

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 535.36

А.А. Манько

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Введение

В настоящее время волоконно-оптическая связь является наиболее быстро развивающейся областью телекоммуникаций. Оптическое волокно, основа волоконно-оптической связи, способно обеспечить информационно-пропускную способность, превышающую десятки терабайт в секунду. Волокно представляет собой направляющую систему для современных транспортных сетей и сетей доступа, и для удовлетворения потребностей в нем объемы производства постоянно растут. Процесс изготовления волоконного световода является сложным технологическим процессом, требующим применения высокоточного оборудования. Кроме того, для изготовления волоконных световодов обычно выполняется ряд технологических операций, требующих постоянного контроля параметров для обеспечения их стабильности и повторяемости [1]. Стандартная последовательность технологического процесса производства одномодовых оптических волокон состоит из следующих этапов: изготовление заготовки сердцевин оптического волокна, наращивание оболочки, вытяжка заготовки в волокно [2].

Основным конструктивным элементом оптического волокна является его сердцевина. Параметры заготовки сердцевин определяют качество и эксплуатационные характеристики волокна [2]. При этом показатели преломления сердцевин волоконного световода определяются показателями преломления его заготовки. Высокий уровень стабильности показателя преломления в процессе производства оптического волокна определяется высокими требованиями к уровню потерь на стыках оптических волокон, которые в свою очередь определяются разницей числовых апертур и показателей преломления сердцевин соединяемых волокон.

Таким образом, для обеспечения заданных параметров оптического волокна в ходе технологического процесса необходимо установить значение показателя преломления заготовки сердцевин.

Определение показателя преломления сердцевин оптического волокна с использованием принципов явления рассеяния

Для измерения показателя преломления или рефрактометрии, в основном, применяются методы прямого измерения углов преломления света при прохождении им границы раздела двух сред; методы, основанные на явлении полного внутреннего отражения; а также интерференционные методы [3].

© А.А. МАНЬКО, 2017

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2017, № 5*

Для измерения по углу преломления образцу из исследуемого материала придают форму призмы с некоторым преломляющим углом α . При использовании для измерения показателя преломления явления полного внутреннего отражения образец измеряемого материала приводится в оптический контакт с эталонной призмой из материала с высоким и заранее известным показателем преломления. В интерференционных методах применяются две кюветы одинаковой длины, заполненные веществами с различными показателями преломления. Эти методы применяются, как правило, при измерениях показателя преломления газов и разбавленных растворов.

Измерения по первому методу требуют потерь заготовки в массе и затрат на проведение обработки материала. Измерения по второму методу также требуют потерь заготовки в массе и затрат на проведение обработки материала. Третий метод практически неприменим в технологическом процессе ввиду необходимости проведения измерений параметров твердотельной заготовки.

Кроме того, существующие рефрактометры позволяют определять значение показателя преломления в сравнительно небольшом диапазоне величин — от 1,4 до 2,1 (для простых конструкций) и от 1,2 до 2,8 (при наличии ряда сменных блоков) [4]. В то же время создаются новые виды синтетических материалов (в том числе фотонные кристаллы), показатели преломления которых могут выходить за пределы измерения существующих приборов.

Таким образом, для обеспечения на ранних этапах контроля технологического процесса производства оптического волокна необходимо применение метода измерения его оптических параметров с учетом приведенных выше замечаний.

С этой целью в работе предложен метод, основанный на явлении рассеяния света [3]. При разработке метода использовались принципы квантовой электродинамики, в соответствии с которыми световой поток, направляемый на исследуемый объект, представляет собой набор дискретных образований — световых квантов. Значение коэффициента отражения света на границе раздела двух оптических сред при этом представляет собой вероятность отражения кванта от границы раздела [5]. Индикатриса рассеяния, полученная в результате процесса рассеяния для объекта с конкретной геометрией и значением показателя преломления, однозначно определяет показатель преломления исследуемого объекта.

В работе в качестве такого объекта рассматривается оптический цилиндрический элемент, который моделирует заготовку сердцевин оптического волокна, обладающую цилиндрической формой. Как правило, для заготовок сердцевин оптических волокон выполняется соотношение $D \gg \lambda$, где D — диаметр заготовки, а λ — длина световой волны. Дифракционные явления в этом случае не учитываются, и моделирование рассеяния света проводится в соответствии с законами геометрической оптики. В этом приближении поведение падающего на оптический элемент света полностью описывается соотношениями геометрической оптики — прямолинейным распространением света в однородной среде, законом Снеллиуса и формулами Френеля [6].

