

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТОНКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК SiO_2 и Ta_2O_5 ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ.

В.В. Азарова^{1,2}, В.В. Фокин²

1. МИЭМ (ТУ); 2. ФГУП НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха

azarovav@hotmail.ru;

There are analyzed the ellipsometrical measurement results of precision optical SiO_2 and Ta_2O_5 layers obtained by ion beam method and discussed the optimization of the regimes of there production.

1. Введение.

В современных оптических и оптико-электронных приборах важную роль играют тонкие пленки, толщина которых варьируется от десятков нанометров до нескольких единиц микрон. Одним из примеров их применения являются многослойные интерференционные покрытия лазерных зеркал – поверхностей, формирующих оптический резонатор и представляющих собой периодическую слоистую структуру. Качество таких поверхностей во многом определяют точностные характеристики измерительных приборов, в частности лазерных гироскопов. Сложность заключается в том, что свойства слоев очень вариативны и зависят от многих параметров – условий нанесения, качества используемого материала, чистоты подложек и т.д. Поэтому контроль параметров таких объектов является серьезной задачей. Наиболее подходящими для этой цели являются оптические, в частности, эллипсометрические методы контроля, т.к. именно они позволяют определить основные оптические характеристики отдельных слоев и многослойников [1,3]. Для тонких пленок толщиной порядка от 10 нм до единиц микронов эллипсометрия позволяет одновременно определять толщину и показатель преломления (в общем случае комплексный), а так же наличие неоднородности показателя преломления по толщине вдоль направления нормали к поверхности. В данной работе приводятся и обсуждаются результаты измерения тонких пленок SiO_2 и Ta_2O_5 , полученные при различных режимах их изготовления.

2. Эллипсометрический метод измерений.

Метод эллипсометрии основан на том, что в общем случае свет после отражения от исследуемого образца изменяет свою форму поляризации (Рис. 1).



Рис. 1. Взаимодействие поляризованного света с образцом.

Основное уравнение эллипсометрии, связывающее между собой эллипсометрические параметры дельта (Δ) и пси (Ψ) и комплексные значения коэффициентов отражения по амплитуде R_p и R_s для p- и s-поляризованного света записывается в виде:

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \tan(\Psi)e^{i\Delta} \quad (1)$$

Как видно из уравнения 1 в процессе измерения определяются не абсолютные, а относительные величины, что является важным достоинством метода. По измеренным величинам Δ и Ψ при решении обратной задачи эллипсометрии на основе выбранной модели рассчитываются оптические параметры поверхности образца.

Ниже приводятся результаты измерений тонких диэлектрических пленок SiO_2 и Ta_2O_5 напыленных на кремниевые (Si) пластины с целью отработки режимов напыления лазерных зеркал. Следует отметить, что при расчете многослойных интерференционных покрытий образующие его четвертьволновые слои считаются однородными. Соответственно при определении параметров отдельных пленок методом эллипсометрии сначала использовалась однослойная модель (Рис.2), причем слой считался однородным.

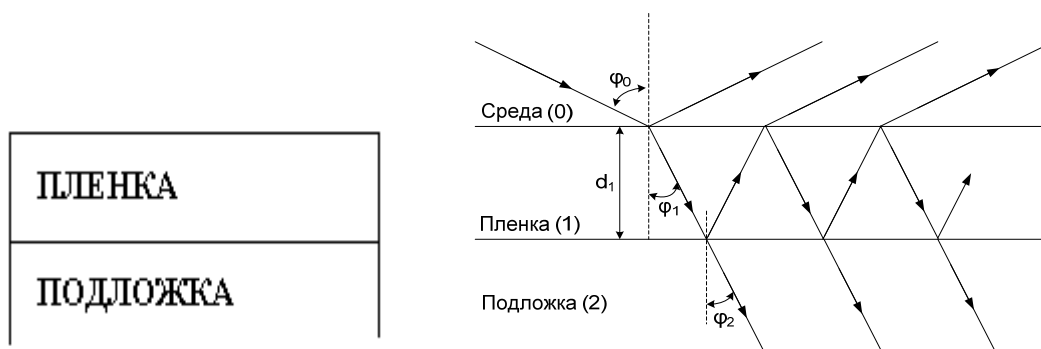


Рис. 2. Однослойная модель и картина многократных отражений света в такой модели.

