УДК 535.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ МЕТОДАМИ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ И ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОМЕТРИИ

М.Е. Александров, Т.М. Данилова, П.С. Беломутская, И.А. Храмцовский

Рассмотрен эллипсометрический метод аттестации образцовых элементов для спектрофотометрической аппаратуры. Проведено сопоставление результатов аттестации образцовых элементов методами эллипсометрии и импульсной фотометрии. Определены особенности временны́х изменений фотометрических характеристик образцовых элементов в петролейном эфире и в атмосфере воздуха при нормальных условиях.

Ключевые слова: эллипсометрия, импульсная фотометрия, потери излучения.

Введение

При наличии на оптической детали поверхностного слоя (ПС) со свойствами, отличными от свойств объема материала, реальные фотометрические характеристики не только не совпадают с расчетными значениями, полученными на основе формул Френеля, но и могут изменяться в процессе хранения и эксплуатации элементов [1–3]. Возросшие требования к аттестации оптических характеристик образцовых элементов с малыми потерями излучения в видимой области спектра заставляют учитывать эти обстоятельства. В качестве метода определения оптических характеристик ПС предложено использовать метод эллипсометрии неоднородных отражающих систем [1–3]. По оптическим характеристикам ПС можно определить потери оптического излучения, связанные с отражением поляризованного света от поверхностного слоя. Это позволяет уточнить истинные оптические характеристики образцовых элементов измерения для спектрофотометрической аппаратуры.

Целью работы является сопоставление расчетных значений коэффициента пропускания, полученных по данным эллипсометрических измерений, с данными экспериментальных измерений коэффициента пропускания по методу импульсной фотометриии $T_Ф$. Проведено исследование изменений коэффициента пропускания δT образцовых элементов, изготовленных из многокомпонентных силикатных стекол различного химического состава, хранившихся в петролейном эфире и в атмосфере воздуха при нормальных условиях.

Методика определения коэффициента пропускания элементов методом эллипсометрии

Для случая нормального падения светового пучка на элемент, изготовленный из изотропного оптического материала в виде плоскопараллельной пластинки и имеющий на поверхности неоднородный изотропный слой, следует использовать формулы для расчета коэффициента пропускания. С учетом многократных отражений светового пучка в пластинке и оптических характеристик поверхностного слоя значение $T_Э$, определяемое методом эллипсометрии, примет вид [1, 3]:

$$T_э = T_o - \alpha_p, \;\; T_o = 2 \cdot n_o \cdot n_B \cdot (n_o^2 + n_B^2)^{-1}, \qquad (1)$$

$$\alpha_p = T_o \cdot k_o \frac{n_o^2 - n_B^2}{n_o^2 + n_B^2} \times \{\int_o^\infty [\delta n_1(z) + \delta n_2(z)] \cdot \sin(2 n_o k_o z) dz\}. \qquad (2)$$

Здесь T_o – коэффициент пропускания элемента без учета оптических характеристик ПС; n_o – показатель преломления стекла; n_B – показатель преломления внешней среды; α_p – потери оптического излучения в ПС;

$k_0=2\pi/\lambda$,

где λ – длина волны излучения; $\delta n_1(z)$ и $\delta n_2(z)$ – отклонение показателя преломления ПС от объемного значения n_0 на двух поверхностях элемента.

В качестве объектов исследования были выбраны пластинки стекол КИ, ЛК3, К8, ТФ12 размером $40 \times 40 \times 1$ мм^3, поверхности которых полировались по стандартной технологии. Сравним результаты расчета и экспериментальных данных при определении коэффициента пропускания образцовых оптических элементов по данным методов эллипсометрии $T_Э$ и импульсной фотометрии $T_Ф$.

Оптические характеристики ПС определялись методом эллипсометрии по данным измерения поляризационных углов Δ и Ψ на приборе ЛЭФ-2 (λ =0,6328 мкм) при углах падения светового пучка 50°, 55°, 60° и 70°. По формулам (1), (2) определялся коэффициент пропускания $T_Э$. Коэффициенты пропускания образцов $T_Ф$ измерялись при нормальном падении светового пучка методом импульсной фотометрии на установке, описанной в [2], при длине волны лазерного излучения λ =0,532 мкм с погрешностью 0,01–0,02%. Значения показателей преломления в объеме материала n_0 были получены методом рефрактометрии. Коэффициент пропускания T_0 рассчитывался по формуле (1).

Учет влияния ПС при расчете коэффициентов пропускания $T_Э$ позволяет уменьшить ошибку в определении коэффициента пропускания T_o. Разность значений $T_Э$ и $T_Ф$ будет определятся близостью модельного профиля ПС к реальному, а также способом учета отличий дисперсионных свойств ПС от

свойств объема материала, показателя ослабления излучения μ в стекле и рассеянием излучения на шероховатой поверхности.

Под оптическим профилем поверхностного слоя понимается распределение локального показателя преломления по его глубине [1-3]. В нашем случае использовались модели однородного профиля (I) и экспоненциальное распределение показателя преломления по глубине поверхностного слоя (II).

