

УДК 535.32: 621.378

А. В. Хомченко, д-р физ.-мат. наук, Е. В. Глазунов, Л. В. Жолобова

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ ВОЛНОВОДНЫХ МОД

Представлены результаты измерений параметров тонкопленочных покрытий методом пространственной Фурье-спектроскопии волноводных мод. Рассмотренный подход, основанный на измерении углового спектра интенсивности отраженного светового пучка при призмном возбуждении волноводной моды в тонкопленочной структуре, позволяет контролировать параметры тонкопленочных структур с малыми оптическими потерями.

Введение

Активное использование тонкопленочных структур в оптике и электронике стимулирует исследования по совершенствованию существующих и разработке новых методов контроля и измерения параметров тонких пленок. Соответствующие методы, основанные на измерении постоянных распространения h волноводных мод, возбуждаемых в исследуемой пленке с помощью призмного устройства связи, были предложены в [1–3]. Методы определения коэффициента поглощения наряду с другими характеристиками пленки рассмотрены в [4–6]. В настоящей работе обсуждаются возможности и особенности измерения параметров поглощающих тонких пленок на основе регистрации угловой зависимости коэффициента отражения светового пучка в схеме призмного возбуждения волноводных мод.

Волноводный метод измерения параметров тонких пленок

Известные волноводные методы исследования тонких пленок, и в частности метод спектроскопии волноводных мод, основаны на регистрации углового положения темной m -линии, соответствующей возбуждению определенной волноводной моды. В то же время в экспериментах было замечено, что каждая такая линия имеет характерное распределение интенсивности, параметры которого связаны со свойствами пленки. Такое распределение мож-

но зарегистрировать при использовании в соответствующей схеме матричного фотоприемника. Приемник расположен в фокальной плоскости объектива, через который проходит отраженный от призмного устройства связи световой пучок и регистрирует спектр интенсивности последнего, который пропорционален квадрату модуля пространственного фурье-спектра пучка. Физическая сущность такого подхода заключается в следующем. При возбуждении волноводной моды часть светового пучка туннелирует в пленку, распространяется вдоль нее, излучается в призму, и в фокальной плоскости объектива мы регистрируем картину интерференции переизлученного из пленки и отраженного от основания призмы пучков. Анализ такой картины и был использован при определении параметров пленки. В данном случае длина взаимодействия определяется не размером пучка на основании призмы, а длиной трека волноводной моды (например, при потерях $\sim 10 \text{ см}^{-1}$ эта длина $\sim 1 \text{ см}$), что и определяет высокую чувствительность метода. Здесь следует подчеркнуть, что сочетание в таком подходе преимуществ резонансных и интерференционных методов обеспечивает его высокую точность и чувствительность. В качестве источника излучения использован одномодовый He-Ne – лазер с длиной волны излучения 632,8 нм. Измерение одномерного распределения интенсивности отраженного светового пучка, несущего информацию о параметрах

пленки, осуществляется с помощью линейки фотоприемников 12, ось вращения

которой сопряжена с осью поворотного столика 6 гониометра (рис. 1).