Измерения проводились в спектральном диапазоне 380 – 1000 нм на трех различных углах падения – 65, 70 и 75 градусов. Дисперсия показателя преломления задавалась соотношением Коши:

$$n(\lambda) = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4 \quad (2)$$

Достоверность полученных результатов оценивалась с помощью функции ошибки:

$$MSE = \frac{1}{2N - M} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\Psi_i^{mod} - \Psi_i^{exp}}{\sigma_{\Psi,i}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_i^{mod} - \Delta_i^{exp}}{\sigma_{\Delta,i}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

где N – число пар (Ψ, Δ), M – число переменных параметров в модели, Ψ_i^{mod} , Δ_i^{mod} – данные рассчитанные из модели, Ψ_i^{exp} , Δ_i^{exp} – экспериментальные данные, а σ – стандартное отклонение по точкам экспериментальных данных. Достоверным считается тот результат, при котором функция ошибки принимает наименьшее значение. Кроме того полученные результаты должны иметь физический смысл. В нашем случае это означает, что рассчитанные дисперсионные кривые показателей преломления исследуемых материалов должны иметь нормальный вид в измеряемом спектральном диапазоне, т.е. с ростом длины волны показатель преломления должен монотонно уменьшаться.

3. Обсуждение результатов измерений .

Для пленок SiO₂ результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1.

	Толщина (нм)	Показатель преломления (n) для $\lambda=632,8$ нм
Образец №1	94.00	1.480
Образец №2	178.18	1.481
Образец №3	179.08	1.481

Для всех трех образцов SiO₂ хорошо работает однослойная модель и сколь-нибудь существенный градиент показателя преломления не

моделируется, т.е. слой можно считать однородными. При напылении Образца №1 предполагалось получить пленку толщиной 100 нм, при напылении Образцов №2 и №3 – пленку толщиной 200 нм. На основании полученных результатов определялась скорость роста пленки, и корректировался режим напыления.

Для пленок Ta_2O_5 результаты, рассчитанные по однослойной модели, приведены в таблице 2.

Таблица 2.

	Толщина (нм)	Показатель преломления (n) для $\lambda=632,8$ нм
Образец №4	203.40	2.097
Образец №5	203.51	2.099

Однако значения функции ошибки для образца №4 и №5 составили 14.447 и 13.716, соответственно. Это довольно большие значения и говорят о том, что выбранная модель полностью не отражает реальную структуру. На Рис. 3 видно, что экспериментально измеренные кривые параметров Ψ и Δ и теоретически рассчитанные кривые на основе выбранной модели полностью не совпадают.

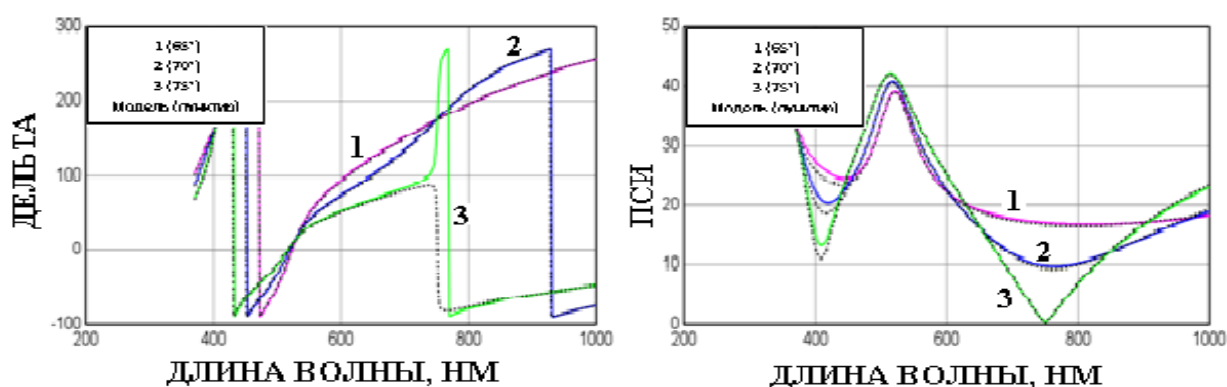


Рис. 3. Экспериментально измеренные (сплошные линии) и рассчитанные на основе однослойной модели (пунктирные линии) зависимости Ψ и Δ в единицах угловых градусов от длины волны.

