

О.Ф. Просовский, А.Б. Гвоздев, А.Н. Исамов, Г.Ю. Просовская
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ
ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье рассматриваются особенности формирования слоистых сред - тонких пленок для получения интерференционных структур на современном этапе развития техники и технологии. Стабильность получаемых результатов позволяет при большом количестве экспериментальных данных выстраивать математические модели, которые позволяют на результатах анализа отдельных пленок веществ проводить синтез оптических конструкций с большим числом слоев. В работе приводятся примеры использования модуля математических вычислительных программ OptiLayer для синтеза и ре-анализа получаемых оптических покрытий. Показан процесс ре-анализа полученных одиночных пленок напыляемых веществ, моделирование оптических конструкций с числом слоев 30 и более, их практическая реализация.

Ключевые слова: многослойные тонкопленочные покрытия, интерференционные светофильтры, компьютерное моделирование оптических конструкций, OptiLayer, электронно-лучевые технологии испарения веществ в вакууме.
Форм. 2. Рис. 6. Лит. 1.

О.Ф. Просовський, А.Б. Гвоздєв, О.М. Ісамов, Г.Ю. Просовська
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СКЛАДНИХ
ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті розглядаються особливості формування пластових середовищ - тонких плівок для отримання інтерференційних структур на сучасному етапі розвитку техніки і технології. Стабільність одержуваних результатів дозволяє при великій кількості експериментальних даних вибудовувати математичні моделі, які дозволяють на результатах аналізу окремих плівок речовин проводити синтез оптичних конструкцій з великим числом шарів. У роботі наводяться приклади використання модуля математичних обчислювальних програм OptiLayer для синтезу та ре-аналізу одержуваних оптичних покриттів. Показаний процес ре-аналізу отриманих одиночних плівок напылюваних речовин, моделювання оптичних конструкцій з числом шарів 30 і більше, їх практична реалізація.

Ключові слова: багатошарові тонкоплівкові покриття, інтерференційні світлофільтри, комп'ютерне моделювання оптичних конструкцій, OptiLayer, електронно-променеві технології випаровування речовин у вакуумі.

O. Prosovsky, A. Gvozdev, A. Isamov, G. Prosovskaya
COMPUTER MODELLING AND PRACTICAL REALIZATION OF DIFFICUL
INTERFERENCE SYSTEMS

The peculiarities of formation of layered media, thin films for interference structures at the present stage of development of engineering and technology are studied in this article. The stability of the results with a large number of experimental data makes it possible to build mathematical models, the results of which, based on the analysis of individual films, allow for the synthesis of optical structures with a large number of layers. The paper presents examples of the usage of the OptiLayer mathematical computing software unit for the synthesis and re-analysis of the resulting optical coatings. The process of re-analysis of the obtained individual films of sprayed substances, the simulation of optical structures with 30 layers or more and their practical implementation are shown.

Keywords: multi-layer thin-film coatings, interference filters, computer simulation of optical structures, OptiLayer, electron-beam evaporation technology substances in a vacuum.

Особенности формирования слоистых сред – тонких пленок для получения интерференционных структур, на современном этапе развития техники и технологии характеризуются высокой степенью повторяемости физических параметров и технологических условий, в которых происходит нанесение покрытий. Данный факт имеет логическое продолжение в виде получения стабильных результатов оптических констант получаемых тонких пленок веществ. Стабильность получаемых результатов при большом количестве экспериментальных данных дает возможность выстраивать математические модели, которые позволяют на результатах анализа отдельных пленок веществ проводить синтез оптических конструкций с большим числом слоев. Аппаратная часть технологии формирования тонких пленок благодаря современным достижениям науки и техники в настоящее время позволяет получать технологическое оборудование, обеспечивающее высокую повторяемость условий формирования покрытий. При создании своего технологического оборудования мы уделяли большое внимание для получения высокостабильных условий проведения процессов напыления так и проработали вопрос оптимального выбора самих испарителей веществ. Так, применяя криогенную технику для создания вакуума в камере установки, за короткое время (30-40 минут) достигается степень вакуума $9 \cdot 10^{-6}$ mBar. Учитывая тот факт, что вакуум при котором происходит нанесение тонких пленок реактивным электронно-лучевым испарением обычно составляет $1.5-1.8 \cdot 10^{-4}$ mBar, складывается оптимальная ситуация для создания повторяемых от процесса к процессу условий

нанесения покрытий. Если более подробно остановиться на физических процессах формирования парциального давления в вакуумной камере во время напыления – можно констатировать следующий механизм. Давление остаточных газов в вакуумной камере можно представить как сумму слагаемых:

$$P_{\text{ост}} = P_{\text{дегаз}} + P_{\text{реакт}} \quad (1)$$

где:

$P_{\text{дегаз}}$ – количество газов, выделяющихся со стенок камеры и в большей степени с разогреваемого электронным лучом материала в тигле,

$P_{\text{реакт}}$ – количество подаваемого реактивного газа – в основном для рассматриваемых в данной статье примеров – кислорода.

