

Численное моделирование и анализ качества интерференционных покрытий прецизионных лазерных зеркал

Д.О. Перфилов¹, В.В. Азарова^{1,2},

¹НИИ «Полюс» им. М.Ф.Стедьмаха

²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Аннотация. Проведен анализ спектральной зависимости коэффициента пропускания многослойных интерференционных диэлектрических отражающих покрытий зеркал для лазерных кольцевых резонаторов, полученных методом ионно-лучевого распыления [1] и смоделированной при помощи программного комплекса «Optilayer» [2], спектральной зависимости коэффициента пропускания того же многослойного покрытия. Проведено поэтапное моделирование лазерных зеркал и показано, что математическая модель может быть использована для анализа напыляемых покрытий и оптимизации процесса напыления.

Введение. Получение многослойных отражающих покрытий требует высокой точности процесса напыления, но не смотря на соблюдение всех необходимых норм и обеспечение должного уровня качества могут иметь место различные отклонения, не связанные с качеством самого процесса напыления. В работе проведено поэтапное численное моделирование спектральной зависимости коэффициента пропускания многослойных отражающих покрытий с учетом характеристик материалов, использующихся при их производстве. При помощи прецизионного спектрофотометра проведен ряд измерений спектральных характеристик подложек с напыленным многослойным покрытием. Сопоставлены результаты численного моделирования с измеренными спектрами. Рассматриваются решения задач по выявлению чувствительности отдельных участков спектра.

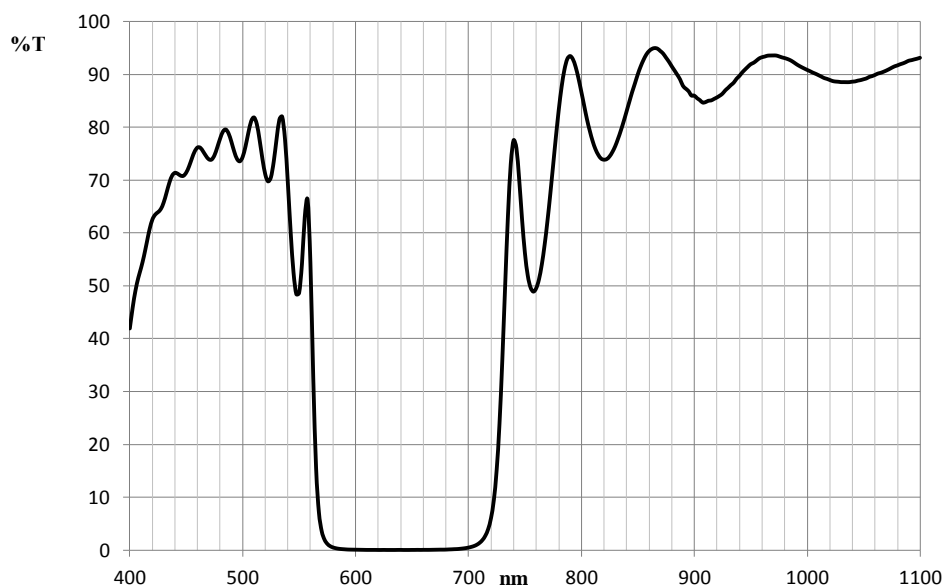


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента пропускания многослойника $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ измеренная спектрофотометром.

Численное моделирование. Математическая модель расчета многослойных диэлектрических зеркал в работе основана на методе характеристических матриц Абелеса [3-5]. В основе описания пленочных систем этим методом лежит понятие матрицы слоя. Многослойник зеркального покрытия конструируется по формуле: $A(HL)^N HG$, где H и L – четвертьволновые слои с высоким и низким показателями преломления, а A и G – среда и подложка, соответственно. При моделировании коэффициентов отражения для ТЕ или ТМ поляризаций падающего на многослойник излучения ошибка вводится путем нарушения требования четвертьволновой оптической толщины определенных слоев при заданном угле падения.

