

Проведено численное исследование эмпирического алгоритма для оптимизации оптического покрытия, использующего рекурсивное построение слоев. Показано, что в ряде случаев алгоритм повышает эффективность процедуры оптимизации, позволяя уменьшить размерность решаемых на каждом этапе задач оптимизации.

© В.А. Жидков, 2013

УДК 519.8

В.А. ЖИДКОВ

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКУРСИВНОГО ПОСТРОЕНИЯ СЛОЕВ

Введение. История развития интерференционных оптических покрытий насчитывает несколько десятилетий. Однако актуальность их разработки к настоящему времени не уменьшилась, а продолжает возрастать. Интегральная микроэлектроника в ряде областей заменяется интегральными устройствами по обработке оптического сигнала, вытесняя тем самым чисто электронные средства. Распространенные применения включают сложную обработку сигналов от датчиков [1], практически недостижимую другими методами при сопоставимых габаритах. Интерференционные покрытия применяются в зеркальных покрытиях, для увеличения пропускания и контрастности покрытий, для спектрального и энергетического разделения и сложения оптических сигналов и их хроматической коррекции. Все это диктует спрос на разнообразные расчетные задачи, целью которых является оптимизация конфигурации покрытий с заданными оптическими свойствами.

Задачи анализа и оптимизации. На первом этапе обычно определяют, какие именно оптические характеристики будет иметь та или иная пленка при заданных свойствах материалов. Такого рода задача называется «задача анализа». Для решения таких задач обычно применяется построение физической модели пленки в рамках классической электродинамики, с использованием тех или иных допущений для упрощения модели и/или уменьшения числа варьируемых параметров [2, 3].

Теория расчета спектральных характеристик многослойных покрытий базируется на электромагнитной теории Максвелла [2–4]. Представленная теория хотя и не вполне свободна от неопределенностей, но в достаточной для практических целей степени обеспечивает учет интерференционных и поляризационных эффектов в многослойных покрытиях всех типов, поэтому является довольно распространенной.

Определение отражения, пропускания и поглощения многослойного пленочного покрытия с точки зрения электромагнитной теории сводится к решению задачи с рядом граничных условий. Она заключается в определении стационарных амплитуд векторов напряженности электрического и магнитного полей на границах многослойного покрытия при падении световой волны с определенными характеристиками. Все энергетические соотношения и фазовые изменения, в итоге, выражаются через векторы поля волны. Здесь следует заметить, что оптические свойства материалов в тонких пленках зачастую существенно отличаются от таковых в объеме, из-за разного рода эффектов возникающих на границе раздела сред.

Электромагнитное излучение, распространяющееся в среде, характеризуется амплитудой колебаний электрического \mathbf{E} или магнитного \mathbf{H} вектора напряженности поля излучения, частотой излучения, состоянием поляризации и направлением распространения, определяемым волновым вектором \mathbf{k} .

Относительно падающего на покрытие излучения часто делается допущение, что оно может быть адекватно описано плоской линейно-поляризованной монохроматической волной с фронтом бесконечной ширины. Уравнение плоской монохроматической волны в изотропной среде имеет вид:

$$E = E_0 \exp \left\{ i \omega \left[t - N \frac{\mathbf{kr}}{c} \right] \right\}, \quad (1)$$

где t – время, r – радиус-вектор, ω – круговая частота, c – скорость света в вакууме, i – мнимая единица, \mathbf{k} – волновой вектор (не коэффициент экстинкции). Величина $N = n + ik$ является комплексным показателем преломления. Его вещественная часть n – равна отношению групповых скоростей распространения света в вакууме и данной среде, а мнимая часть k – показатель экстинкции (поглощения).

Интенсивность светового потока I , распространяющегося в среде, пропорциональна $|\mathbf{E}_0|^2$ и, согласно закону поглощения, после прохождения слоя вещества толщиной l будет равна $I = I_0 \exp\{-\alpha l\}$, где $\alpha = 4\pi k/\lambda_0$ – натуральный показатель поглощения среды, λ_0 – длина волны излучения в вакууме. Величина $A = (I_0 - I)/I_0$ является коэффициентом поглощения.