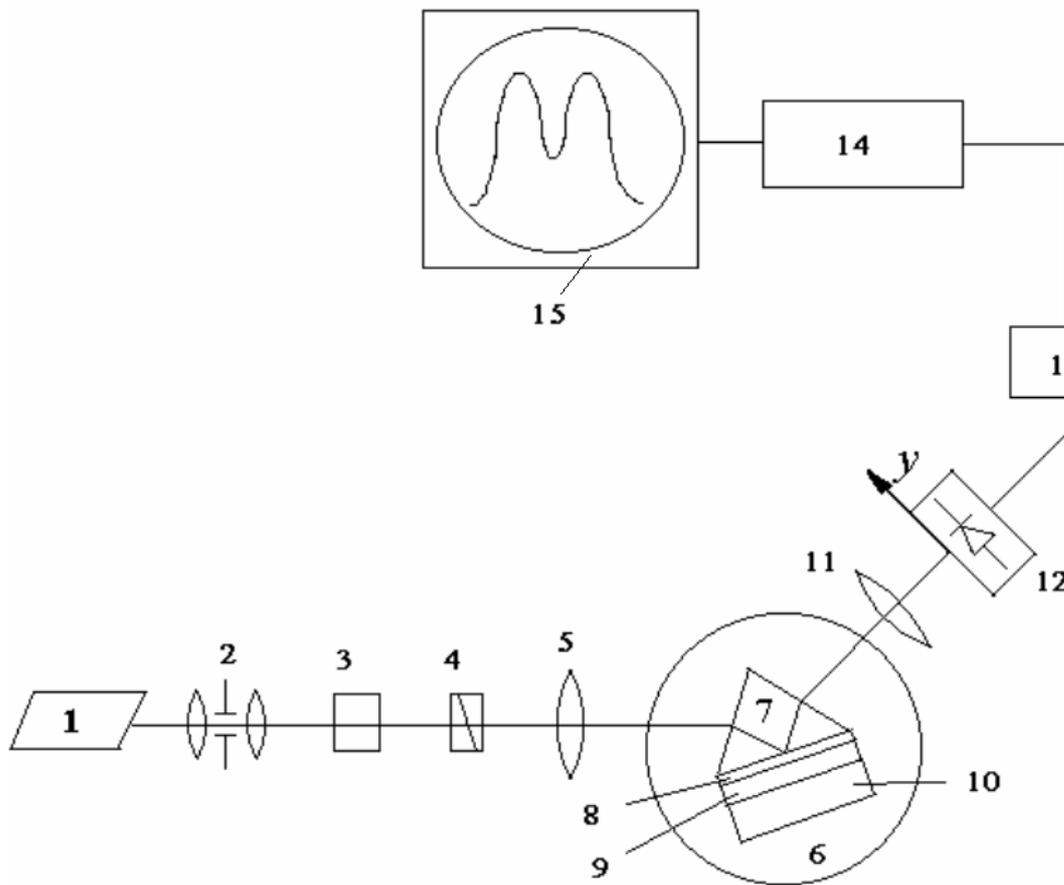


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 – источник излучения; 2 – коллиматор; 3 – аттенуатор; 4 – поляризатор; 5 – фокусирующий элемент; 6 – поворотный столик; 7 – измерительная призма; 8 – зазор; 9 – волноводная пленка; 10 – подложка; 11 – объектив; 12 – линейка фотоприемников; 13 – блок измерения интенсивности; 14 – аналогово-цифровой преобразователь; 15 – компьютер

Угол φ отсчитывается от нормали к выходной грани призмного устройства связи. В приведенной схеме используется фотодиодная линейка, связанная с аналогово-цифровым преобразователем. Приборная погрешность измерения угла возбуждения моды составляет $2 \cdot 10^{-5}$ рад, интенсивности светового потока – 0,1 %. После цифровой обработки сигнал поступает в оперативную память компьютера. Здесь следует отметить, что взаимное расположение измерительной призмы 3, линз 5 и 11 выбираются из следующих условий. Задний фокальный отрезок линзы 5 должен быть не меньше расстояния от главной плоскости линзы 5 до точки ввода излу-

чения в волновод, а передний фокальный отрезок линзы 11 должен быть заведомо больше расстояния от выходной грани призмы до главной плоскости линзы 11.

Типичный фурье-спектр волноводной моды (в направлении, перпендикулярном наблюдаемой m -линии) представлен на рис. 2.

Измерив I_{\min} , $\Delta\varphi$ и φ_{\min} (см. рис. 2) и используя подход, предложенный в [6], можно определить значения действительной h' и мнимой h'' частей постоянной распространения h волноводной моды исследуемой тонкопленочной структуры:

$$h' = n_p k_0 \sin \left[\theta_p - \arcsin \left(\frac{n_a}{n_p} \sin \varphi_{\min} \right) \right] - \frac{\delta^2 - 1}{\delta^2 + 1} |\Delta h|; \quad (1)$$

$$h'' = P \frac{1 + \delta^2}{8\delta} |\Delta h|, \quad (2)$$

где

$$|\Delta h| = \frac{La}{2\sqrt{A}}; \quad (3)$$

k_0 – волновое число вакуума; величина $|\Delta h|$ описывает влияние призматического устрояства связи на постоянную распространения волноводных мод $\Delta h = \bar{h} - h$ (\bar{h} – постоянная распространения моды в присутствии призмы, h – без нее).

$$L = \cos \varphi_{\min} \left(\cos \theta_p + \frac{\sin \theta_p \sin \varphi_{\min}}{\sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi_{\min}}} \right);$$

$$A = y \left\{ \frac{P}{2} (1 + y_1) - B^2 + \sqrt{\left[\frac{P}{2} (1 + y_1) \right] - BP y_1} \right\};$$

$$B = \left(S + \frac{P}{4S} \right)^2; \quad S = \frac{2\delta}{1 + \delta^2};$$

$$P = 4S \frac{h''}{\Delta h}; \quad \delta = (n_p^2 n_g^2)^T \sqrt{\frac{h'^2 - n_a^2}{n_p^2 - h'^2}};$$

$$y_1 = (a / \Delta \varphi)^2,$$

где a – угловой размер пучка (радиус); значение $T = 0$ и $T = 1$ для ТЕ- и ТМ-волн соответственно.

