоев системы здесь подбираются для обеспечения заданных оптических свойств в тех спектральных участках, где взяты опорные системы не дают нужных результатов. Авторы пользовались подобным методом при конструировании многослойных отрезающих систем и широкополосных отражателей [4, 5].

Эффективным методом синтеза многослойных систем является метод минимизации оценочной функции путем градиентного спуска и поиска. Параметры слоев (или изменения параметров) находятся из условия минимизации оценочной функции. Известно применение метода как при условии выбора начальной системы [6], так и без этого условия при переменном числе слоев системы [7]. При значительной эффективности метода, позволившего сконструировать ряд систем, он не является вполне совершенным и требует дальнейшей разработки. Сложность оценочной функции системы, ее нерегулярный ход при росте числа слоев затрудняют нахождение самого «глубокого» минимума, отвечающего лучшей оптимальной конструкции системы.

В данной работе рассматривается синтезирование системы, имеющей коэффициент пропускания $T(\lambda)$ аппроксимирующий требуемый с некоторой заранее заданной точностью.

Поскольку данная задача даже при фиксированном числе слоев неоднозначна, ищется система, удовлетворяющая дополнительному условию минимизации суммарной толщины покрытия. Рассматриваются непоглощающие системы слоев при прямом падении параллельного пучка света.

Описание метода

Пусть $\overline{T(\lambda)}$ — требуемый коэффициент пропускания, который надо аппроксимировать в интервале длин волн $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$. Оптическую систему из N слоев будем описывать N -мерными векторами $d = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, координатами которого являются толщины слоев. Коэффициент пропускания $T(\lambda)$ такой системы (показатели преломления слоев мы считаем заданными и принимающими значение n_1 для нечетных слоев и n_2 — для четных) можно выразить через координаты вектора d , используя матричный метод [8]. Эту зависимость обозначим

$$T(\lambda) = Ad. \quad (1)$$

Далее обозначим

$$\delta = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) [T(\lambda) - \overline{T(\lambda)}]^2 d\lambda \quad (2)$$

как меру отклонения функции $T(\lambda)$ от требуемой характеристики. Здесь $v(\lambda)$ — некоторая весовая функция. Пусть

$$\delta_0 = \inf \left\{ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) [T(\lambda) - \overline{T(\lambda)}]^2 d\lambda \right\}, \quad (3)$$

где нижняя грань берется по всем $T(\lambda)$, соответствующим системам с любым конечным числом слоев и чередующимися показателями преломления n_1 и n_2 .

Очевидно, может не существовать система слоев с коэффициентом пропускания $\overline{T(\lambda)}$. Поэтому мы будем искать такую систему, коэффициент пропускания которой $T(\lambda)$ приближается к $\overline{T(\lambda)}$ с некоторой заранее заданной точностью δ (точность приближения δ определяется формулой (2)). Такая система всегда существует, если $\delta > \delta_0$.

А. Н. Тихоновым и В. Н. Дмитриевым при решении обратной задачи теории антенн [9] было указано, что обратные задачи синтеза являются некорректными [10], и был дан подход к их решению, основанный на идее регуляризации.

Введем в рассмотрение следующий функционал:

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) [Ad - \overline{T(\lambda)}]^2 d\lambda + \alpha \left(\sum_{i=1}^N d_i \right)^2. \quad (4)$$

Здесь первое слагаемое есть мера отклонения коэффициента пропускания системы слоев, описываемой вектором d от $\overline{T(\lambda)}$, второе слагаемое учитывает общую толщину системы N слоев; α — некоторый параметр.

Задачу синтеза оптической системы с коэффициентом пропускания, близким к требуемому, будем ставить как задачу минимизации этого функционала.

Пусть $T_1(\lambda)$ — коэффициент пропускания системы, соответствующей вектору d_1 , минимизирующему функционал (4).

Параметр α выбирается из условия

$$\delta_1 = \delta,$$

где δ_1 — точность приближения $\overline{T(\lambda)}$ функцией $T_1(\lambda)$, определяемая формулой (2).

