

Т. Б. АСТАФЬЕВА, Р. М. БЫЧКОВ
(Новосибирск)

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАМЕТРА ВОЛОКОН ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ КАРТИНЕ

Задача разработки аппаратуры для активного контроля диаметра стекловолокна в процессе его вытяжки весьма актуальна. Чаще всего для целей измерения используются интерференционную картину прямого рассеяния света лазера на волокне в области, соответствующей взаимодействию преломленного и отраженного лучей [1]. К сожалению, расстояние между минимумами в этой картине в отличие от дифракционной оказывается неэквидистантным. Исходя из этого диаметр волокна D , как известно, может быть найден двумя способами: либо путем измерения углового положения и размера одного из интерференционных максимумов (например, меньшего по ширине), либо путем измерения углового положения двух максимумов, разность номеров которых N известна [2]. Очевидно, что при создании прецизионной аппаратуры контроля волокон из-за ее шумов желательно анализировать не один, а несколько максимумов, как это имеет место при втором способе измерения. Однако в этом случае резко усложняется процедура вычисления параметра D .

Нами исследовались точностные характеристики модифицированного способа определения диаметра волокон на основании среднего значения ширины максимумов в окрестности их наибольшей эквидистантности. Предложенный способ прост в реализации и аналогичен дифракционному методу нахождения диаметра непрозрачных изделий. Это позволяет для измерения диаметров волокон использовать дифракционные измерители [3].

Как известно, интерференционная картина при рассеянии света на волокне без сердцевинки в случае его нормального падения и поляризации, перпендикулярной оси волокна, в приближении геометрической оптики может быть описана следующим выражением (4):

$$A = 1 + \cos(k\Delta),$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны света; Δ — оптическая разность хода между преломленным и отраженными лучами,

$$\Delta = D[\cos \theta/2 + (1 + m^2 - 2m \cos \theta/2)^{1/2}] + \lambda/2. \quad (1)$$

Здесь m — показатель преломления, θ — угол рассеяния, причем $0 \leq \theta \leq \leq 2 \arccos(1/m)$.

Отметим, что при наличии в волокне сердцевинки появляется низкочастотная модуляция, которая, как показано в [1, 4], вносит незначительные ошибки в определение его внешнего диаметра.

Из (1) следует, что угловая ширина максимума, вычисляемая из условия $\Delta = \lambda$,

$$d\theta = (2\lambda/D)g(\theta, m),$$

где $g(\theta, m)$ — угловой фактор, определяющий неэквидистантность максимумов интерференционной картины:

$$g(\theta, m) = [\cos \theta/2 + (m \sin \theta/2)/(1 + m^2 - 2m \cos \theta/2)^{1/2}]^{-1}. \quad (2)$$

Если теперь в качестве угла $\theta(m)$ выбрать экстремальное направление $\theta_0(m)$, при котором угловой фактор, а следовательно, и ширина максимума имеют минимальное значение $d\theta_{\min}$, то диаметр волокна можно найти по следующей формуле [2]:

$$D = 2\lambda g[\theta_0(m), m]/d\theta_{\min}. \quad (3)$$

Модифицируем этот способ вычисления параметра D путем измерения (в окрестности угла $\theta_0(m)$ ширины не одного ($d\theta_{\min}$), а N максимумов ($\Delta\theta(N)$). Так как экстремальное направление $\theta_0(m)$ зависит от показателя преломления m , то во избежание усложнения аппаратуры измерения параметра D выберем в качестве рабочего угла фиксированный средний угол $\bar{\theta}_0 = \langle \theta_0(m) \rangle$, где усреднение проводится по ожидаемому диапазону изменения m . Тогда формула для вычисления диа-