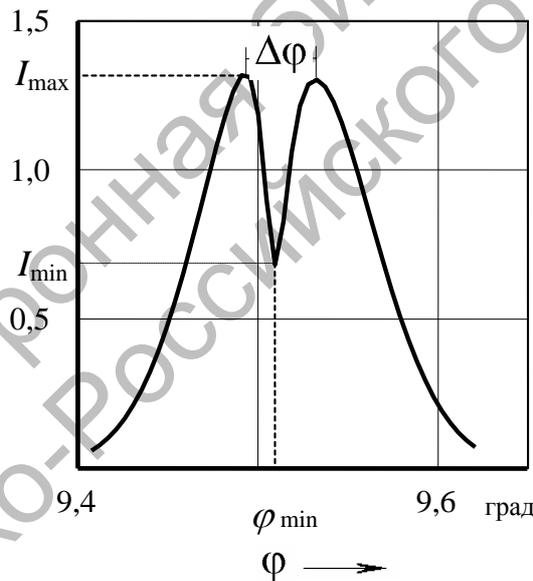


Рис. 2. Распределение интенсивности в сечении отраженного светового пучка при возбуждении волноводной моды

Параметры A , B и P находят с учетом выражений:

$$I_{\max} = I_o \exp \left(-\frac{1}{y_1} \right) \left(1 - \frac{P}{A/4y_1 + B} \right);$$

$$I_{\min} = I_o \left(1 - \frac{P}{B^2} \right),$$

а параметры $\Delta \varphi$, I_{\max} , I_{\min} , φ_{\min} см. на рис. 2.

Таким образом, измерив параметры

зарегистрированного углового фурье-спектра моды, можно найти значения действительной и мнимой частей постоянной распространения моды для тонкопленочной. Использование значений комплексного h для любых двух мод в рассматриваемом подходе позволяет определить показатель преломления n , коэффициент поглощения материала k и толщину пленки d .

Контроль параметров тонких пленок

Результаты измерений параметров тонких пленок, полученных высокочастотным распылением оксида алюминия (стро-

ка 1) и кварцевого стекла (строка 2) на подложки из стекла КВ в атмосфере аргона и кислорода (20 %) при давлении 0,1 Па, а также эффузионных волноводов в стекле ЛК6 (строка 3), приведены в табл. 1. Волноводы имеют оптические потери от 5 до 12 дБ/см в зависимости от их метода изготовления. Так как описанный подход позволяет измерить постоянные распространения мод для волноводов с произвольным профилем показателя преломления, поэтому в таблице приведены данные для неоднородного приповерхностного слоя.

Табл. 1. Экспериментально измеряемые параметры распределения интенсивности при определении постоянных распространения волноводных мод

φ_{\min} , град	I_{\max} , отн. ед.	I_{\min} , отн. ед.	$\Delta\varphi$, град
7,3031	1500	320	$7,884 \cdot 10^{-3}$
6,8381	2875	1090	$6,631 \cdot 10^{-3}$
5,1672	2960	1315	$6,140 \cdot 10^{-3}$

Используя описанную установку, были измерены фурье-спектры волноводных мод (см. рис. 2). При этом очевидно, что вначале определяется положение нормали к выходной грани измерительной призмы и, используя методы автоколлимации светового пучка, обеспечивается нормальное положение граней призмы и рабочей поверхности матричного фотоприемника к оси падающего пучка. Так как в ходе измерений пространственного распределения интенсивности отраженного излучения в эксперименте регистрируется зашумленный сигнал, то обработка полученных фурье-спектров мод предполагает использование математических методов оптимизации. При нахождении параметров экстремумов функции $I(\varphi)$, определяемой экспериментально в дискретных точках φ_j ($j = 1, 2, \dots, l$), был использован подход, основанный на интерполяции этой функции, осуществляемой с применением нормального регрессивного

анализа. При этом функция $I(\varphi)$ задается в виде [6]

$$I(\varphi) = \sum_{i=0}^s c_i Q_i(\varphi); \quad c_i = \sum_{j=1}^l I_j Q_i(\varphi_j),$$

где $Q_i(\varphi)$ – ортонормированные на системе узлов φ_j полиномы; I_j – экспериментальные данные для величин $I(\varphi_j)$; число s определяется по критерию Фишера [7].