Предполагалось также, что показатель преломления сохраняет постоянное значение в пределах всей заготовки, что соответствует сердцевине со ступенчатым профилем показателя преломления.

В качестве входного потока рассмотрен некогерентный поток поляризованного света в виде параллельных лучей (квантов), падающих на боковую поверхность цилиндра. Вектор электрического поля световых квантов параллелен оси цилиндра. В этом случае коэффициент отражения на границе раздела двух сред описывается выражением, полученным в соответствии с [6]:

$$C_R = \frac{n_1^2 \cos 2\theta - 2n_1^2 \cos \theta \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \theta} + n_2^2}{n_1^2 \cos 2\theta + 2n_1^2 \cos \theta \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \theta} + n_2^2},$$

где n_1 и n_2 — показатели преломления воздуха и стекла соответственно, θ — угол падения луча на поверхность цилиндра. Потери в материале оптического цилиндра пренебрежимо малы, так что эффект поглощения квантов не учитывается. Значение коэффициента отражения света на границе раздела двух оптических сред при этом представляет собой, согласно принципам квантовой электродинамики, вероятность отражения кванта от границы раздела [5]. Процесс распространения кванта в пределах оптического элемента рассчитывается с помощью метода Монте-Карло [7]. При расчете определяется траектория движения каждого кванта в пределах цилиндрического элемента (рис.1). При пересечении траекторией кванта границы оптического элемента производится расчет коэффициента отражения от границы раздела с учетом угла падения θ в соответствии с приведенным выше соотношением. При этом также определяется, какой вариант направления движения кванта будет выбран на границе раздела, — отражение от границы или прохождение ее. Как было указано выше, коэффициент отражения света от границы раздела представляет собой вероятность отражения. Следовательно, в целях определения дальнейшей траектории на границе раздела используется генератор случайных чисел. Если значение числа, сформированного генератором случайных чисел, не превышает величины коэффициента отражения, на границе раздела имеет место явление отражения. В противном случае квант проходит через границу раздела. Распределение квантов в падающем на оптический элемент потоке предполагается равномерным. Общее число входящих квантов можно устанавливать в широких пределах. Расчет траектории прохождения квантом цилиндрического оптического элемента производится для каждого кванта в отдельности. Начальное положение входящего кванта в потоке определяется в соответствии с показаниями генератора случайных чисел и с учетом равномерного распределения квантов в сечении потока. При выходе кванта за пределы цилиндрического элемента фиксируется значение угла рассеяния кванта по отношению к направлению входящего потока. Полный угол, в пределах которого могут рассеиваться кванты, равномерно разделен на сектора, и общее количество квантов, попадающих в конкретный сектор в процессе расчета, фиксируется. Эти данные использовались для построения индикатрисы рассеяния оптического элемента, которая представляет собой угловое распределение интенсивности, нормированное к максимальному ее значению. Программа расчета построена таким образом, что позволяет представить на экране компьютера как числовые данные по индикатрисе (нормированные значения интенсивности в каждом секторе) в отдельном окне, так и вид самой индикатрисы в полярных координатах. Возможности программы позволяют изменять значение показателя преломления оптического элемента. Количество секторов, на которые разделен полный угол, можно изменять в пределах от 24 до 360. Таким образом, максимальная разрешающая способность программы для расчета индикатрисы рассеяния составляет один угловой градус.

С помощью указанного метода проведены расчеты индикатрисы рассеяния при различных значениях показателя преломления оптического элемента. В частности выполнены расчеты индикатрисы рассеяния в окрестности значения показателя преломления, равного 1,46, что характеризует кварцевое стекло.

На рис. 2 изображена индикатриса рассеяния оптического цилиндрического элемента с показателем преломления $n = 1,458$. Направление входных лучей совпадает с направлением оси x . Как

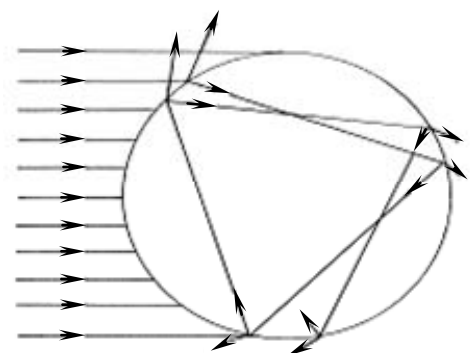


Рис. 1

видно, индикатрисе присущи четыре пика интенсивности рассеяния, располо-

женные симметрично относительно оси x под углами $\varphi_1 = \pm 100^\circ$ и $\varphi_2 = \pm 155^\circ$. Нормированные значения интенсивности этих пиков составляют 0,62 и 1,0 соответственно.