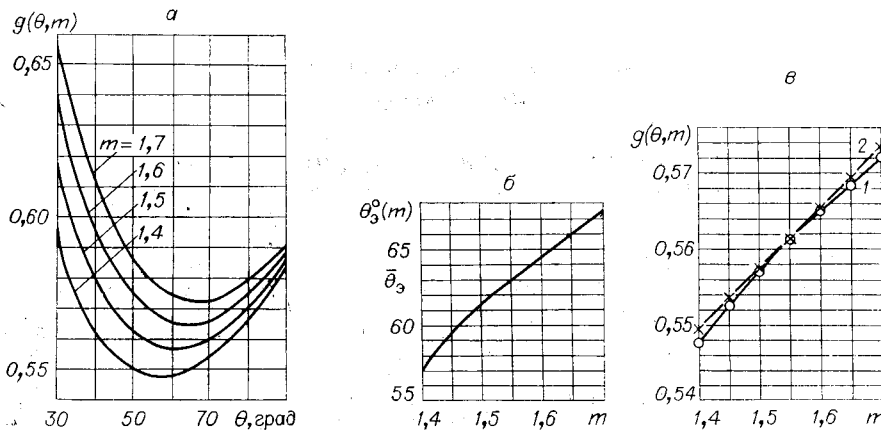


Рис. 1.

метра волокна будет иметь следующий простой вид:

$$D_{N,m} = \frac{2\lambda g(m)}{d\theta(N)} = \frac{K(m)}{\Delta\theta(N)}, \quad (4)$$

где $d\bar{\theta}(N) = \Delta\theta(N)/N$ — средняя угловая ширина максимума, $g(m) = g(\bar{\theta}_0, m)$, а $K(m) = 2Ng(m)\lambda$ — коэффициент пропорциональности, зависящий при $N = \text{const}$ лишь от показателя преломления волокна m .

Оценим далее величину угла $\bar{\theta}_0$ и исходя из нее найдем зависимость функции $g(m)$ от показателя преломления. Эти данные можно получить с помощью графиков семейства параметрических кривых $g(\theta, m)$, приведенных на рис. 1, а. При расчете диапазон изменения m выбран равным 1,4; 1,7, что соответствует показателям преломления материалов, обычно применяемых при изготовлении волокон. Из графиков видно, что в некоторой окрестности каждого из углов $\theta_0(m)$, как и следовало ожидать, существует область наименьшего изменения функции $g(\theta, m)$, т. е. область квазиэквидистантности максимумов интерференционной картины. Соответствующий график функции $\theta_0(m)$ представлен на рис. 1, б. Расчеты показывают, что при изменении показателя преломления m в указанном диапазоне величина $\bar{\theta}_0 = 63^\circ$.

На рис. 1, в показан график функции $g(m)$ (кривая 1), полученный из углового фактора (2) при найденном значении $\bar{\theta}_0$. Здесь же для сравнения указан график функции $g[\theta_0(m), m]$ (кривая 2). Следует отметить, что в диапазоне изменения $m = 1,5 - 1,6$ эти функции практически совпадают. Вне этого диапазона их максимальное отличие не превышает 0,26%.

Существенно, что в силу выбора угла $\bar{\theta}_0$ и методики измерения диаметра волокна (исходя из среднего значения ширины максимума) формула (4) носит приближенный характер. Поэтому исследуем точность предлагаемого способа измерений в зависимости от диаметра волокна D при различных значениях параметров N и m . Будем оценивать ее по величине приведенной погрешности

$$\delta_{N,m}(D) = \left| \frac{D - D_{N,m}}{D} \right|,$$

где D и $D_{N,m}$ — точное и приближенное значения диаметра волокна, определяемые соответственно по формулам (3) и (4).

Расчетные графики поведения методической погрешности $\delta_{N,m}(D)$ в зависимости от диаметра волокна D при изменении m в диапазоне 1,4—1,7 ($\bar{\theta}_0 = 63^\circ$) для числа максимумов $N=5$ (а) и $N=10$ (б) приведены на рис. 2. Можно видеть, что с ростом D погрешность $\delta_{N,m}(D)$ резко уменьшается. Это обусловлено тем, что увеличение D при заданном числе максимумов N ведет к уменьшению регистрируемого углового размера $\Delta\theta(N)$, что в соответствии с графиками, приведенными на рис. 1, а, ослабляет влияние фактора $g(\theta, m)$, определяющего неэквидистантность максимумов. Таким образом, уменьшение ошибки $\delta_{N,m}(D)$ при увеличении D происходит за счет приближения измеряемого значения $d\bar{\theta}(N)$ к экстремальному $d\theta_{\text{min}}$.

