

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

*С. М. Чернов, К. К. Жилик,  
А. Н. Лукомский и П. И. Ламекин*

В рамках приближения геометрической оптики рассматривается прохождение световых лучей через однородное оптическое волокно. Обсуждается возможность экспериментального определения показателя преломления  $n_0$  по характеру распределения интенсивности рассеянного света. Показано, что в отличие от работ других авторов применяемый метод анализа дает возможность определить  $n_0$  однородного волокна практически с любыми значениями показателя преломления.

В настоящее время оптические волноводы (ОВ) исследуются в связи с проблемой дальней световой связи и возможным их применением в интегральной оптике. Сейчас хорошо развита технология изготовления ОВ с наперед заданными оптическими свойствами. Естественно, что это производство должно быть снабжено прецизионными методами контроля основных параметров волокон. Хотя вопросам физики ОВ, технологии изготовления и их применению посвящен целый ряд монографий и обзоров [1-5], проблемы контроля параметров ОВ обсуждаются лишь в оригинальных статьях последних пяти лет [6-9]. При этом особое внимание уделяется способам определения диаметра волокна  $2a$  и показателя преломления  $n_0$ , так как эти параметры особенно влияют на разрешающую способность и светопропускание волоконнооптических элементов.

Одним из популярных методов определения указанных параметров является оптический метод, когда участок волокна освещается перпендикулярно оси светом от лазера. По картине распределения интенсивности рассеянного света восстанавливаются искомые параметры. Первое конструктивное и достаточно простое решение этой задачи для однородных ОВ было предложено Пресби [6] и учтено в работах других авторов [7-9]. Следует, однако, заметить, что этот метод может применяться только для волокон с  $n_0 \leq 2$ . В настоящее же время ведутся работы по созданию ОВ с повышенными значениями  $n_0$ . Как известно, с ростом показателя преломления ОВ повышается его числовая апертура, что позволяет в свою очередь увеличить долю транслируемого светового потока, попадающего на торец ОВ. Это свойство волокон может быть весьма полезным при стыковке различных передающих элементов с волноводами в оптоэлектронике [10]. Что касается волокон этого типа, то для них вообще не разработан простой способ определения  $n_0$ .

Настоящая работа посвящена анализу параметров однородных ОВ практически с любыми значениями  $n_0$ . Следует отметить, что предлагаемая техника измерения может быть распространена на ОВ с более сложной структурой (ступенчатые и градиентные ОВ, волокна типа Селфок и т. д.).

### Общая теория

Рассмотрим однородное оптическое волокно радиуса  $a$  с показателем преломления  $n_0$ . Пусть перпендикулярно оси ОВ на расстоянии  $x$  от центра

падает луч света,<sup>1</sup> который после многократных отражений от границы волокно—воздух попадает на круглый экран радиуса  $r$  (фоторегистрирующее устройство). Ход лучей в волокне и обозначения представлены на рис. 1. Положение этих лучей внутри волокна и на экране будем характеризовать соответственно углами  $\varphi_k$  и  $\psi_k$ , где  $k$  — индекс луча, равный числу соприкосновений лучей с границей раздела сред.

Очевидно

$$\varphi_k = \alpha + (\pi - 2\beta)(k - 1); \quad (1)$$

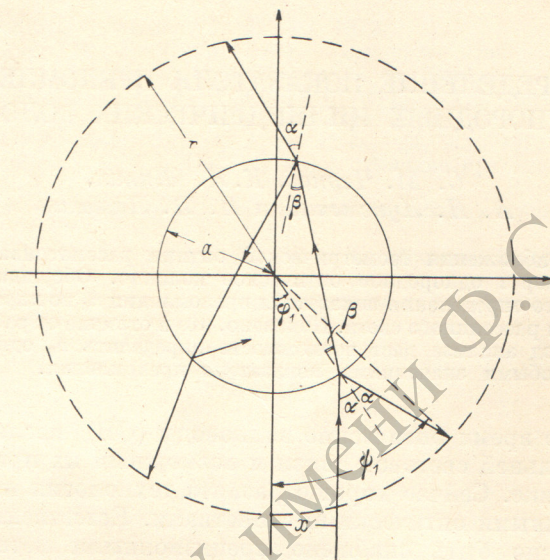


Рис. 1. Положение лучей, испытавших многократные отражения и преломления внутри волокна и попавших на круговую фотокамеру (штриховая окружность).