На основании этого используемая для расчетов модель была усложнена добавлением еще одного слоя (Рис. 4), т.е. мы предположили, что

нанесенный слой является неоднородным. Таким образом, аппроксимация была проведена двумя однородными слоями, как это показано на рис.4.

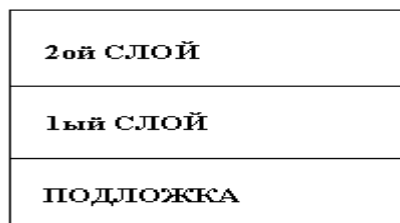


Рис.4 Двухслойная модель.

Усложнение модели значительно улучшило функцию ошибки для образцов №4 и №5. Ошибка уменьшилась от значений 14.447 и 13.716 до 2.244 и 2.277. На рис.5 видно, что экспериментальные и расчетные кривые совпадают с хорошей степенью точности.

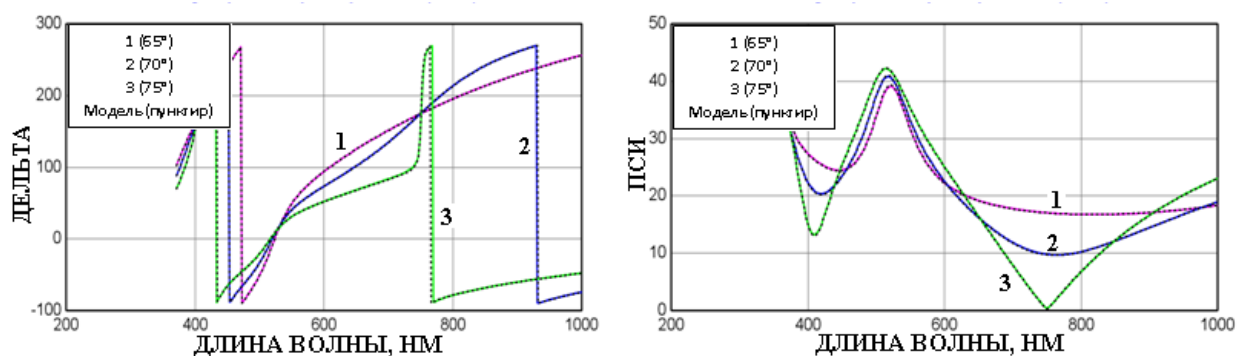


Рис. 5. Экспериментально измеренные и рассчитанные на основе двухслойной модели кривые Ψ и Δ .

Результаты, полученные на основании этой модели, даны в таблице 3.

Таблица 3.

		Толщина слоя (нм)	Суммарная толщина (нм)	Показатель преломления (n) для $\lambda=632,8$ нм
Образец №4	1ый слой	41.93	198.88	2.080
	2ой слой	156.95		2.137
Образец №5	1ый слой	36.90	199.2	2.070
	2ой слой	162.30		2.136

Дальнейшее усложнение модели не привело к значительному улучшению функции ошибки, поэтому в данном случае двухслойная модель наиболее точно отражает реальную структуру напыленного слоя Ta_2O_5 . Следует отметить, что в действительности скорее всего между этими двумя слоями нет никакой резкой границы раздела, а вероятно имеется плавное изменение показателя преломления. Причиной такого изменения, вероятно, является неконтролируемое изменение температуры в процессе нанесения пленки от приблизительно 20 до 100 градусов. На Рис. 6 даны рассчитанные дисперсионные кривые для образца №4 для двухслойной модели (1ого и 2ого слоев) и для однослойной модели.