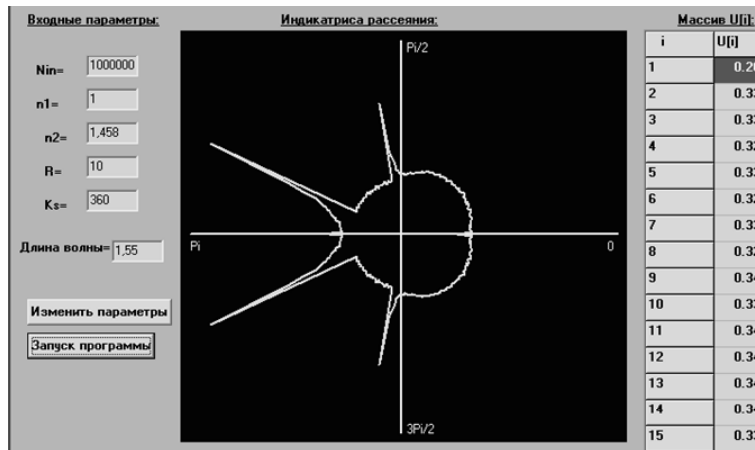


Рис. 2

При уменьшении показателя преломления угол φ_1 увеличивается, а угол φ_2 соответственно уменьшается. Таким образом, эти параметры соответствуют угловым дисперсионным характеристикам по отношению к показателю преломления n . Эти характеристики отражает величина производной $\partial\varphi/\partial n$, которая для первого пика составляет 3,49 рад, а для второго — 1,745 рад, т.е. в два раза меньше. Численно эти величины отражают угловое (в радианах) смещение пика при изменении показателя преломления на единицу и определяют чувствительность метода по изменению показателя преломления n .

Полученные результаты свидетельствуют о возможности определения показателя преломления оптического цилиндрического элемента согласно виду его индикатрисы рассеяния и угловому положению пиков индикатрисы.

При уменьшении показателя преломления до величины 1,33 (значение показателя преломления для воды) первый и второй пики перемещаются и занимают угловые положения 129 и 139° соответственно (рис.3).

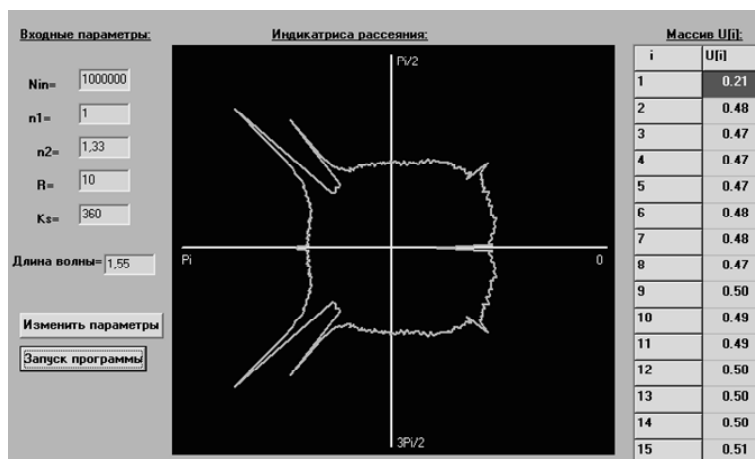


Рис. 3

Для проверки результатов моделирования цилиндрического оптического элемента, выполненного из кварцевого стекла (SiO_2), проведено экспериментальное исследование индикатрисы рассеяния кварцевого стержня цилиндрической формы.

Структурная схема измерения представлена на рис. 4 (1 — оптический элемент; 2 — диафрагма; 3 — линза; 4 — источник излучения; 5 — фотоприемник; 6 — поляризатор).

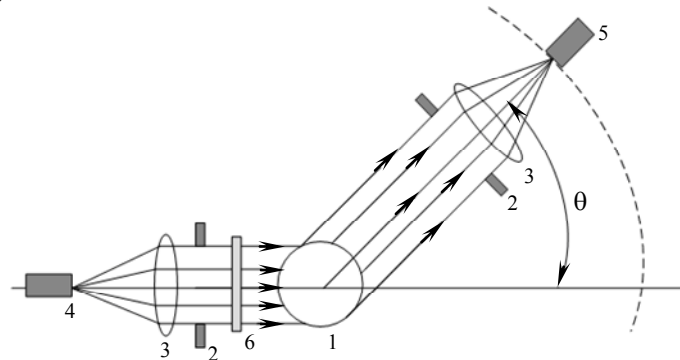


Рис. 4

В качестве измерительного прибора использован оптический тестер типа ОМКЗ-76 в комплекте с источниками излучения и фотоприемниками. Элементы измерительной установки (оптический тестер, источник излучения, фотоприемник, а также исследуемый цилиндрический образец, выполненный из кварцевого стекла) показаны на рис. 5.