В результате таких вычислений средняя статистическая погрешность определения координаты минимума уменьшается в $l^{1/2}$ раз и составляет при измерении оптимального угла возбуждения моды 0,5 угловой секунды. Обработка полученных спектров с применением методов математической оптимизации позволяет найти уточненные значения экстремальных точек зарегистрированного распределения (см. табл. 1).

Действительная h' и мнимая h'' части постоянной распространения волноводных мод, значения которых приведены в табл. 2, получены на основании обработки результатов таких измерений. При определении h , в отличие от обычных волноводных

методов измерения, учитывается как угловое положение резонансного минимума в зарегистрированном распределении интенсивности, так и угловая ширина резонансного «минимума» $\Delta\varphi$, а также контраст наблюдаемой картины.

Табл. 2. Параметры волноводных мод, определенные по результатам измерений, приведенных в табл. 1

$k_0^{-1}h'$	p , дБ/см	$(k_0^{-1}h')^*$	p^* , дБ/см
1,45816	12,3	1,45815	12,2
1,46254	9,4	1,46253	8,8
1,47828	1,8	1,47828	2,0

Примечание – *При измерении h' результаты получены с использованием методики, описанной в [2], для p^* – методом фотометрирования трека

При контроле параметров тонких пленок известными волноводными методами результат измерений зависит от величины зазора или толщины буферного слоя между пленкой и основанием призмы (т. е. от степени их связи). Толщина такого слоя определяется механическим давлением, оказываемым на тонкопленочную структуру при ее прижиге к основанию призмного устройства связи с целью приведения в оптический контакт с призмой.

Несмотря на то, что это давление в ходе измерений обычно стремятся поддерживать постоянным, все же на протяжении серии измерений не удается сохранить одинаковую толщину буферного слоя. Это связано как с различным качеством поверхности тонкопленочных структур, так и с чистотой ее подготовки к измерениям. Для того чтобы избежать влияния призмного устройства связи на результат измерений, предлагались различные приемы [8]. Эту проблему удалось решить в используемом подходе (см. выражения (1) и (2)), где результат измерений устойчив к изменению условий эксперимента, хотя регистрируемое распределение может изменяться. Учет влияния призмного устройства связи обеспечивает повышение точности определения параметров волноводных мод.

При этом систематическая погрешность измерения, обусловленная приближениями теоретической модели, для показателя преломления составляет $2 \cdot 10^{-6}$, оптических потерь $\delta p / p$ и толщины $\delta d / d \sim 3\%$.

Воспроизводимость результатов, получаемых данным методом, можно проиллюстрировать в ходе выполнения серии повторных измерений параметров описанного выше тонкопленочного волновода, проводимых последовательно после полной переналадки измерительной установки. Результаты представлены в табл. 3, где приведены значения для отдельного измерения $h''k_0^{-1}$ и среднее значение для всей серии $\langle h''k_0^{-1} \rangle$.

Потери в волноводе, измеренные независимым способом, составляют 8,8 дБ/см или в пересчете на $h''k_0^{-1} = (10,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$. Следует отметить, что приведенные данные могут служить и в качестве экспериментальной оценки систематической ошибки измерений. В соответствии с нормативными рекомендациями на практике ее оценивают как случайную погрешность на множестве приборов данного типа или при повторных измерениях, сопровождаемых полной переналадкой отдельного прибора.

