

## МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.7.026.6

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

*акад. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. А.П. ДОСТАНКО*  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск);  
*канд. техн. наук В.С. ТОМАЛЬ, канд. техн. наук Н.К. КАСИНСКИЙ*  
(НП РУП «Оптическое станкостроение и вакуумная техника», Минск);  
*д-р техн. наук, доц. И.А. ИВАНОВ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Представлена методика расчета воспроизводимости оптической толщины вакуумных покрытий. Исследовано влияние нагрева оптических деталей на воспроизводимость оптической толщины многослойных узкополосных фильтров второго порядка на основе окислов циркония и кремния, получаемых на вакуумных установках моделей ВУ-800, ВУ-2М и ВУ-1А. Предложено для более точной количественной оценки воспроизводимости оптической толщины вакуумных покрытий, кроме величины относительного стандартного отклонения, экспериментально определять величину доверительной вероятности.*

**Введение.** Воспроизводимость свойств оптических вакуумных покрытий (ОВП) является важной характеристикой технологических процессов, реализуемых на конкретных вакуумных установках. В соответствии с требованиями ГОСТ воспроизводимость понимается как степень близости в рамках наперед заданного предела результатов повторных испытаний объекта или реализации процесса при одинаковых условиях этих испытаний [1]. На практике в ходе технологических процессов нанесения покрытий в вакууме эти условия лишь с большой натяжкой можно считать постоянными, так как процесс испарения, конденсации и формирования оптического покрытия является динамическим с большими отклонениями от стационарных условий даже на протяжении времени формирования одного слоя.

Современный технологический процесс нанесения ОВП определяется рядом как контролируемых (давление, температура, геометрические размеры напыляемой детали, форма и геометрические размеры приёмной поверхности, взаимное геометрическое расположение источников испарения, нагревателя и приёмной поверхности), так и неконтролируемых факторов (концентрация дефектов, угол падения потока на деталь, размеры кристаллитов, отклонение от стехиометрии, остаточная атмосфера) [2]. Среди большого количества контролируемых технологических параметров термический нагрев оптических деталей является важным этапом технологического процесса нанесения покрытий. От режима термообработки зависит качество выпускаемых изделий (такие показатели, как адгезия покрытия к стеклянной основе, структура покрытий и др.), а также производительность всего процесса. Цель данной работы – исследовать влияние нагрева оптических деталей на воспроизводимость оптической толщины ОВП.

**Результаты и их обсуждение.** Процесс нанесения ОВП последовательно реализовывали на вакуумных установках моделей ВУ-800, ВУ-1А, ВУ-2М, серийно выпускаемых на ОАО «Сморгонский завод оптического станкостроения». Многослойный узкополосный фильтр второго порядка на основе окислов циркония  $ZrO_2$  и кремния  $SiO_2$  наносили на детали диаметром 40 мм. Под оптической толщиной пленки  $t$  понимали величину

$$t = n \cdot h, \quad (1)$$

где  $n$  – коэффициент преломления;  $h$  – геометрическая толщина ОВП.

Для измерения оптической толщины пленки использовали прибор спектрометрического контроля СФКТ-751, который позволяет контролировать толщину оптического покрытия по отражению монохроматического света контрольной длины волны  $\lambda_k$ , выбираемой в области спектра 380...1000 нм, от отдельного контрольного образца [3].

Оптическую толщину ОВП определяли в 5-ти точках сферической приемной поверхности как в одном технологическом цикле, так и от цикла к циклу. Фильтры наносили на непрогретые и нагретые до 300 °С оптические детали. Оптическая толщина пленки определялась по положению длины волны, соответствующей максимуму пропускания фильтра  $\lambda_{max}$ . Неравномерность толщины по сферической приемной поверхности рассчитывалась по пяти точкам по следующей формуле:

$$\delta t = \frac{\lambda_{max}^1 - \lambda_{max}^5}{\lambda_{max}^1}, \quad (2)$$

где верхний индекс указывает на номер точки сферической приемной поверхности.

Температуру поверхности деталей измеряли термопарным методом. Для измерения температуры приемная поверхность делилась на десять сферических зон в форме концентрических слоев с одинаковой площадью поверхности. Нулевая зона соответствует положению оптической детали на оси приемной поверхности. Испаритель располагали на расстоянии 250 мм от оси приемной поверхности (рис. 1).