Обще принятая техническая реализация подачи реактивного газа подразумевает использования вибрационных натекаателей с использованием в качестве сигнала обратной связи показаний вакуумметра, индицирующего значения $P_{\text{ост}}$. Но в случае применения выше указанной схемы подачи реактивного газа с применением вибрационных натекаателей говорить о стабильности технологических параметров в самом процессе напыления, длительность которого обычно составляет 3- 4 часа, не приходится. Так, на пример, до подачи реактивного газа давление в камере на 1-вом слое составляет $9 \cdot 10^{-6}$ mBar. В случае 30-го слоя, когда существенно уменьшается дегазация со стенок камеры в результате длительной откачки (более 3-х часов), давление в камере до подачи реактивного газа будет составлять величину $4-5 \cdot 10^{-6}$ mBar. Исходя из этого – используя сигнал обратной связи вакуумметра индицирующего давление остаточных газов в вакуумной камере установки, будем иметь различные условия роста пленок покрытия в начале процесса и в конце. Прежде всего эти условия роста пленок будут отличаться количеством кислорода на первых слоях и на заключительных.

Так как ставилась задача получать воспроизводимые результаты от процесса к процессу в условиях циклического повышения загрязнения стенок камеры (смотри изменение количества газов при дегазации стенок камеры) была реализована схема подачи реактивного газа с применением Flou-контроллеров, позволяющих подавать заданное массовое количество реактивного газа (XX ml/min). Применение Flou-контроллеров позволяет подавать одинаковое количество кислорода на начальных и заключительных слоях конструкции многослойного покрытия. Но при этом составляющая количества газов выделяющихся со стенок камеры в начале процесса и в конце будет разной. Данная нестабильность параметров формирования слоев покрытия еще больше проявляется от процесса к процессу по мере загрязнения камеры. Решением данной проблемы является применение еще одного Flou-контроллера, работающего в режиме натекаателя, поддерживающего общее парциальное давление в камере на заданном уровне посредством подачи в камеру инертного газа аргона. Данное техническое решение – формирует практически идеальные по стабильности условия формирования слоев как в конкретном процессе нанесения многослойного покрытия, так и от процесса к процессу.

Создав оборудование, обеспечивающее стабильные условия роста слоев покрытий, открывается перспектива в полной мере реализовать результаты математического моделирования и математический ре-анализ получаемых покрытий для производства сложных интерференционных структур.

Для математического моделирования использован один из лучших в мире продуктов в этой сфере – вычислительный программный модуль OptiLayer, разработанный коллективом НИВЦ МГУ (г.Москва) под руководством профессора А.В. Тихонравова. Вычислительный программный модуль состоит из трех блоков:

OptiLayer – синтез оптических конструкций;

OptiChar – определение оптических констант одиночных пленок и подложки (дисперсия показателя преломления, коэффициент поглощения, геометрическая и оптическая толщина);

OptiRe – ре-анализ многослойных интерференционных структур с определением ошибок толщин слоев, уточнением оптических констант тонких пленок используемых пленкообразующих веществ.

Работа по созданию многослойного интерференционного светофильтра начинается с математического синтеза оптической конструкции [1]. Для чего формируется целевая функция покрытия, параметры которого должны удовлетворять техническому заданию, выбираются материалы из которых будет изготовлено многослойное покрытие – как правило состоящее из

