

ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ

© 2009 г. А. А. Немкова; Э. С. Путилин, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург
E-mail: anastasia.nemkova@yahoo.com

С помощью эллипсометрического и фотометрического методов выполнены измерения показателя преломления пленки на основе тетраэтоксисилана. Показано, что методом эллипсометрии возможно определить не только показатель преломления, но и выявить неоднородность оптического профиля.

Коды OCIS:

Поступила в редакцию 18.09.2008.

Введение

Просветляющие покрытия находят широкое применение в тех областях, где требуется увеличение пропускания или снижение потерь на отражение от поверхности материала. В солнечных элементах нанесение просветляющего покрытия позволяет улучшить эффективность преобразования солнечного излучения. Использование просветляющих покрытий в лазерных системах увеличивает мощность выходящего излучения, обеспечивая при этом высокую лазерную прочность элементов.

Для получения однослойного просветляющего покрытия показатель преломления материала пленки должен быть предельно малым. Нулевое отражение достигается при показателе преломления пленки, равном квадратному корню показателя преломления подложки. Пленкообразующих материалов, удовлетворяющих данному требованию для подложек, прозрачных в видимой области спектра, не существует. Следовательно, задача получения просветляющего покрытия не может быть успешно решена без точной информации о его показателе преломления. Наиболее чувствительные методы определения оптических постоянных тонких слоев на поверхности стекла и других прозрачных сред основаны на анализе света, отраженного от поверхности с пленкой: эллипсометрия и спектрофотометрия.

Целью данной работы является измерение показателя преломления просветляющей пленки двумя методами и сравнение полученных результатов.

Методы измерения показателя преломления тонких пленок

Эллипсометрия

Сущность эллипсометрического метода измерений состоит в исследовании изменения состояния поляризации пучка света в результате его отраже-

ния от изучаемого объекта. Эллипсометрические параметры Δ и ψ связаны основным уравнением

$$\operatorname{tg}\psi \exp i\Delta = R_p/R_s, \quad (1)$$

где R_p и R_s – полные комплексные амплитудные коэффициенты отражения для p - и s -поляризаций [1]. Таким образом, $\operatorname{tg}\psi$ является соотношением амплитуд, а Δ – разностью фаз компонент отраженного света. Поскольку измеряется не абсолютное значение двух величин, а их соотношение, то на результат не влияет изменение интенсивности источника света и поглощение воздуха.

Эллипсометрия не является прямым методом измерения. Для получения значений оптических констант пленки необходимо использование модели, включающей начальные и граничные значения искомого параметра. Поиск осуществляется минимизацией функции качества F по методу наименьших квадратов.

В многоугловой эллипсометрии используется монохроматический источник света. Обычно это лазер, длина волны излучения которого лежит в видимой области спектра. В этом случае измерение эллипсометрических параметров осуществляется при нескольких углах падения света. Спектральная эллипсометрия [2] позволяет измерять оптические константы на любой длине волны в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Кроме того, за счет большого количества независимых данных возможно измерение толщин и структуры каждого слоя многослойной системы, степень их кристалличности, наличие поверхностного примесного слоя.

Пленки с предельно низким показателем преломления возможно получить путем образования внутри них пористой структуры. Пористость может быть обусловлена неплотной упаковкой полимера, газопоглощением и газовыделением, химическими реакциями, микроусадкой и др. Адсорбционно-эллип-

симметрический метод [3], заключающийся в регистрации объема адсорбирующегося вещества, позволяет измерять пористость пленок.

Спектрофотометрия

Спектрофотометрический метод определения оптических характеристик прозрачных пленок на поверхности прозрачной подложки основан на измерении спектральных значений коэффициента отражения R_λ для ряда длин волн выбранного участка спектра [4]. Для просветляющих пленок измерение коэффициента отражения дает более точный результат, чем измерение коэффициента пропускания, кроме того, на результат не влияет более толстая подложка.

Показатель преломления определяется по экстремуму на спектральной кривой коэффициента отражения. В случае просветляющей пленки измеряется минимальный коэффициент отражения, определяемый выражением

$$R_{\min} = (n_1^2 - n_0 n_2)^2 / (n_1^2 + n_0 n_2)^2, \quad (2)$$

где n_0 – показатель преломления воздуха, n_1 – показатель преломления пленки, n_2 – показатель преломления подложки. Разница значений R_{\min} на кривой спектрального отражения позволяет судить о дисперсии пленкообразующего вещества.