Расчет многослойного диэлектрического зеркала в работе произведен при помощи программного комплекса «Optilayer» для проектирования многослойных покрытий на основании данных, полученных спектроэллипсометрическим путем при измерении конкретного зеркала, изготовленного для эксперимента [6].

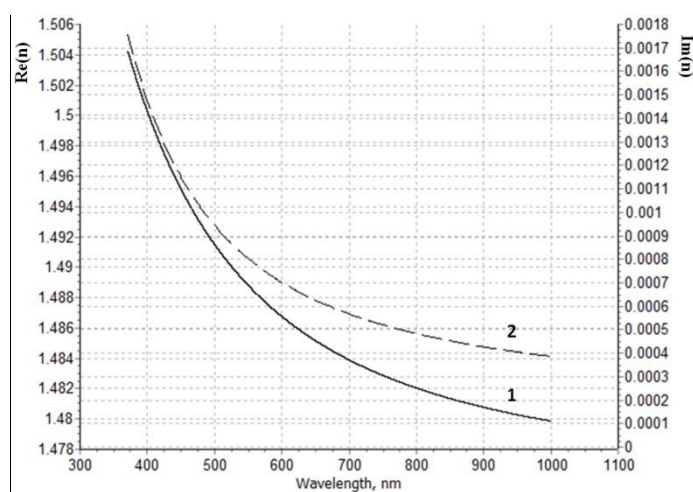


Рис. 2.1. Зависимость коэффициентов преломления (1) и поглощения (2) напыляемой пленки SiO_2 измеренная эллипсометром

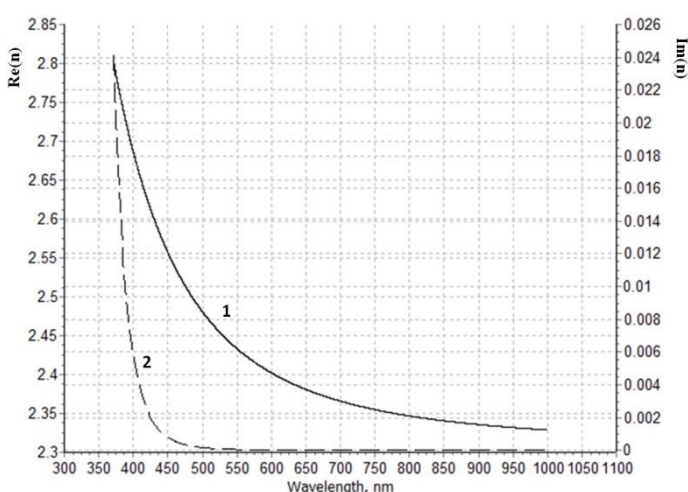


Рис. 2.2. Зависимость коэффициентов преломления (1) и поглощения (2) напыляемой пленки TiO_2 измеренная эллипсометром