чередующихся слоев пленок веществ с различными значениями показателей преломления. Синтез конструкции многослойного покрытия проводится в среде вычислительной программы OptiLayer. Для проведения расчета оптической конструкции обязательным условием является ввод данных оптических констант выбранных пленкообразующих веществ. По этому, математическому синтезу оптической конструкции, предшествует определение оптических констант применяемых пленкообразующих веществ с применением расчетной программы OptiChar. Для этого производят напыление одиночных пленок выбранных веществ и измерив спектральные зависимости пропускания и отражения полученных образцов с помощью программы OptiChar рассчитывают геометрическую толщину полученной пленки, что в свою очередь позволяет откалибровать показания кварцевого датчика системы контроля толщины наносимого покрытия, и определяют спектральную зависимость показателя преломления и спектральную зависимость коэффициента поглощения выбранных для построения оптической конструкции веществ. Получив необходимые данные можно провести синтез конструкции оптического многослойного покрытия. Следующим шагом в цепи необходимых действий для получения многослойного светофильтра является практическая реализация – напыление рассчитанной конструкции и измерение спектральных зависимостей пропускания-отражения полученных образцов интерференционных светофильтров.

Как показывает практика, с первого захода напылить светофильтр, который бы в удовлетворительной степени соответствовал целевой функции – не удастся. Причиной этому является различие условий формирования одиночного слоя пленки выбранного материала, который подвергается анализу для определения оптических констант и условий формирования следующих слоев. Суть этого утверждения состоит в том, что одиночный слой растет непосредственно на поверхности подложки с конкретными физическими свойствами – и это оказывает существенное влияние на микроструктуру растущей тонкой пленки и как следствие – на ее оптические константы. В то же время, следующий слой того же материала формируется не на поверхности подложки, а на ранее нанесенных слоях – и микроструктура следующих слоев заметно отличается от микроструктуры первого слоя. Для уточнения оптических констант веществ, применяемых в конструкции светофильтра, используется возможность провести компьютерный ре-анализ многослойного покрытия с помощью вычислительного модуля OptiRe. Для этого наносится 12-ти слойное равнотолщинное покрытие. Под выражением «равнотолщинное покрытие» подразумевается то, что оптическая толщина D чередующихся слоев конструкции приблизительно равна одной и той же величине.

$$D = h \cdot n \quad (2)$$

где:

D - оптическая толщина;

h - геометрическая толщина пленки;

n - показатель преломления.

Проведя процесс нанесения выше упомянутого равнотолщинного покрытия, измеряют спектральные зависимости пропускания и отражения полученных образцов светофильтра и проводят математический ре-анализ оптической конструкции. При этом определяются ошибки толщин слоев и уточняются оптические константы применяемых пленкообразующих веществ. Получив более точные значения оптических констант применяемых веществ, с помощью OptiLayer синтезируется оптическая конструкция светофильтра, удовлетворяющая заданной целевой функции, практическая реализация которой – ее напыление – приводит к получению светофильтра, удовлетворяющего заданным требованиям.

При серийном производстве многослойных (25-40 слоев) интерференционных покрытий с использованием выше упомянутой методики и оборудования с кварцевым контролем толщины наносимых пленок, технологи столкнутся с необходимостью через 3-4 технологических процесса проводить ре-анализ получаемых светофильтров с целью устранения появляющихся ошибок в толщинах слоев оптической конструкции. Данная процедура может быть сильно усложнена несовершенством технологических источников – электронно-лучевых пушек. На *Рисунке 1* показан график спектральной зависимости рассчитанного светофильтра (черный цвет кривой) и реально изготовленного светофильтра (красный цвет кривой). Проведя математический ре-анализ, видно, что присутствует систематическая ошибка в толщинах слоев конструкции, при этом для вещества с низким показателем преломления мы имеем одинаковый коэффициент погрешности для каждого слоя – (см. *Рис. 2*). Гораздо хуже складывается ситуация для слоев с высоким

показателем преломления- коэффициент погрешности для каждого слоя имеет свою величину и это создает большие сложности при проведении ре-анализа и установлении истинных погрешностей.