Марка стекла	Профили ПС на двух сторонах пластины	Параметры ПС (λ=0,633 мкм)		Длина волны излучения λ, мкм	n_0	Коэффициент пропускания элемента ,%		
		n^*	d^*, мкм			T_0^{**}	$T_Э^{**}$	$T_Ф^*$
КИ	II I	1,459 1,459	0,100 0,053	0,532 0,633 1,064	1,4607 1,4570 1,4497	93,23 93,31 93,48	93,17 93,26 93,45	93,09 – 93,40
К3	II II	1,489 1,489	0,127 0,234	0,532 0,633 1,064	1,4892 1,4853 1,4779	92,56 92,65 92,83	92,41 92,51 92,70	92,16 – 92,68

Таблица 1. Оптические параметры ПС и коэффициентов пропускания, полученные различными оптическими методами, на элементах лазерной техники: (*) – экспериментальные и (**) – расчетные значения T,% : I – модель однородного ПС, II – модель экспоненциального профиля ПС, n^* – эффективный показатель преломления ПС, d^* – эффективная толщина ПС [1, 3]

Исследование временны́х изменений коэффициента пропускания образцовых элементов

Испытания двух групп образцов проводились в течение двух лет. Первая группа образцов хранилась в атмосфере воздуха при нормальных условиях, вторая группа образцов хранилась в петролейном эфире. В табл. 2 приведены данные об изменении коэффициентов пропускания $T_Ф$ элементов с течением времени при хранении двух идентичных партий образцов, выполненных из различных по структуре силикатных стекол. Условия хранения приведены выше. Изменение коэффициентов пропускания определялось как $\delta T_Ф = T_Н - T_К$, где $T_Н$ – начальное значение коэффициента пропускания, $T_К$ – конечное значение коэффициента пропускания.

Для первой партии изменение можно объяснить изменением структуры ПС в результате физико–химического воздействия окружающей среды (атмосферы воздуха). Для второй партии образцов отмечено более значительное изменение $\delta T_Ф$. Такое изменение коэффициента пропускания $\delta T_Ф$ для второй партии оптических элементов можно объяснить перестройкой структуры ПС вследствие уменьшения несоответствия внутренней энергии структуры системы «ПС–объем материала стекла» без воздействия внешней окружающей среды.

Марка стекла	Изменение коэффициента пропускания, $\delta T_Ф$ **, %**					
	В течение первого года		В течение второго года		Суммарные изменения	
	Первая партия	Вторая партия	Первая партия	Вторая партия	Первая партия	Вторая партия
К8	0	+ 0,10	+ 0,10	+ 0,10	+ 0,10	+ 0,20
ЛК3	– 0,03	– 0,03	+ 0,15	+ 0,20	+ 0,12	+ 0,17
КИ	+ 0,03	+ 0,16	– 0,01	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,18
ТФ12	+ 0,12	+ 0,21	+ 0,05	– 0,06	+ 0,17	+ 0,15

Таблица 2. Изменение коэффициента пропускания $\delta T_Ф$ образцов с течением времени их хранения. Длина волны излучения λ=0,532 мкм

В ходе исследований было подтверждено влияние условий внешней среды на оптические характеристики поверхностного слоя, а также показана справедливость термодинамических уравнений для определения коэффициента пропускания плоскопараллельной пластинки небольших размеров.

Заключение

Таким образом, для метрологической аттестации образцовых средств измерений спектрофотометрических характеристик следует использовать метод эллипсометрии, позволяющий определять оптические характеристики ПС и расчетным путем с достаточной точностью оценивать потери оптического излучения при отражении светового пучка. Для объективной оценки достоверности полученных резуль-

татов следует также проводить сопоставительный анализ с данными оптических измерений коэффициента пропускания методом импульсной фотометрии.

Показано, что замена общепринятого способа хранения образцовых элементов в петролейном эфире на хранение в контролируемой воздушной среде при нормальных условиях позволяет уменьшить временны́е изменения коэффициента пропускания.

Литература

1. Иванов В.Ю., Данилова Т.М, Храмцовский И.А К дискуссии о критерии качества внутрирезонаторных элементов ионных и эксимерных лазеров // Наука и техника: Вопросы истории и теории. Выпуск XXV. – СПб: СПб ИИЕТ РАН, 2009 – С. 315.
2. Каданер Г.И., Кислов А.В., Кувалдин Э.В. Импульсная фотометрическая установка для измерения коэффициентов пропускания материалов // Импульсная фотометрия. – Л., 1981. – Вып. 7 – С. 1048–1051.
3. Храмцовский И. А., Пшеницын В. И., Каданер Г.И., Кислов А.В. Учет оптических характеристик поверхностного слоя при определении коэффициентов отражения и пропускания прозрачных диэлектриков // ЖПС. – 1987. – Т. 46. – № 2. – С. 272–279.

Александров Максим Евгеньевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, itpao@mail.ru

Данилова Татьяна Михайловна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, Tadia@yandex.ru

Беломутская Полина Сергеевна – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, itpao@mail.ru

Храмцовский Игорь Анатольевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, вед. инженер, Tadia@yandex.ru