Излучение из источника подается на коллиматор, а затем через поляризатор параллельный пучок света поступает на цилиндрический оптический элемент. Рассеянный свет через фокусирующий элемент поступает на вход фотоприемника. Угловое положение пиков индикатрисы рассеяния в пределах погрешности измерительного прибора совпадает с расчетным положением пиков для кварцевого цилиндра:

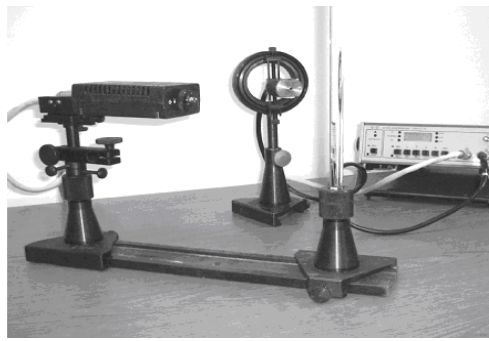


Рис. 5

$\varphi_1 = \pm 100^\circ$ и $\varphi_2 = \pm 155^\circ$. Таким

образом, результаты измерения в пределах погрешности измерительного прибора подтверждают ход индикатрисы рассеяния. Результаты экспериментального исследования индикатрисы рассеяния изложены в [8]. В этой работе получено экспериментальное подтверждение результатов теоретических расчетов индикатрисы рассеяния цилиндрического оптического элемента, выполненного из кварцевого стекла.

Дополнительное подтверждение правильности результатов проведенных теоретических исследований можно получить, сравнив результаты, полученные иными методами. Так, для воды (показатель преломления $n = 1,33$) полученное ранее расчетное положение угловых пиков на индикатрисе рассеяния оптического цилиндрического элемента ($\varphi_1 = \pm 129^\circ$; $\varphi_2 = \pm 139^\circ$) совпадает с данными, полученными другими методами для капель воды [9]. Это углы, под которыми в дождевых каплях можно наблюдать первую и вторую радуги.

Таким образом, результаты моделирования процесса рассеяния света в оптическом цилиндрическом элементе и экспериментальные данные подтверждают возможность определения показателя преломления сердцевины оптоволокна на этапе его изготовления. Полученные данные могут быть использованы при управлении технологическим процессом изготовления оптического волокна.

Особенности индикатрисы рассеяния оптических цилиндрических элементов с пониженным и повышенным показателями преломления

Как было отмечено, измерения показателя преломления с помощью существующих приборов ограничиваются диапазоном значений 1,2–2,8 [4]. В то же время явление рассеяния позволяет расширить диапазон измерения значений показателя преломления. Так, например, при использовании технологии изготовления фотонных кристаллов в волоконной оптике можно достичь более низких значений показателя преломления, чем для существующих типов стекла. На рис. 6 приведен вид индикатрисы рассеяния для случая, когда показатель преломления оптического цилиндрического элемента составляет 1,15.

Как видно из рис. 6, вид индикатрисы заметно отличается от варианта с показателем преломления кварцевого стекла. Однако при этом имеются характерные пики с вполне определенным угловым положением, которые наряду с индикатрисой однозначно характеризуют величину показателя преломления оптического элемента.

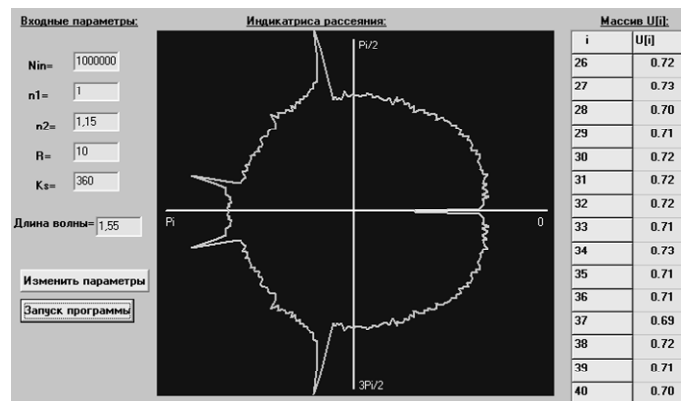


Рис. 6

Наряду с этим прогресс в развитии нанотехнологий ведет к созданию гетерогенных материалов с возможностью изменения их показателей преломления в широком диапазоне значений. В связи с этим представляет интерес применение данного метода для определения повышенного значения показателя преломления. На рис. 7 приведен вид индикатрисы рассеяния для случая, когда показатель преломления оптического цилиндрического элемента составляет 3,3. Здесь также можно отметить наличие пиков, угловое положение которых в совокупности с видом индикатрисы однозначно определяет величину показателя преломления цилиндрического образца.