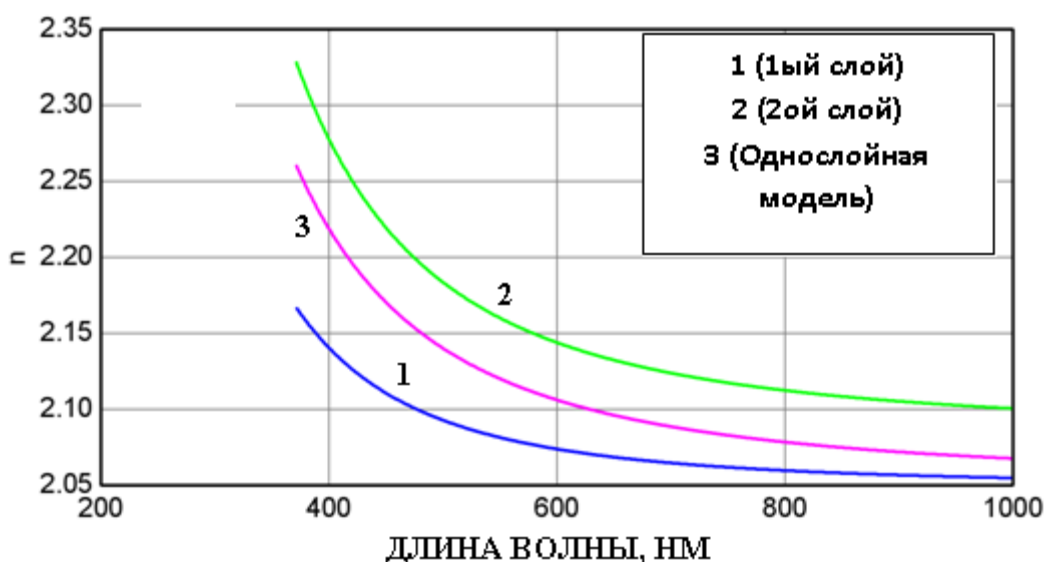


Рис.6. Дисперсия показателя Ta_2O_5 преломления для слоев двухслойной модели – 1, 2 и однослойной модели – 3.

Кривая показателя преломления 3, рассчитанная из однослойной модели, находится между кривыми 1 и 2, рассчитанными для 1ого и 2ого слоев двухслойной модели, т.е. принимает некоторое промежуточное значение. В данном случае использование однослойной модели приводит к небольшой ошибке при определении толщины слоя, т.к. изменение показателя преломления вдоль нормали к поверхности пленки происходит нелинейно. Из таблиц 2 и 3 видно, что отличие в суммарной толщине составляет ~4 нм. Это в свою очередь приведет к неточному определению скорости роста и систематической ошибке в толщине слоя при напылении, а так как в многослойном интерференционном покрытии таких слоев может

быть до двух-трех десятков, эта ошибка будет накапливаться. Поэтому необходима корректировка и выбор оптимальных режимов напыления.

4. Выводы

Проведенные в работе экспериментальные измерения нанесенных ионно-лучевым напылением тонких пленок показали, что эллипсометрические измерения параметров тонких пленок являются точным и надежным методом контроля технологического процесса изготовления сложных композиционных покрытий, включая и прецизионные покрытия высокоотражающих лазерных зеркал. Применяя результаты анализа измерений можно оптимизировать процессы их изготовления.

5. Заключение

В заключение авторы благодарны М.М.Расеву и сотрудникам его группы в НИИ «Полус» за изготовление тонких пленок. Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований. Грант РФФИ 07-02-13662.

1. Крылова Т.Н., Бохонская И.Ф., Карапетян Г.А. Измерение прозрачных пленок на поверхности стекла эллипсометрическим и спектрофотометрическим методами// Опт. и спектр. – 1980, т.49, вып.4., стр.802-808.
2. G. Kolodnyi, Yu. Golyaev, V. Azarova, M. Rasyov, N. Tikhmenev, Ion beam optical coatings for visible and near IR lasers. Proc. SPIE, v.4350, 120÷125, 2000.
3. Азам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет.– М.: Мир, 1981.-582 с.