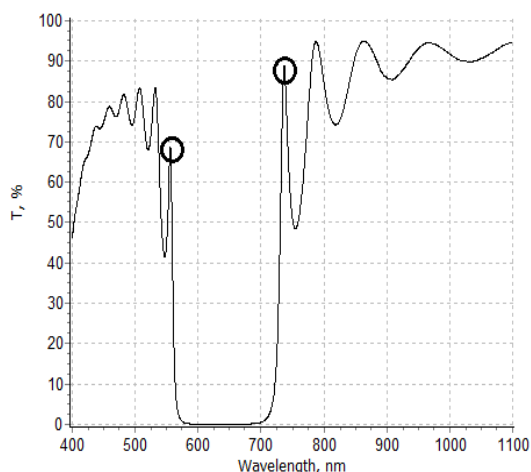


Рис. 3.1. Чувствительность 9-12 слоев

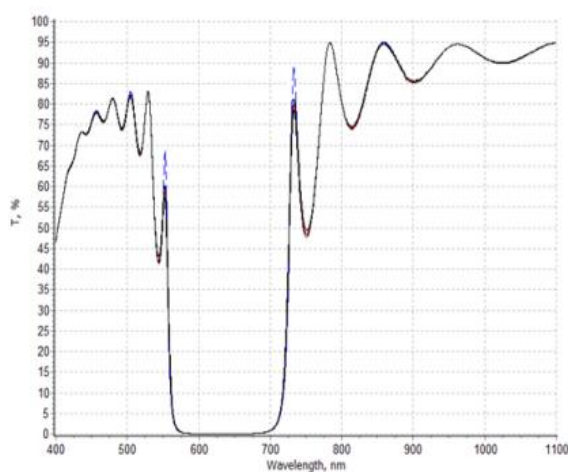


Рис. 3.2. Ошибка в толщине 12-го слоя.

В качестве примера на рис. 3.2 представлен спектр с ошибкой в 12-м слое и на рис. 3.1 выделены экстремумы, которые зависят от этой ошибки.

Эксперимент и численное моделирование. Для сопоставления результатов численного моделирования с экспериментом было изготовлено зеркальное 23-слойное покрытие, нанесенное в вакуумной камере ионно-лучевым способом путем чередования диэлектрических окисных слоев TiO_2 и SiO_2 на подложку из ситалла (рис.1). При помощи эллипсометра Woollam M-2000V были измерены параметры тонких пленок (рис. 2.1, рис. 2.2).

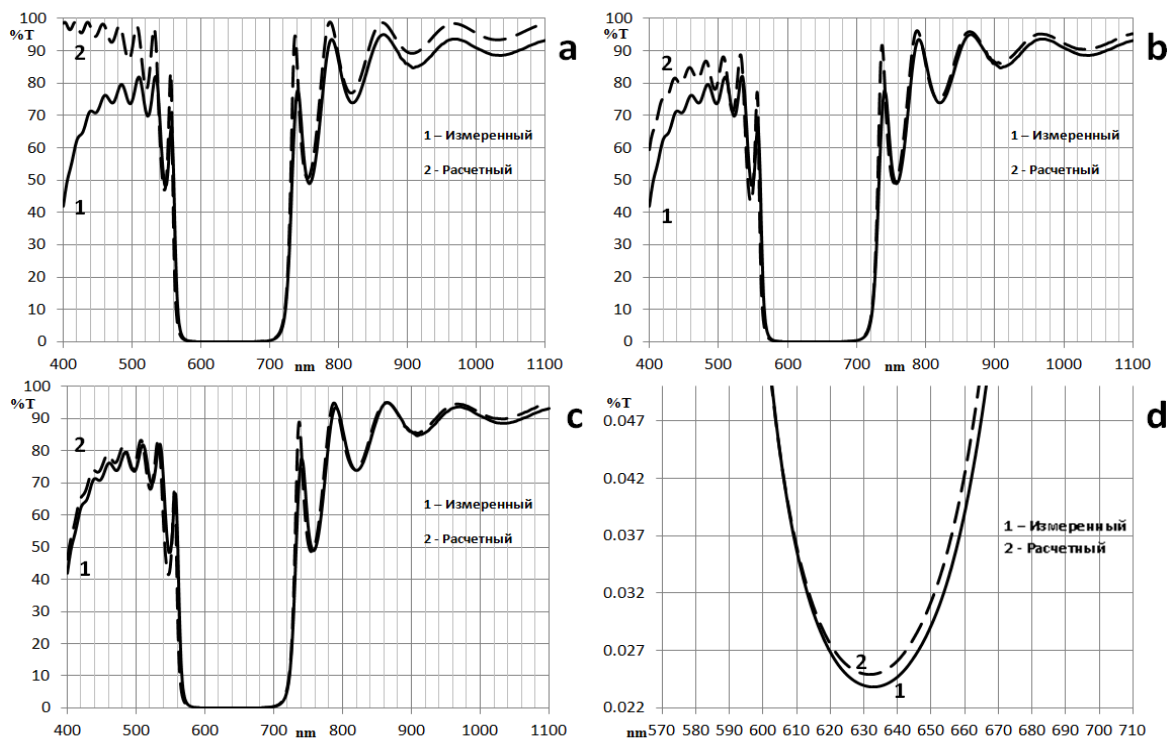


Рис. 4. Поэтапное моделирование с введением параметров материалов: а) без учета поглощения всех материалов, б) с поглощением подложки, в) с поглощением материалов слоев, д) полученный минимум на 632.8 нм.