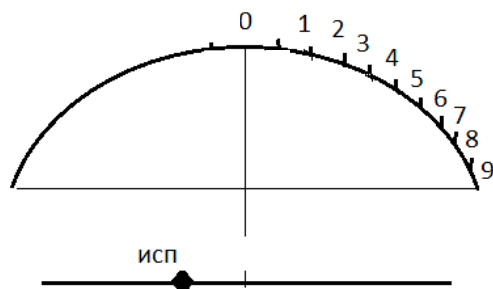


Рис. 1. Относительное расположение испарителя и сферических зон на приемной поверхности в вакуумной камере: 0...9 – номер сферической зоны (места расположения деталей); исп – испаритель

Испаритель располагали на расстоянии 250 мм от оси приемной поверхности (рис. 1).

Нагрев оптических деталей, находящихся на приемной поверхности, определяется тепловым потоком как от внешних нагревательных устройств, так и от испарителя. Из-за сферической формы приемной поверхности плотность поглощенного потока максимальна в центре этой поверхности и уменьшается к её периферии. Исследования показали, что распределение температуры по приемной поверхности зависит от радиуса ее кривизны. С ростом радиуса кривизны график распределения становится более пологим. Перепад температуры от центра к периферии уменьшается (рис. 2).

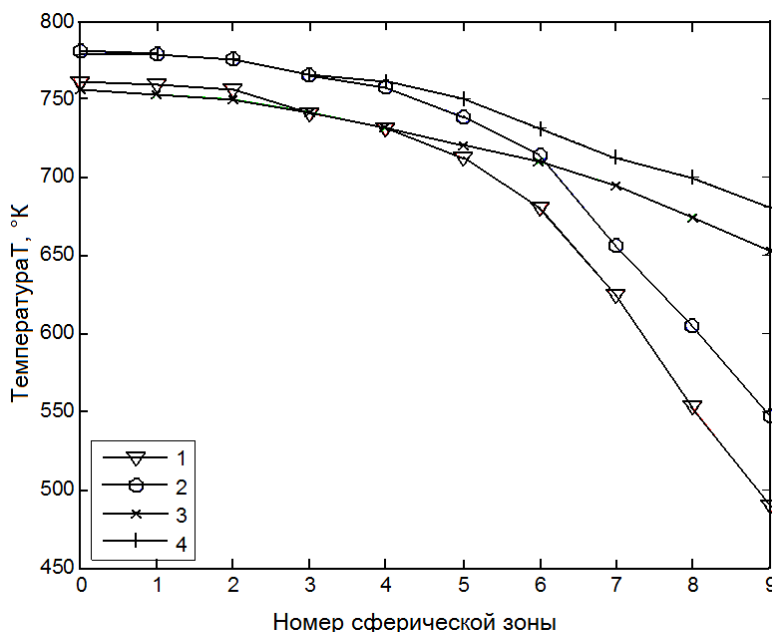


Рис. 2. Распределение температуры по приемной поверхности. Радиус кривизны поверхности: 1, 2 – 0,385 м; 3, 4 – 1,0 м. Нагрев поверхности: 2, 4 – от испарителя и нагревателя; 1, 3 – только от испарителя

В случае плоской приемной поверхности перепад температур минимален. Однако на плоской приемной поверхности неравномерность толщины ОВП достигает 35 %. Таким образом, сферическая форма приемной поверхности является необходимой для получения равномерных по толщине ОВП.

Для экспериментального изучения воспроизводимости оптической толщины ОВП от процесса к процессу многослойный узкополосный фильтр наносили при одних и тех же технологических режимах для нескольких последовательно загружаемых партий оптических деталей. Величина максимума пропускания фильтра  $\lambda_{\max}^i$  для разных партий представлена в таблице 1. Измерения проводили на оптических деталях, расположенных на позиции 1 (см. рис. 1).