учитывая, что  $a \ll r$ , имеем

$$\psi_k = \alpha + \varphi_k, \quad (2)$$

$$\alpha = \arcsin x/a, \quad (3)$$

$$\beta = \arcsin x/an_0. \quad (4)$$

Вводя обозначения  $y \equiv x/a$ , можно окончательно для  $\psi_k$  записать

$$\psi_k = \pi(k - 1) + 2[\arcsin y - (k - 1) \arcsin y/n_0]. \quad (5)$$

Графики зависимости  $\psi_k(y)$  для  $n_0 = 1.4$  и  $k \leq 6$  изображены на рис. 2. На графике можно выделить ряд характерных областей. Во-первых, следует отметить наличие предельных положений ряда лучей и, во-вторых, существование точек пересечения лучей с различными индексами  $k$ .

Предельные положения лучей различных порядков

Рассмотрим сначала области, где  $\psi_k$  имеют минимальные значения. В этих точках

$$d\psi_k/dy = 0. \quad (6)$$

Учитывая тогда соотношение (5), для экстремальных значений получаем

$$y_{k0} = \sqrt{\frac{(k-1)^2 - n_0^2}{(k-1)^2 - 1}} \quad (7)$$

<sup>1</sup> Для большинства ОВ анализ, основанный на простой геометрической теории, дает сравнительно хорошее согласие с расчетами методами волновой оптики [9].

и, следовательно,

$$\psi_k^{\min} = \pi(k-1) + 2 \left( \arcsin \sqrt{\frac{(k-1)^2 - n_0^2}{(k-1)^2 - 1}} - (k-1) \arcsin \frac{1}{n_0} \sqrt{\frac{(k-1)^2 - n_0^2}{(k-1)^2 - 1}} \right). \quad (8)$$

Из соотношения (7) видно, что  $\psi_k$  имеют минимумы только в том случае, если

$$k \geq n_0 + 1. \quad (9)$$

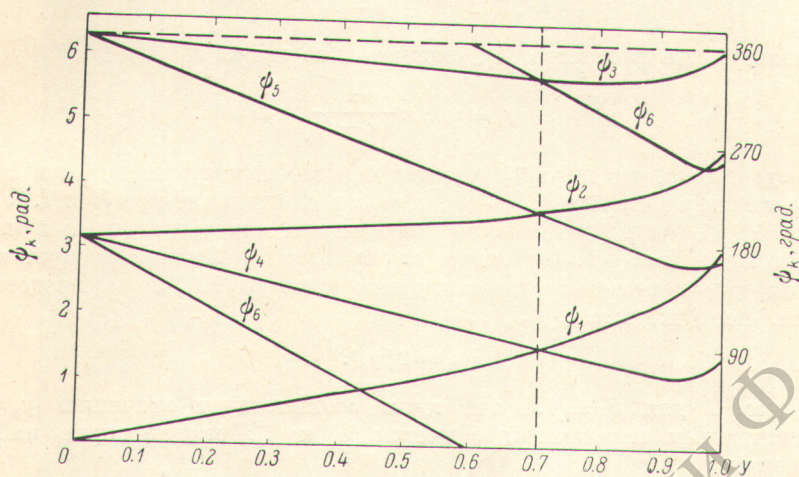


Рис. 2. Графики зависимости  $\psi_k(y)$  для  $n_0=1.4$  и  $k \leq 6$ , полученные теоретически в соответствии с формулой (5).