Учитывая, что свойства слоев аддитивны и линейно зависимы, или же наблюдаемая нелинейность относительно слабая, для расчета свойств покрытий большое распространение имеют методы линейной математики, в частности матричной алгебры. Суть их состоит в том, что каждому слою в соответствие

ставятся интерференционные матрицы, элементы которых зависят от толщины и оптических свойств данного слоя покрытия, которые, будучи умноженными на вектор (алгебраический) входящего светового потока, дают выходной световой поток. Таким образом, умножив вектор приходящего светового потока на произведение матриц слоев, можно получить результирующий вектор, соответствующий падающему и отраженному световому потоку, и получить коэффициент пропускания и отражения [3].

Задача оптимизации или задача нахождения оптимального покрытия относится к сложному классу задач «нахождения минимума многомерной многоэкстремальной функции». Несмотря на достаточно длительную историю развития методов оптимизации [5], распространенные методы решения такой задачи демонстрируют ограниченную эффективность, и для оптимизации решения часто применяются различные вариации генетических (эволюционных) алгоритмов [5 – 7]. Как показывает многочисленная практика, алгоритмы такого класса способны с высокой вероятностью к нахождению оптимальных решений, но сама природа подобных алгоритмов делает их малоприспособленными для получения надежных и хорошо повторяемых результатов, учитывая большое количество случайно выбирающихся в процессе решения параметров. По данной причине, актуальным является построение алгоритма, который бы надежно находил близкие к оптимальным решения.

Расчет покрытия с использованием рекурсивного метода построения слоев. Предлагаемый эмпирический метод расчета состоит в следующем: берется некоторая комбинация слоев, с числом слоев n , с толщиной каждого слоя d_i . Затем, каким-либо методом выполняется поиск для d_i . Далее, эта комбинация слоев с толщинами d_i повторяется m раз с коэффициентом масштабирования каждой группы слоев s_j , так что толщины каждого слоя равны $d_i s_j$ при фиксированных $\bar{\alpha}_i$, где i изменяется от 1 до n и повторяется m раз. Таким образом, толщины слоев таковы: $s_1 d_1, s_1 d_2, \dots, s_1 d_n, s_2 d_1, s_2 d_2, \dots, s_2 d_n, \dots, s_m d_1, s_m d_2, \dots, s_m d_n$. Далее, выполняется поиск оптимального решения для s_j , так, чтобы результирующий спектр пропускания наиболее полно соответствовал заданному.

В основе эмпирического метода лежит простое физическое соображение: пропускная характеристика системы идентичных фильтров близка к таковой для одиночного фильтра. При этом, оптимизацию по меньшему числу параметров проводить менее затратно. Количество слоев можно сделать небольшим, так чтобы оптимальные решения можно было найти за относительно небольшое время, по сравнению со временем для $m \times n$ независимых слоев.

После того как оптимизация по масштабным коэффициентам s_j выполнена, можно провести процесс оптимизации толщин отдельных слоев и найти весьма близкое к оптимальному решение.

Рассмотрим следующий пример. Пусть оптическое покрытие состоит из 4-х чередующихся слоев SiO_2 ($n_H = 1,46$), ZrO_2 ($n_B = 2,05$) [3] и при этом ставится условие получения примерно прямоугольной характеристики пропускания в диапазоне от 450 до 700 нм, количество точек аппроксимации спектра 50. Функция ошибки считалась по методу квадрата отклонения заданного спектра от расчетного. Ограничение на толщины слоев было выбрано произвольно и составляло 5 – 200 нм.

На рисунке показан процесс оптимизации для 4-х слоев. Черная сплошная линия – целевая кривая, штриховая линия – аппроксимация по 4-м слоям, точечная линия – аппроксимация по рекурсивно построенным слоям 4*4, толстая линия – финальная аппроксимация по 16-и слоям.