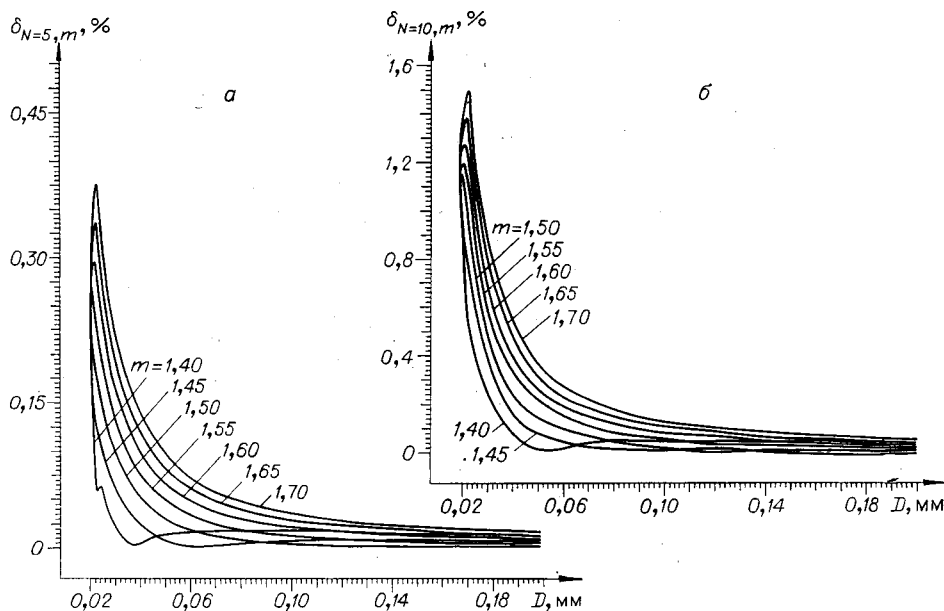


Рис. 2.

Что касается зависимости этой погрешности от числа регистрируемых N , то с ростом этого параметра ошибка $\delta_{N,m}(D)$, как и следовало ожидать, увеличивается. Так, при $N=5$ в диапазоне изменения $D=0,02-0,2$ мм она не превышает 0,4%, а в диапазоне 0,05—0,2 мм — 0,1%. Если же выбрать $N=10$, то погрешность в указанных диапазонах возрастает соответственно до 1,5 и 0,4%. Оптимальное значение N выбирается исходя из минимума общей погрешности измерения, включающей наряду с исследованной методической составляющей и составляющую погрешности, обусловленную шумами аппаратуры.

Полученные зависимости методической погрешности от диаметра волокна D , его показателя преломления m и числа регистрируемых максимумов N могут быть использованы при выборе оптимальных режимов работы дифракционных измерителей.

Авторы выражают благодарность Ю. В. Чугую за его замечания и предложения, которые во многом помогли улучшить настоящее сообщение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kao K. C., Davies T. W. Coherent Light Scattering Measurements on Single and Cladded Optical Fibres.— The Radio and Electronic Engineer, 1970, vol. 39, N 2.
2. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение, 1978, с. 248—277.
3. Бычков Р. М., Короневич В. П., Соловьев Н. Г., Чугуй Ю. В. Измерение параметров резбовых изделий по пространственному спектру.— В кн.: III Всесоюз. конф. по голографии. Ульяновск, 1978. [Тез. докл.]. Л.: изд. ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1978.
4. Watkins L., Smithgall D., Frazee R. High-Speed Noncontact Fiber — Diameter Measurement Using Forward Light Scattering.— Appl. Opt., 1977, vol. 16, N 9.

Поступило в редакцию 24 июня 1980 г.