Можно показать, что если $\delta > \delta_0$, то при всех $N \geq N_\delta N_0$ натуральное число, зависящее от требуемой точности δ (т. е. если число слоев системы достаточно для достижения заданной точности), такое α существует.

При этом оказывается, что полученная система N слоев обладает минимальной $\sum_{i=1}^N d_i$ (т. е. общей толщиной) из всех систем N слоев, удовлетворяющих требованию:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} v(\lambda) [Ad - \overline{T(\lambda)}]^2 d\lambda \leq \delta_1.$$

Функционал (4) не является выпуклым, поэтому для его минимизации применялся следующий метод: случайным образом задавалось начальное приближение, затем по методу градиентного спуска при наличии ограничений [11] (все толщины слоев должны быть положительны, т. е. $d_i \geq 0$) осуществлялся поиск минимума функционала. Затем снова задавалось случайное начальное приближение и производился градиентный спуск и т. д. Из полученной серии минимумов отбирался самый глубокий, который и считался минимумом функционала (4). При минимизации использовалось точное аналитическое выражение, полученное для градиента функционала. Необходимо подчеркнуть, что начальное приближение может задаваться не только случайным образом, но также и из некоторых априорных посылок.

Расчеты производились по программе, составленной на языке ФОРТРАН для машины БЭСМ-6.

Примеры синтеза некоторых многослойных систем

Возможности описанного выше метода иллюстрируются нами на примере синтезирования трех видов покрытий, имеющих применение на практике:

Рис. 1 иллюстрирует расчет 13-слойного отражателя в области 5000—6000 Å с высоким коэффициентом пропускания с двух сторон от области отражения: 4400—5000 Å; 6000—7500 Å. Показатели преломления слоев системы $n_1=2,30$; $n_2=1,34$. Показатель преломления подложки $n_0=1,52$.

По описанной выше методике для серии случайных начальных приближений находились минимумы функционала (4) с помощью градиентного спуска. Для начального приближения рассчитывался градиент функционала, затем вдоль этого направления градиента находился минимум. Далее вновь определялся градиент и искался минимум вдоль нового направления. Счет при данном начальном приближении прекра-

щался, когда относительное уменьшение функционала вдоль одного направления градиента становилось меньше 0,001.

Затем из полученных для каждого начального приближения минимумов отбирался самый глубокий. Вектор d , реализующий этот минимум, описывает толщины слоев синтезированной системы. Счет продолжался 30 минут на машине БЭСМ-6.

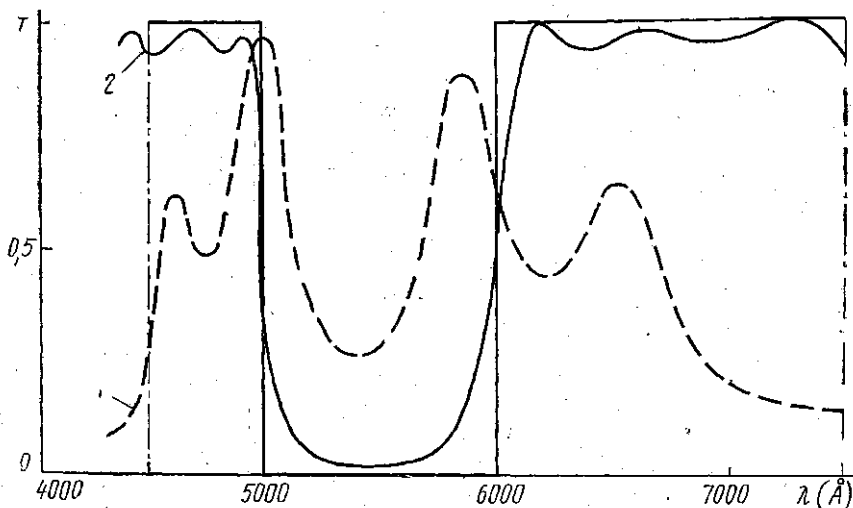


Рис. 1. Спектральная кривая пропускания для 13-слойного отражателя с высоким пропусканием с двух сторон от области отражения: 1 — начальное приближение, 2 — синтезированная система

Весовая функция $v(\lambda)$ в функционале (4) была взята равной 1 во всех точках сетки λ кроме точки 5000 Å и 6000 Å, где она равнялась 0,1. Сетка λ — неравномерная с шагом 50 Å в области 4400—6500 Å и шагом 100 Å в остальной области.