Табл. 3. Воспроизводимость измерений параметров волноводной моды

$h''k_0^{-1}$	$\langle h''k_0^{-1} \rangle$	$k_0^{-1}h'$	$\langle k_0^{-1}h' \rangle$
9,92·10 ⁻⁶	(10,0 ± 0,25)·10 ⁻⁶	1,472542	1,472544 ± 6 · 10 ⁻⁶
10,03·10 ⁻⁶		1,472546	
10,20·10 ⁻⁶		1,472543	
10,09·10 ⁻⁶		1,472547	
9,97·10 ⁻⁶		1,472542	
9,81·10 ⁻⁶		1,472547	
10,10·10 ⁻⁶		1,472542	

Подтверждение корректности получаемых результатов можно получить, измеряя параметры пленок с использованием известных и апробированных методов. Определение оптических потерь можно выполнить методом сканирования волокна вдоль волновода [9] (погрешность измерений 0,3 дБ/см). Толщина пленок контролировалась такими методами, как многолучевая интерферометрия (для интерферометра МИ-11 погрешность составляет 0,01 мкм) или методом нагруженной индикаторной иглы (с точностью 0,02 мкм). Результаты измерений для ТЕ-мод волновода, полученного высокочастотным распылением

кварцевого стекла на подложку из него в атмосфере аргона и кислорода (5:1), приведены в табл. 4. Значения h'/k_0 измерены методом Фурье-спектроскопии и h'/k_0^* по методике, описанной в [2]. В этом случае h' определена с точностью $2 \cdot 10^{-5}$, что обусловлено погрешностью определения φ_{\min} на гониометре ГС-5, а погрешность измерения потерь составляет 0,2 дБ/см. Как видим, измеренные значения параметров волновода, полученные различными методами, удовлетворительно согласуются между собой (см. табл. 4).

Табл. 4. Параметры волноводной структуры SiO_x – SiO₂ ($n_s = 1,4571$; $n_c = 1,00033$)

Номер моды	h'/k_0	P , дБ/см	h'/k_0^*	P^* , дБ/см	d , мкм	n	k
0	1,46755	8,5	1,46749	8,4	2,49; 2,50*	1,47105	1,1·10 ⁻⁵
1	1,45814	5,6	1,45809	5,4			
Примечание – *Результаты получены другими методами							

Измерение малого поглощения в тонких пленках

Задача измерения параметров тонких пленок усложняется при исследовании свойств тонкопленочных структур с малым поглощением. В этом случае возникает проблема «утечки» энергии из под призмного устройства связи. Так как в рассматриваемой конфигурации (см. рис. 1) измеряется полное ослабление света при его распространении вдоль пленки, то при малой величине оптических потерь излучение выходит за преде-

лы измерительной призмы и тем самым «завышает» величину измеряемого коэффициента поглощения. Задачу определения малых потерь можно решить, предотвратив «утечку» энергии световой волны за пределы призмного устройства связи. Для этого необходимо сделать величину зазора между призмой и пленкой по возможности меньшей, тем самым увеличить эффективность перекачки энергии световой волны из пленки в призму. На рис. 3 приведены значения оптических по-

терь, измеренных в ходе последовательного увеличения прижима призматического устройства к тестируемой структуре (кривая 1). Представленные результаты свидетельствуют о том, что при определенной величине прижима (толщина бу-

ферного слоя становится меньшим некоторого d_0) величина измеренных потерь стабилизируется. На рисунке меньшему значению толщины буферного слоя соответствует больший порядковый номер измерений N .

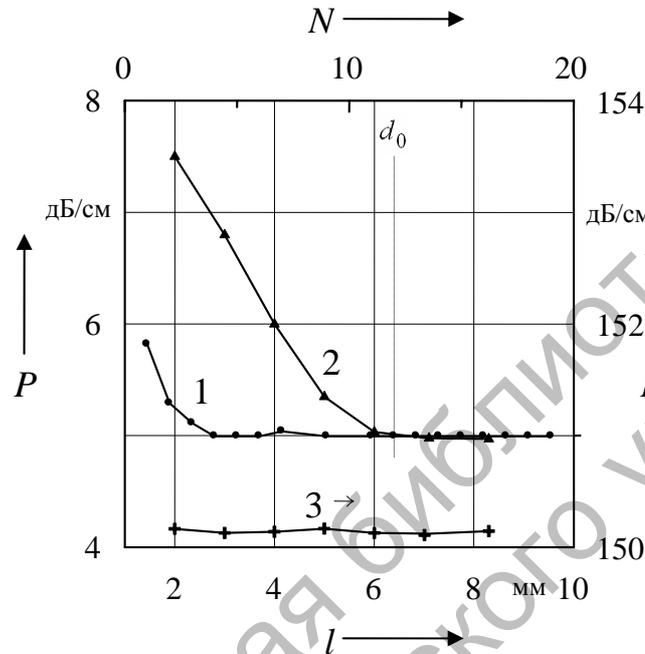


Рис. 3. Измеренные значения оптических потерь, полученные при различной степени связи (1), и при различном положении точки ввода по отношению к краю призматического устройства связи (2) и (3)