Следовательно, для  $1 < n_0 \leq 2$  экстремумы наблюдаются для лучей с  $k \geq 3$ . Случай  $k=3$  рассмотрен в работе [6]. Если же  $2 < n_0 \leq 3$ , то это возможно только для лучей с  $k \geq 4$  и метод [6] в этом случае уже не применим. Зависимость  $\psi_k^{\min}$  для  $k=3 \div 6$  как функции  $n_0$  представлены на

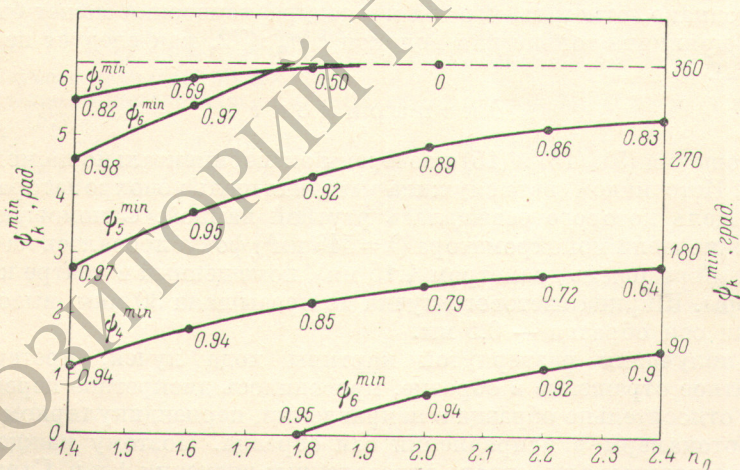


Рис. 3. Графики зависимости  $\psi_k^{\min}$  для  $k=3 \div 6$  как функции  $n_0$ . Цифрами на кривых отмечены соответствующие координаты  $y_{k0}$ .

рис. 3. Следует отметить, что минимальные значения углов  $\psi_k^{\min}$  (8) являются функциями только показателя преломления  $n_0$  и не зависят от радиуса ОБ  $a$ . Таким образом, определяя экспериментально минимальное значение соответствующих  $\psi_k^{\min}$  (или  $y_{k0}$ ), можно найти искомое значение  $n_0$ . Этим способом можно определить показатели преломления ОБ практически с любыми значениями  $n_0$ .

## Пересечение лучей различных порядков

Пусть в некоторых точках  $y_0$  выполняется условие

$$\psi_l = \psi_k + 2\pi. \quad (10)$$

Или, учитывая соотношение (5), можно записать

$$\beta = \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{2}{(k-l)} \right). \quad (11)$$

Используя же равенство (4), окончательно имеем

$$y_0 = n_0 \cos \frac{\pi}{(k-l)}. \quad (12)$$

Отсюда видно, что положение точек пересечения траекторий  $k$  и  $l$  лучей зависит только от разности  $(k-l)$ , а не от самих индексов  $k$  и  $l$ . Учитывая, что  $|y| \leq 1$  и  $n_0 > 1$ , можно утверждать, что пересечение лучей невозможно, если  $k = \pm 1$ . Очевидно, случай  $k = l \pm 2$  также следует исключить, так как пересечение происходит в точке  $y = 0$  и не представляет интереса. Если же  $k = l \pm 3$ , то

$$n_0 = 2|y_0|. \quad (13)$$

На рис. 2 для  $n_0 = 1.4$  эта точка соответствует значению  $y_0 = 0.7$ . Положение точек пересечения с учетом (5) и (12) можно также найти из соотношения

$$\psi_0 = \frac{2(k-1)}{(k-l)} \pi + 2 \arcsin n_0 \cos \frac{\pi}{(k-l)}. \quad (14)$$

Отсюда

$$n_0 = \sin \left[ \frac{\psi_0}{2} - \pi \frac{(k-1)}{(k-l)} \right] \cos \frac{\pi}{(k-l)}. \quad (15)$$

Определяя экспериментально значение  $y_0$  или  $\psi_0$ , можно по формулам (13) и (15) соответственно восстановить показатель преломления  $n_0$ . Следует, однако, отметить, что эта процедура измерения может быть применена в принципе только для волокон с  $n_0 \leq 2$ , как следует из соотношения (12).

### Э к с п е р и м е н т

Соотношения (5), (13) и (15) проверены экспериментально на модельных образцах. Источником света служила выходная щель монохроматора ЗМР-3, входная щель которого освещалась ртутной лампой. С помощью линзы изображение щели монохроматора ( $\lambda = 546 \text{ нм}^2$ ) фокусировалось на образец (стеклянный стержень диаметром 4.15 мм), помещенный в центре круговой фотокамеры. Ширина светового пучка не превышала 30 мкм, высота в направлении оси образца — 0.5 мм.