При значении параметра $\alpha=10^{-4}$ точность полученного приближения, определяемая формулой (2), равна: $\delta=1,347 \cdot 10^{-2}$.

Значения толщин слоев d^I синтезированной системы приведены в таблице. Коэффициент пропускания для данной системы слоев изображен на рис. 1 сплошной линией.

Пунктирная линия на рис. 1 — коэффициент пропускания для случайной начальной системы, при которой был получен самый глубокий минимум функционала (т. е. синтезирована система слоев). Значения толщин слоев этой начальной системы $d_{нач}^I$ приведены в таблице.

Погрешность приближения (2) для этой начальной системы $\delta=1,068$. Таким образом, для синтезированной системы погрешность уменьшилась в 80 раз.

Система, отсекающая коротковолновое излучение ($\lambda < 5400$ Å) и пропускающая спектральный интервал 5500—6500 Å. При синтезе данной системы использовалось специально подобранное начальное приближение — 17-слойное покрытие с одинаковыми толщинами слоев $n_1=2,5$ и $n_2=1,38$. Подложка — стекло ($n_0=1,52$). Такая система имеет коэффициент пропускания, близкий к требуемому (пунктирная линия на рис. 2). Точность этого приближения $\delta=3,816 \cdot 10^{-3}$ (в данном случае $v(\lambda) \equiv 1$).

Толщины слоев синтезированных систем

Номер слоя	$d_{\text{нач}}^I$ (Å)	d^I (Å)	d^{II} (Å)	d^{III} (Å)
1	1760	1990	1255	425
2	722	146	1235	762
3	1181	947	1307	504
4	923	814	1284	947
5	1450	1990	1293	630
6	477	585	1258	904
7	595	377	1318	445
8	1878	1850	1282	876
9	503	461	1304	519
10	102	509	1261	1158
11	1857	1830	1307	821
12	1419	1530	1278	1163
13	1093	1490	1299	687
14	—	—	1246	1389
15	—	—	1248	718
16	—	—	1275	1342
17	—	—	1218	806
18	—	—	—	1377
19	—	—	—	830

С таким начальным приближением на ЭВМ производился градиентный спуск и находились параметры системы (толщины слоев), соответствующие минимуму функционала. При значении $\alpha=10^{-5}$ точность

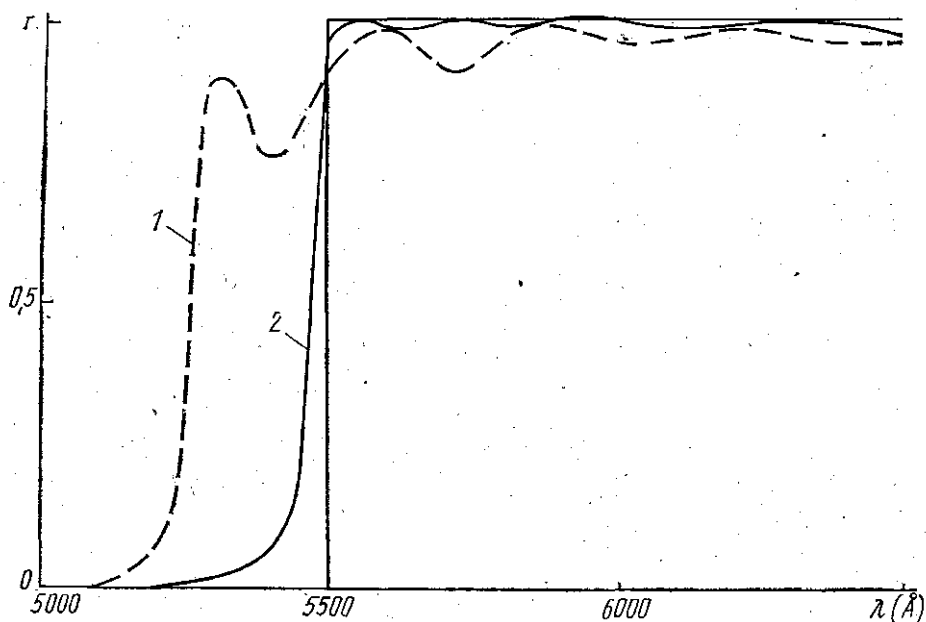


Рис. 2. Спектральная кривая пропускания для 17-слойной отрезающей системы: 1 — начальное приближение, 2 — полученная характеристика