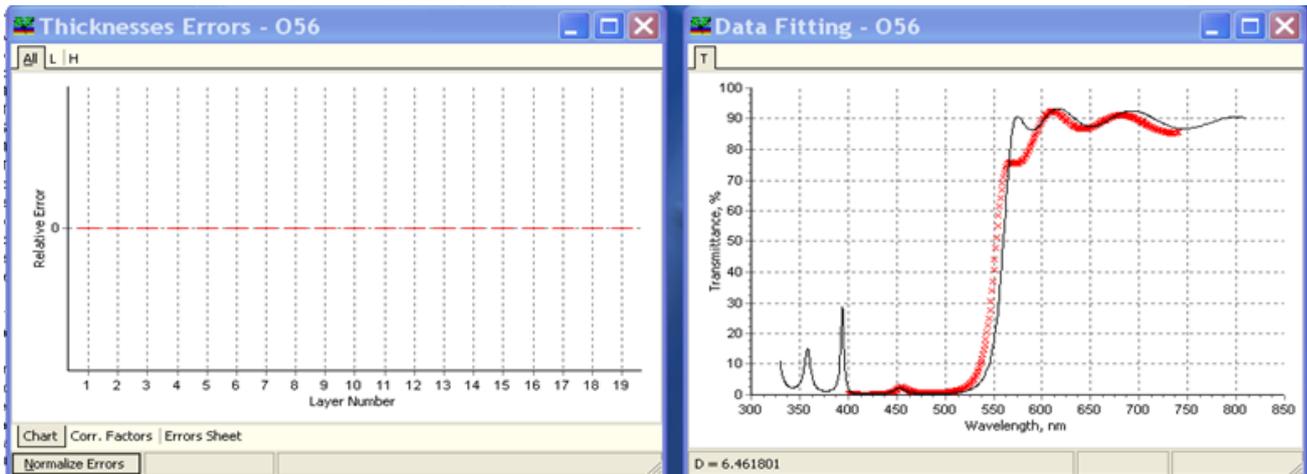


Рис. 1. Математическая модель и спектральная зависимость пропускания светофильтра

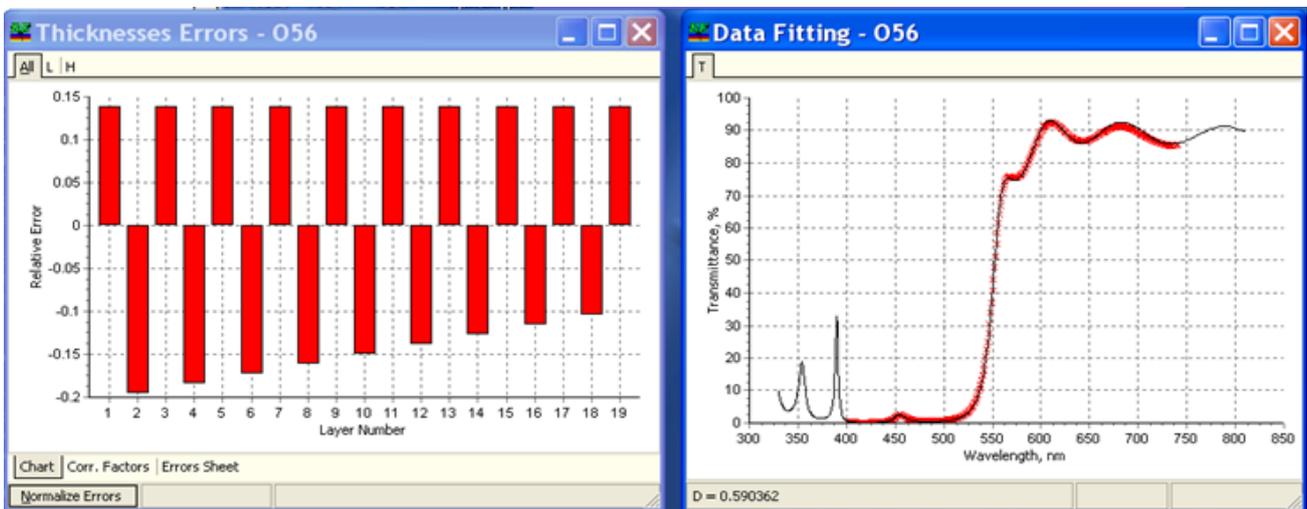


Рис. 2. Результаты ре-анализа изготовленного светофильтра – небаланс веществ, линейная зависимость величины погрешности материала с высоким показателем преломления

Выше упомянутая ситуация возникает из-за не совершенства электронно-лучевого испарителя, точнее- примененного тигля для испарения вещества с высоким показателем преломления. Для испарения вещества с низким показателем преломления использован вращающийся тигель большого диаметра и соответственно большой площади (см. *Рисунок 3*).

Это дает важное преимущество- даже при изготовлении 40-слойного покрытия не происходит существенного изменения геометрии поверхности вещества в тигле с низким показателем преломления – как следствие не меняется форма кратера испаряемого вещества и телесный угол потока паров испаряемого вещества стабилен.