Аналогичная картина наблюдается при сканировании точки ввода светового пучка по основанию призмы (рис. 3, кривая 2). При более высоких значениях таких проблем обычно не возникает (рис. 3, кривая 3). На практике это несложно осуществить, однако при этом возникают проблемы с применимостью изложенного подхода, реализуемого в приближении условия слабой связи призмы с волноводом. Кроме того, затруднительно сохранить параллельность зазора между основанием призматического устройства связи и поверхностью тестируемого образца вследствие как шероховатости их поверхностей, так и деформации подложки при большом механическом давлении.

Все эти причины приводят к воз-

никновению дополнительной погрешности при определении оптического поглощения менее $4 \cdot 10^{-6}$, достигающей 30 %. Результаты измерений параметров мод тонкопленочного волновода, изготовленного высокочастотным распылением кварцевого стекла, полученные известными интегрально-оптическими методами измерения [2, 8] и методом пространственной Фурье-спектроскопии волноводных мод, представлены в табл. 5.

Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что при определении поглощения $k < 10^{-5}$ необходимо выполнение определенных условий проведения измерений для получения достоверных результатов.

Табл. 5. Параметры мод тонкопленочного волновода

$h'k_0^{-1*}$	$h'k_0^{-1}$	$h''k_0^{-1*}$	$h''k_0^{-1}$
1,53853	1,53858	$6 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$
1,53358	1,53359	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-6}$
1,52862	1,52863	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$
Примечание – * Результаты получены методами [2, 8]			

Заключение

Таким образом, рассмотренный подход, основанный на измерении пространственного спектра интенсивности отраженного светового пучка при призмном возбуждении волноводной моды в тонкопленочной структуре, позволяет контролировать параметры тонкопленочных структур с малыми оптическими потерями. Однако при исследовании свойств тонкопленочных структур с малым поглощением необходимо выполнение определенных условий проведения измерений для получения достоверных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tien, P. R.** Modes of propagating light waves in thin deposited semiconductor films / P. R. Tien, R. Ulrich, R. J. Martin // Appl. Phys. Lett. – 1969. – Vol. 14, № 9. – P. 291.
2. **Ulrich, R.** Measurement of thin film parameters with a prism coupler / R. Ulrich, R. Torge // Appl. Opt. – 1973. – Vol. 12, № 12. – P. 2901.
3. **Hou, T. W.** Plasma silicon oxide films on garnet substrates: measurement of their thickness and

refractive index by the prism coupling technique / T. W. Hou, C. J. Mogab // Appl. Opt. – 1981. – Vol. 20, № 18. – P. 3184.

4. **Хомченко, А. В.** Определение оптических параметров тонких пленок в схеме призмного возбуждения мод / А. В. Хомченко, А. Б. Сотский, А. А. Романенко // Письма в ЖТФ. – 2002. – Т. 28, вып. 11. – С. 51.

5. **Monneret, S.** m-lines technique: prism coupling measurement and discussion of accuracy for homogeneous waveguides / S. Monneret, P. Huguet-Chant, F. Flory // J. Opt. A : Pure Appl. Opt. – 2000. – Vol. 2. – P. 188–195.

6. Анализ распределения интенсивности отраженного пучка в схеме призмного возбуждения диэлектрических волноводов / А. Б. Сотский [и др.] // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 6. – С. 687.

7. **Худсон, Д.** Статистика для физиков / Д. Худсон. – М.: Мир, 1970. – 296 с.

8. **Агеев, А. Н.** К вопросу об измерении параметров тонких пленок методом призмного ввода света / А. Н. Агеев, Е. В. Мокрушина, А. С. Трифонов // ЖТФ. – 1982. – Т. 32, № 10. – С. 2044.

9. Simple technique for measuring attenuation of integrated optic waveguides / N. Nourshargh [etc.] // Electr. Letter. – 1985. – Vol. 21, № 18. – P. 818.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 17.01.2008

A. V. Khomchenko, E. V. Glazunov, L. V. Zholobova
Testing of thin-film structure parameters by
the method of spatial Fourier spectroscopy
of guided modes

The results of measurements of thin-film parameters by the method of the spatial Fourier spectroscopy of guided modes are presented. This approach is based on recording of the angular spectrum of intensity of the reflected laser beam in the case of excitation of guided modes in thin-film structures with small optical loss.