полученного приближения $\delta=6,736 \cdot 10^{-4}$. Полученные значения толщин слоев d^{II} приведены в таблице. Коэффициент пропускания — сплошная линия на рис. 2.

Расчет 19-слойного отражателя (показатели преломления слоев $n_1=2,4$, $n_2=1,38$, подложки $n_0=1,52$) также производился при специально подобранном начальном приближении. Начальная система слоев была составлена из трех четвертьволновых отражателей, соответствующих длинам волн 4600 Å, 6000 Å и 7800 Å с числом слоев 6, 7 и 6 соответственно. Коэффициент пропускания для этой системы — пунктирная линия на рис. 3. Точность начального приближения $\delta=3,324 \cdot 10^{-2}$.

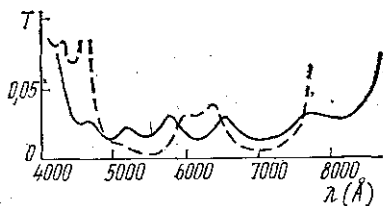


Рис. 3. Спектральная кривая пропускания 19-слойного отражателя

Полученная система (толщины слоев d^{III} приведены в таблице) имеет коэффициент отражения, равный $97,6\% \pm 1,1\%$ в области от 4400 Å до 8400 Å. Коэффициент пропускания для нее — сплошная линия на рис. 3. Точность полученного приближения $\delta=2,297 \cdot 10^{-3}$.

Последняя система была выбрана аналогичной системам, имеющимся в литературе [5, 12, 13], для оценки возможностей метода.

Так, в работе [12] 19-слойный широкополосный отражатель имел коэффициент пропускания, равный $0,05 \pm 0,02$, соответственно R было $95\% \pm 2\%$ в области спектра от 4000 Å до 7800 Å.

Приведенные примеры показывают, что применяемый метод позволяет получать характеристики, достаточно близкие к требуемым. При этом используемое точное выражение для градиента функционала сокращает время счета, необходимое для синтеза системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Epstein L. J. «J. Opt. Soc. Am.», 1952, 42, 806.
2. Thelen A. «J. Opt. Soc. Am.», 1966, 56, 1533.
3. Эльснер З. Н. «Оптика и спектроскопия», 1968, 24, 437.
4. Королев Ф. А., Клементьева А. Ю., Мещерякова Т. Ф. «Оптика и спектроскопия», 1971, 30, 966.
5. Королев Ф. А., Клементьева А. Ю. и др. «Оптика и спектроскопия», 1970, 27, 775.
6. Ермолаев А. М., Минков И. М., Власов А. Г. «Оптика и спектроскопия», 1971, 30, 966.
7. Dobrowolsky J. A. «J. Appl. Opt.», 1965, 4, 937.
8. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1970.
9. Тихонов А. Н., Дмитриев В. И. Вычислительные методы и программирование, т. 13. Изд-во МГУ, 1969.
10. Тихонов А. Н. ДАН СССР, 1963, 151, № 3, 49.
11. Будаков Б. М., Васильев Ф. П. Приближенные методы решения задач оптимального управления, вып. 2. Тексты лекций. М., 1969.
12. Жиглинский А. Г., Путилин Э. С., Эльснер З. Н. «Оптика и спектроскопия», 1971, 31, 419.
13. Vaumeyer P. W., Stone J. M. «J. Opt. Soc. Amer.», 1965, 46, 228.

Поступила в редакцию
12.10 1972 г.
после переработки
11.3 1975 г.

Кафедра
оптики

1/8 мм