В случае применения штатного тигля (см. *Рисунок 4*) для испарения тугоплавких окислов – имеем четырех-позиционный тигель с не вращающимися нишами для загрузки испаряемого вещества. В итоге при нанесении слоев в процессе испарения вещества существенно меняется форма поверхности тигля, с которой происходит испарение, что приводит к изменению телесного угла потока паров испаряемого вещества и возникновению погрешностей измерения толщины наносимых пленок.



Рис. 3. Оптимальная конструкция тигля для нанесения легко испаряемого материала



Рис. 4. Не оптимальная конструкция тигля для испарения тугоплавкого окисла

Выходом из данной негативной ситуации стала доработка тигля электронно-лучевой пушки. На Рисунках 5 и 6 показана доработанная электронно-лучевая пушка и результат ре-анализа полученного с помощью усовершенствованного оборудования



Рис. 5. Оптимальная конструкция тигля для испарения тугоплавкого окисла

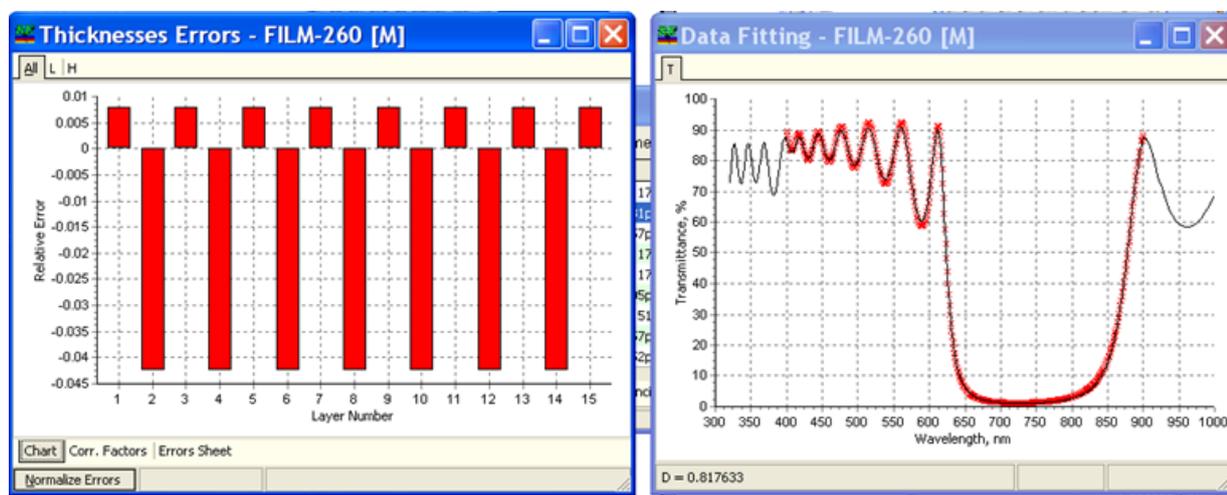


Рис. 6. Результаты ре-анализа изготовленного светофильтра с использованием усовершенствованных испарителей

Как показано на *Рисунке 6*, результатом усовершенствования технологических напылительных устройств стало получение систематических ошибок в толщинах оптической конструкции с одним и тем же коэффициентом погрешности для применяемых материалов. Данная ситуация снижает ошибки при проведении ре-анализа полученного покрытия, делает ре-анализ более точным, более прогнозируемым и достоверным. Позволяет минимизировать затраты на прикладные процессы и изготавливать многослойные интерференционные светофильтры с использованием косвенных методов контроля толщины наносимых тонких пленок.

Выводы. Анализируя выше изложенное, можно сделать следующий вывод- изготовление сложных интерференционных структур без надлежащего аппарата математического моделирования в большинстве случаев является не выполнимой задачей. Симбиоз высококлассного, правильно спроектированного напылительного оборудования и математического комплекса вычислительных программ позволяет решать сложные задачи получения многослойных интерференционных светофильтров с минимумом прикладных процессов, снижать коэффициент запуска при серийном производстве продукции.

1. P.G.Verly, A.V.Tikhonravov, and M.K.Trubekov, Efficient refinement of inhomogeneous optical coatings: synthesis by simultaneous thickness and refractive index optimization." – SPIE Proceedings, Vol. 3133, – 1997.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2013.

© О.Ф. Просовский, А.Б. Гвоздев, А.Н. Исамов, Г.Ю. Просовская