а) Сравнение измеренного спектра и расчетного без учета поглощения материалов.

б) Вводя в расчет только поглощение подложки видно, что помимо общего снижения пропускания наблюдается поглощение в коротковолновой области (400-530нм), именно эта часть спектра сильнее всего зависит от материала и качества обработки подложки.

в) Далее вводим поглощение для материалов слоев – TiO_2 и SiO_2 соответственно. Наблюдается общее снижение пропускания и как итог – спектр довольно близок к измеренному, что подтверждает верность расчета и довольно низкую погрешность в толщинах слоев.

д) минимум на 632.8 нм.

Оптическая толщина слоев покрытия была рассчитана для $\lambda=632,8$ нм (He-Ne лазер) и для угла падения излучения на поверхность зеркала 45 градусов. Спектральная зависимость коэффициента пропускания зеркала была промерена с помощью прецизионного спектрофотометра PerkinElmer Lambda 950 в диапазоне длин волн 400-1100нм.

Заключение. Сравнение измеренного и расчетных спектров при поэтапном моделировании дает наглядное представление об изменении формы именно того участка кривой, который является наиболее чувствительным к изменению характеристик подложки и конкретных слоев.

Проведение подобного рода анализа позволит улучшить технологический процесс изготовления прецизионных лазерных зеркал.

Авторы выражают благодарность Расеву М.М., Оглоблину М.С. и Фокину В.В. за внимание к работе и помощь в напылении покрытий и проведении измерений.

Литература:

1. *Kolodnyi G., Golyaev Yu, Azarova V., Rasyov M., Tikhmenev N.* Ion beam optical coatings for visible and near IR lasers. Laser Optics 2000: Solid State Lasers. Proceedings of SPIE Vol. 4350. 2001.
2. *Furman Sh. A., Tikhonravov A.V.* Basics of optics of multilayer systems. Edition Frontieres, Gif-sur-Yvette. 1992.
3. *Борн М. и Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука. 1970.
4. *Джеррард А. и Берч Дж.М.* Введение в матричную оптику. М.: Мир. 2008.
5. *Азарова В.В., Перфилов Д.О., Тегин М.С.* Моделирование и анализ интерференционных покрытий лазерных зеркал. Научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов НИУ ВШЭ им. Е.В. Арменского. 2015. С. 244-245.
6. *Азарова В.В., Ищенко П.И., В.В. Фокин.* Свойства оптических тонких пленок TiO_2 , Ta_2O_5 , SiO_2 и лазерных гироскопических зеркал на их основе. 57-я Конф. МФТИ, 2014г.

Список подписей к рисункам:

1. Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента пропускания многослойника TiO_2/SiO_2 измеренная спектрофотометром.
2. Рис. 2.1. Зависимость коэффициентов преломления (1) и поглощения (2) напыляемой пленки SiO_2 измеренная эллипсометром
3. Рис. 2.2. Зависимость коэффициентов преломления (1) и поглощения (2) напыляемой пленки TiO_2 измеренная эллипсометром
4. Рис. 3.1. Чувствительность 9-12 слоев
5. Рис. 3.2. Ошибка в толщине 12-го слоя.
6. Рис. 4. Поэтапное моделирование с введением параметров материалов: а) без учета поглощения всех материалов, б) с поглощением подложки, в) с поглощением материалов слоев, д) полученный минимум на 632.8 нм.