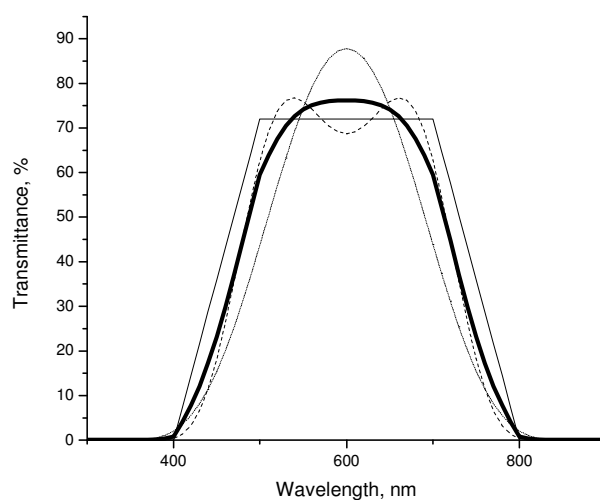


РИСУНОК. Пример спектра пропускания оптического покрытия

На последующих шагах алгоритма, последующее применение этих слоев по 4 раза с оптимизацией масштабных коэффициентов дает решение лучше, чем 4-е слоя. На последнем этапе, толщины слоев построенного подобным образом покрытия используются как входные данные для нахождения минимума методом градиентного спуска. Этот минимум и используется как «выход» алгоритма.

Для сравнения: для поиска минимума в данной конкретной реализации использовался алгоритм полного перебора по допустимым значениям параметров, с шагом равным типовой точности нанесения пленок (0.2нм). Таким образом, практически гарантируется глобальность минимума, а относительно небольшое число параметров делает этот метод практически применимым.

Заключение. Представлен эмпирический алгоритм для оптимизации многослойных интерференционных фильтров, позволяющий повысить эффективность оптимизационных алгоритмов путем уменьшения количества варьируемых параметров на каждом этапе оптимизации. Эффективность продемонстрирована на примере.

В.О. Жидков

РОЗРАХУНОК ОПТИЧНОГО ПОКРИТТЯ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРСИВНОЇ ПОБУДОВИ ШАРІВ

Розглядається емпіричний алгоритм для оптимізації оптичного покриття, що використовує рекурсивну модель шарів. Наведений приклад показує, що в ряді випадків алгоритм може підвищити ефективність процедури оптимізації, дозволяючи зменшити число оптимізованих параметрів на кожному кроці.

V.A. Zhydkov

CALCULATION OF MULTILAYER OPTICAL COATING USING RECURSIVE LAYER STRUCTURE

This article presents an empirical algorithm for optical coating optimization procedure, using recursive layer structure. There are results, demonstrating that in a number of cases, it can significantly improve optimization procedure efficiency by decreasing number of parameters to be optimized on every step of the procedure suggested.

1. *Alastair D. McAulay.* Optical implementation of a novel accurate-location radar and sonar signal processor // *Optical Engineering.* – 1991. – 30(10). – P. 1511–1515.
2. *Калитеевский Н.И.* Волновая оптика. – С.-Пб. «Лань», 2006. – 466 с.
3. *Яковлев П.П., Мешков Б.Б.* Проектирование интерференционных покрытий. – М.: «Машиностроение», 1987. – 192 с.
4. *Крылова Т.Н.* Интерференционные покрытия. – Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
5. *Hodgson R.J.W.* Memetic Algorithm Approach to Thin-Film Optical Coating Design. – Department of Physics University of Ottawa reports. – 2005. – Ontario, Canada.
6. *Suyong Wu, Xingwu Long, Kaiyong Yang.* Novel Robust Design Method of Multilayer Optical Coatings // *ISRN Optics.* – 2012.
7. *Jinn-Moon Yang, Cheng-Yen Kao.* A Robust Evolutionary Algorithm for Optical Thin-Film Designs // *ISRN Optics.* – 2000.

Получено 01.04.2013