Таблица 1

Результаты контроля оптической толщины ОВП

№ загрузки	3	4	5	6	8	9
$\lambda_{\max}^i$	660	630	650	620	670	650
$\lambda_{\max}^{cp}$	646,6					
Величина эмпирического стандарта, S	18,62					

Величину эмпирического стандарта вычисляли по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_{\max}^i - \lambda_{\max}^{cp})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где  $n = 6$ ;

$$\lambda_{\max}^{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{\max}^i. \quad (4)$$

В качестве меры воспроизводимости используем относительное стандартное отклонение  $s_r$ , [4], в процентах:

$$s_r = \frac{S}{\lambda_{\max}^{cp}} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

Тогда для данных, приведенных в таблице 1, относительное стандартное отклонение  $s_r$  составит 2,9 %. Следовательно, воспроизводимость ( $B$ ), т.е. повторяемость оптической толщины ОВП от процесса к процессу, при одинаковых технологических режимах их осаждения будет определена по формуле:

$$B = 1 - s_r, \quad (6)$$

она составит 97,1 %.

Для более точной оценки воспроизводимости оптической толщины кроме знания величины отклонения  $\Delta\lambda_{\max}$  необходимо задать и величину доверительной вероятности проводимых оценок. Другими словами, требуется знание того, что результат измерения оптической толщины ОВП отличается от истинного значения  $\lambda_{\max}$  на величину, большую  $\Delta\lambda_{\max}$ . Для получения таких характеристик используем интервальную оценку результатов измерений  $\lambda_{\max}$ .

Так как точное значение дисперсии нам неизвестно и мы пользуемся рассчитанной по результатам эксперимента эмпирической дисперсией, то для оценки величины доверительного интервала воспользуемся следующей формулой [4]:

$$\Delta\lambda_{\max} = t(P, k) \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}, \quad (7)$$

где  $t(P, k)$  – коэффициент Стьюдента;  $P$  – доверительная вероятность;  $k$  – степень свободы ( $k = n - 1$ ).

Результаты оценки воспроизводимости технологического процесса нанесения узкополосного фильтра в зависимости от величины доверительного интервала, воспроизводимости от уровня значимости для заданного числа измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2

Определение величины доверительного интервала, воспроизводимости от уровня значимости для заданного числа измерений

Уровень значимости, $\alpha = 1 - B$	$t(P, k)$	$\Delta\lambda_{\max}$	Относительное максимальное отклонение, $\delta = \Delta\lambda_{\max} / \lambda_{\max}^{cp}$ , %	Воспроизводимость, $B$ , %
0,05	2,57	19,53	3,0	97
0,03	3,1	23,56	3,6	96,4
0,02	3,37	25,61	4,0	96
0,015	4,03	30,63	4,7	95,3

Таким образом, уровень воспроизводимости 97 % соответствует доверительной вероятности 95 %. Следовательно, количество годных деталей в каждом технологическом цикле не превышает 92,15 %:  $(0,97 \cdot 0,95) \cdot 100 \% = 92,15 \%$ .

Влияние положения оптической детали на сферической приёмной поверхности на воспроизводимость оптической толщины ОВП исследовали как для случая осаждения покрытий на детали, прогреваемые до 300 °С, так и на детали, осаждаемые без предварительного прогрева (рис. 3). Исследования показали, что воспроизводимость оптической толщины уменьшается при переходе к «нагревной» технологии нанесения ОВП. Воспроизводимость в одном процессе при нанесении ОВП на детали, нагреваемые до 300 °С, составляет 84 %, а при нанесении на непрогреваемые детали – 99 %. При этом при формировании ОВП на ненагретых оптических деталях воспроизводимость уменьшается от центра к периферии приемной поверхности (рис. 3, а). Для осаждения оптических покрытий на предварительно прогреваемые детали,

наоборот, уменьшение наблюдается от периферии к оси (рис. 3, б). Последний эффект, по всей вероятности, связан с неравномерностью нагрева приемной сферической поверхности (см. рис. 2) и возникновением эффекта реиспарения, вызываемого перегревом деталей в позициях 0, 1 и 2 (см. рис. 1).