Для получения развернутой картины хода лучей, претерпевших многократное отражение в образце, проводилось дискретное перемещение как луча относительно образца в направлении, перпендикулярном его оси, так и фотокамеры в направлении оси образца. Поэтому каждой точке пленки соответствовали строго определенные значения  $\psi$  и  $y$ . Съемка производилась на пленку ФОТО-250, время экспозиции после каждого шага перемещения 90 с.

На рис. 4 приведен участок пленки, на котором зафиксировано перемещение второго луча ( $\psi_2$ ) и место его пересечения с пятым лучом ( $\psi_5$ ), обнаруживаемое по характерным интерференционным полосам. Измерения показали, что месту пересечения соответствует  $y_0 = 0.76$ , что по (13) дает для  $n_0$  значение 1.52. Такие же значения  $n_0$  получены при обработке точек

<sup>2</sup> Изменяя длину волны, можно определить дисперсию материала.

пленки, соответствующих  $\psi_3^{\min}$  и  $\psi_4^{\min}$ .<sup>3</sup> Однако эти результаты не приводятся, так как определение  $\psi_3^{\min}$  обсуждалось в работе [6].

Авторы выражают благодарность В. И. Лебедеву за полезное обсуждение настоящей работы.

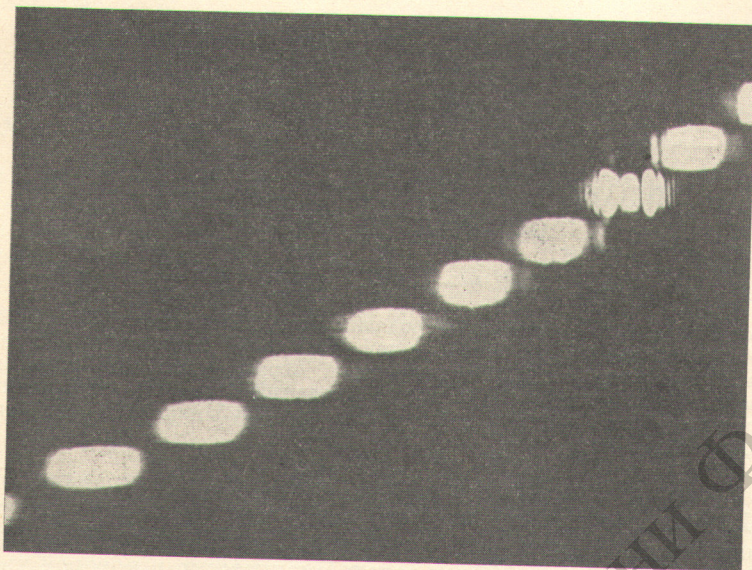


Рис. 4. След второго луча ( $\psi_2$ ) на фотопленке и его пересечение с пятым лучом ( $\psi_5$ ). Фотография получена при шаговом сканировании. В месте пересечения лучей наблюдается интерференционная картина.

#### Литература

- [1] Н. С. Капани. Волоконная оптика. «Мир», М., 1969.
- [2] Л. М. Кучикян. Световоды. «Энергия», М., 1973.
- [3] Д. Маркузе. Оптические волноводы. «Мир», М., 1974.
- [4] А. М. Гончаренко, В. П. Редько. Введение в интегральную оптику. «Наука и техника», Минск, 1975.
- [5] Введение в интегральную оптику. Сб. статей под ред. М. Барноски. «Мир», М., 1977.
- [6] H. M. Rresby. J. Opt. Soc. Am., 64, 280, 1974.
- [7] D. Markuse. Appl. Opt., 14, 1528, 1975.
- [8] J. W. Lit. J. Opt. Soc. Am., 65, 1311, 1975.
- [9] J. Holoubek, Appl. Opt., 15, 2751, 1976.
- [10] K. Takahi, O. Shigeru. Appl. Opt., 16, 1033, 1977.

Поступило в Редакцию 6 марта 1978 г.  
В окончательной редакции 16 ноября 1979 г.

<sup>3</sup> С ростом числа отражений интенсивность вышедших из волокна лучей, естественно, уменьшается. Поэтому число регистрируемых лучей зависит от интенсивности падающего луча и чувствительности фоторегистрирующего устройства.