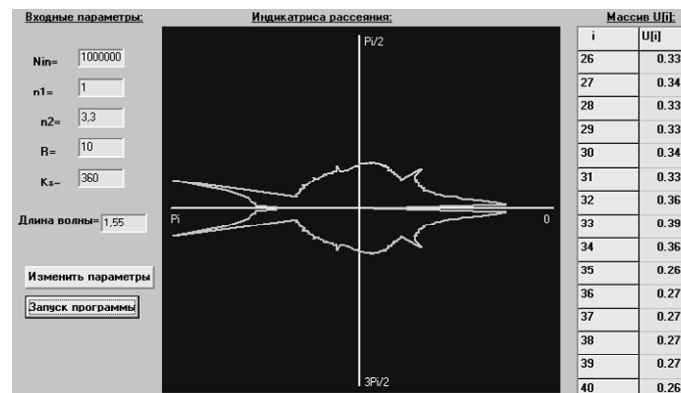


Рис. 7

Заключение

Результаты исследования явления рассеяния на примере оптического цилиндрического элемента показали возможность определения показателя преломления заготовки для производства оптического волокна. Это позволяет управлять технологическим процессом его изготовления и в необходимых случаях выполнять коррекцию процесса. При этом вид индикатрисы рассеяния позволяет однозначно определить значение показателя преломления заготовки цилиндрической формы.

Кроме того, измерения, построенные на принципах явления рассеяния, позволяют значительно расширить диапазон измеряемых значений показателя преломления при сохранении достаточной точности, определяемой точностью угловых измерений. Это особенно актуально для измерения параметров оптических волокон и других устройств, созданных на базе технологии фотонных кристаллов и нанотехнологий.

О.О. Манько

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ З МЕТОЮ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ

Запропоновано метод визначення показника заломлення для заготовки сердцевини оптичного волокна з використанням принципів явища розсіювання світла. Процес вимірювання полягає у визначенні індикатрис розсіювання для заготовки сердцевини волокна. Показано, що індикатриса розсіювання однозначно визначає величину показника заломлення, а застосування принципів розсіювання помітно розширює діапазон вимірювань.

A.A. Manko

METHOD OF MEASURING OF THE REFRACTIVE INDEX TO CONTROL THE MANUFACTURING PROCESS OF OPTICAL FIBERS

A method for determination of the refractive index of the optical fiber preform using the principles of light scattering phenomenon is proposed. The measurement process means determination of the scattering function for the preform of the fiber core. It is shown that the indicatrix of scattering uniquely determines the value of the refractive index, and the application of the scattering principles significantly expands the measurement range.

1. *Mahlke G., Gossing P.* Fiber optic cables: fundamentals, cable design, system planning, 4th edition — Munich : MCD Corporate Publishing, 2001. — 302p.
2. *Жиро А.* Технологии производства оптических волокон. Обзор последних разработок // Наука и техника — 2009. — №4. — С. 22–27.
3. *Физический энциклопедический словарь.* — М. : Сов. энциклопедия, 1984. — 944 с.
4. *Иоффе Б.В.* Рефрактометрические методы химии. 3-е изд., перераб. — Л. : Химия, 1983. — 352 с.
5. *Фрейнман Р.* КЭД — странная теория света и вещества: Пер. с англ. — М. : Наука, 1988. — 144 с.
6. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. — М. : Наука, 1970. — 856 с.
7. *Katok V.B., Manko V.A., Manko A.A.* New method of quantitative modelling of fiber filters on thin films // Proc. 7th International Conf. on Transparent Optic «ICTON 2005». — Spain : Barcelona : 2005. — P. 444–446.
8. *Сукач Г.О., Манько В.О., Манько О.О.* Дослідження оптичних спектрально-селективних елементів, що використовують ефект розсіювання світла // Зв'язок. — № 7–8. — 2008. — С. 33–35.
9. *Ван де Хюлт.* Рассеяние света малыми частицами. — М. : Издательство иностранной литературы, 1961. — 530 с.

Получено 03.02.2017
После доработки 22.05.2017