Для многослойных покрытий определение оптических постоянных с помощью спектрофотометрического метода требует специальных способов расчета с использованием моделей покрытий.

Результаты измерений

Образцом для измерений служило однослойное покрытие, полученное золь-гель методом из 10 %-го раствора тетраэтоксисилана на стеклянной подложке с показателем преломления $n = 1,514$.

Для измерения показателя преломления использовался эллипсометр ЛЭФ-3М, где в качестве источника излучения используется гелий-неоновый лазер с длиной волны 632,8 нм. Сначала для измерений была выбрана модель однородной пленки, которая предполагает постоянство показателя преломления по толщине пленки. Измеренное значение составило 1,43.

Пленки, полученные из раствора тетраэтоксисилана, обладают пористой структурой и зачастую неравномерным распределением частиц SiO_2 по толщине. Для более детальной характеристики оптического профиля использовалась экспоненциальная модель с изгибом у подложки. В данном случае профиль аппроксимируется системой из десяти од-

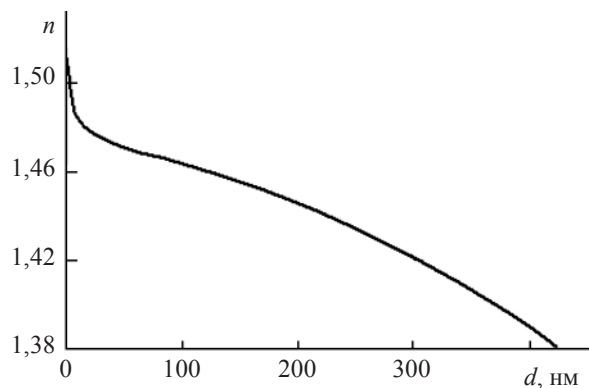


Рис. 1. Зависимость показателя преломления от толщины покрытия.

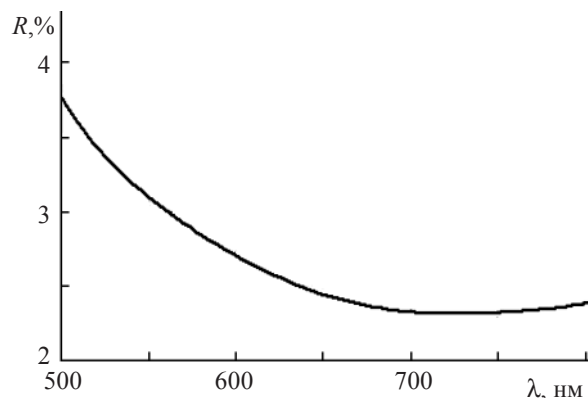


Рис. 2. Спектральный коэффициент отражения покрытия.

нородных пленок, для каждой из которых определяются оптические константы. Результат измерения исследуемой пленки представлен на рис. 1. Показатель преломления пленки на границе с воздухом имеет минимальное значение, постепенно увеличиваясь по мере приближения к подложке.

Спектральный коэффициент отражения определялся на микроскопе-спектрофотометре МСФУ-ЭВМ в интервале длин волн от 500 до 800 нм (рис. 2). Минимальное значение коэффициента отражения составило 2,31%. Соответствующий показатель преломления пленки, рассчитанный на основе формулы (2), имеет значение 1,434, которое в пределах экспериментальной погрешности согласуется с результатом эллипсометрических измерений.

Заключение

Методы эллипсометрии и спектрофотометрии позволяют бесконтактным неразрушающим способом определять показатель преломления тонких

пленок. Результаты эллипсометрии зависят от используемой модели, значений начальных и граничных параметров. Спектрофотометрические измерения и эллипсометрические измерения с использованием модели однородной пленки позволяют получить среднее значение показателя преломления пленки по толщине без учета ее неоднородной структуры. Применение экспоненциальной модели при проведении эллипсометрических измерений позволяет выявить неоднородность пленки и определить изменение показателя преломления по толщине.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Азам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981. 252 с.
2. *Vedam K.* Spectroscopic ellipsometry: a historical overview // *Thin Solid Films*. 1998. V. 313–314. P. 1–9.
3. *Толмачев В.А.* Адсорбционно-эллипсометрический метод исследования оптического профиля, толщины и пористости тонких пленок // *Оптический журнал*. 1999. Т. 66. № 7. С. 20–34.
4. *Крылова Т.Н.* Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.