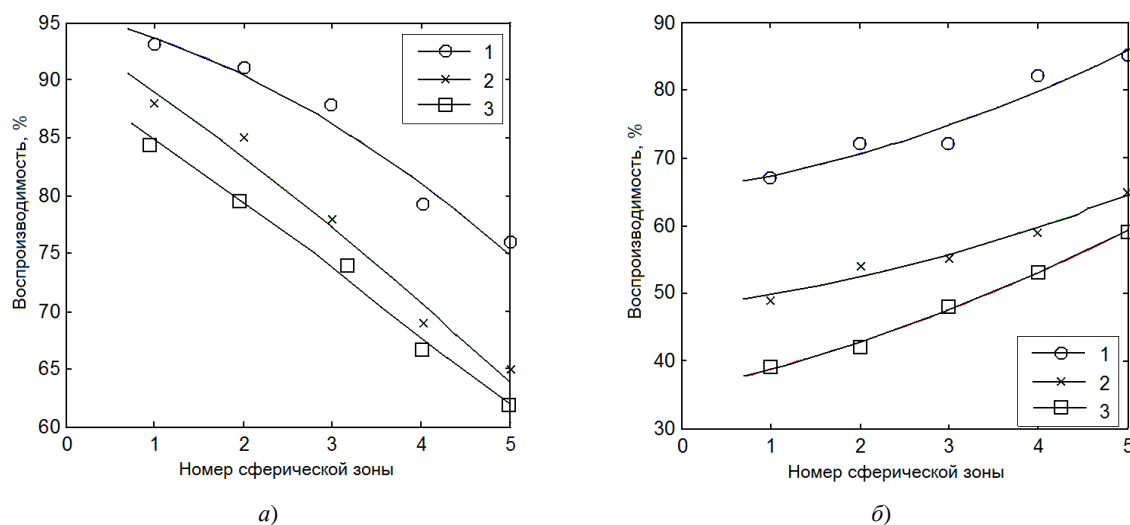


Рис. 3. Зависимость воспроизводимости от положения оптической детали на сферической приемной поверхности при нанесении покрытий на непрогреваемые (а) и предварительно прогреваемые (б) детали:  
1 – 1,5 %; 2 – 2 %; 3 – 3 %

**Закключение.** Воспроизводимость оптической толщины ОВП уменьшается при использовании предварительного нагрева оптических деталей до 300 °С и составляет 84 %. Наименьшая воспроизводимость в этом случае наблюдается на деталях, расположенных наиболее близко к оси сферической приемной поверхности, что, по всей видимости, связано с неравномерностью нагрева этой поверхности. При нанесении ОВП на непрогреваемые оптические детали воспроизводимость по оптической толщине составляет 99 %. С ростом радиуса кривизны приемной поверхности неравномерность её прогрева уменьшается, однако растет неравномерность толщины осаждаемых ОВП.

Предложено для более точной количественной оценки воспроизводимости оптической толщины ОВП, кроме величины относительного стандартного отклонения, экспериментально определять величину доверительной вероятности. Предложен подход к расчету процента выхода годных деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений: ГОСТ Р ИСО 5725-1. – Минск, 2002. – Ч. 1: Основные правила и определения.
2. Томаль, В.С. Воспроизводимость свойств оптических вакуумных покрытий. Материалы. Технологии. Инструменты / В.С. Томаль, Н.К. Касинский, И.В. Иванов. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 75 – 77.
3. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов [и др.]; под ред. М.А. Окатова. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
4. Письменный, Д.Т. Конспект лекций по теории вероятности, математической статистике и случайным процессам / Д.Т. Письменный. – М.: Айрис-Пресс, 2008. – 320 с.

Поступила 04.06.2013

#### METHOD OF CALCULATING THE REPRODUCIBILITY OF OPTICAL VACUUM COATING THICKNESS

A. DOSTANKO, V. TOMAL, N. KASINSKI, I. IVANOV

*Methodology of calculation of reproducibility of optical vacuum coating thickness is presented. The influence of heating of the optical parts on the reproducibility of the optical thickness of the multilayer narrow-band filters of second order on the basis of oxide  $ZrO_2$  and  $SiO_2$ , received on vacuum systems models BY-800, BY-2M and BY-1A is studied. For better quantitative estimation of the reproducibility of the optical thickness of the vacuum coating, apart from the relative standard deviation it is proposed to experimentally determine the value of confidential probability.*