

УДК 621.372.8

## РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МЕЖМОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ В МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Поляков А.В.<sup>1</sup>, Ксенофонов М.А.<sup>2</sup>, Каваленя А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет

<sup>2</sup>НИИ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** С помощью рециркуляционного метода измерений получено значение межмодовой дисперсии многомодового кварцевого градиентного волоконного световода (ВС). Достоинством метода является возможность проводить измерения, используя короткие отрезки ВС (длиной десятки и сотни метров), при этом относительная погрешность измерений не превышала 2 %. Рассчитаны такие характеристики волокна как параметр профиля показателя преломления, форма распределения показателя преломления вдоль сердцевины волокна, число распространяющихся мод.

**Ключевые слова:** многомодовое оптическое волокно, межмодовая дисперсия, рециркуляционный метод, характеристики градиентного волокна.

## RECIRCULATION METHOD FOR MEASURING INTERMODAL DISPERSION IN MULTIMODE OPTICAL FIBERS

Polyakov A.V.<sup>1</sup>, Ksenofontov M.A.<sup>2</sup>, Kavaleny A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University,

<sup>2</sup>A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU  
Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** Using the recirculation measurement method, the value of the intermodal dispersion of the multimode quartz gradient optical fiber (OF) was obtained. The advantage of the method is the ability to carry out measurement using a short segment of the OF (the length of tens and hundreds of meters), while the relative measurement error did not exceed 2 %. Such characteristics of fiber as a parameter of the refractive index profile, the form of the refractive index distribution along the fiber core, the number of extending mods are calculated.

**Key words:** multimode optical fiber, intermodal dispersion, recirculation method, characteristics of gradient fiber.

Адрес для переписки: Поляков А.В., пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь  
e-mail: polyakov@bsu.by

Несмотря на то, что в протяженных волоконно-оптических линиях связи повсеместно используются одномодовые волокна, в локальных городских и корпоративных сетях продолжают активно применяться многомодовые волоконные световоды (ВС), что связано с их большей надежностью, механической прочностью и существенно меньшей стоимостью. Многомодовые ВС удовлетворяют требованиям поддержания стандартных систем SONET/SDH, а также транспорт Ethernet и их совместную работу в диапазоне скоростей от 10 Мбит/с до 1 Гбит/с. Межмодовая дисперсия, возникающая вследствие того, что многомодовые ВС поддерживают распространение большого количества мод, является основным фактором, ограничивающим их широкополосность. Вследствие того, что все моды распространяются в оптическом волокне по различным траекториям, огибающие модулированного светового сигнала различных мод по мере распространения сигнала по волокну все больше и больше отличаются по фазе. При использовании цифровой системы каждая мода передает информационный импульс, время распространения которого отличается от времени распространения импульса другой моды, что в результате вызывает изменение формы результирующего импульса на

выходе оптического волокна, в частности, увеличение длительности и уменьшение амплитуды переданного импульса. Межмодовая дисперсия обычно ограничивает расстояние передачи лучших многомодовых волокон до 1–2 км, обеспечивая битовую скорость до 1 Гбит/с. При эксплуатации многомодовых ВС часто стоит задача определения их дисперсионных параметров в том случае, когда отсутствуют паспортные данные. Традиционно для определения межмодовой дисперсии используют метод регистрации уширения оптического импульса. Однако данный метод неприменим при исследовании коротких волоконных световодов с длинами от десятков до нескольких сот метров.

В данной работе для определения среднеквадратического значения межмодовой дисперсии  $\sigma_m$  (являющейся доминирующей в многомодовых волокнах) в ВС длиной (10–500) м был использован рециркуляционный способ [1], основанный на изменении частоты рециркуляции одиночного импульса при относительном смещении торцов исследуемого и короткого (длиной 1–2 м) зондирующего ВС. Для экспериментов использовался волоконно-оптический датчик (ВОД) на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы с периодической регенерацией амплитуды, дли-

тельности и формы импульсов на каждом цикле рециркуляции. В данной схеме частота рециркуляции однозначно определяется суммой задержек во всех элементах контура. Принцип измерения заключается в следующем. Измеряемый отрезок многомодового волокна жестко закреплен. Один конец короткого (~ 1 м) зондирующего ВС смещается в радиальном направлении относительно оптической оси с помощью микрометрического устройства, а другой конец соединен с фотоприемником. Воздушный промежуток между торцами ВС являлся селектором пространственных мод. При совпадении оптических осей ВС частота рециркуляции максимальна, поскольку на приемный блок попадают «быстрые» лучи, распространяющиеся вдоль оптической оси. В результате относительного смещения торцов волокон происходит пространственная селекция мод многомодового ВС и наблюдается уменьшение частоты рециркуляции, поскольку период циркуляции определяется уже более «медленными» модами, распространяющимися под углом к оптической оси. Поскольку диаметр сердцевины зондирующего ВС является достаточно небольшим (для одномодового ВС 9 мкм), это обеспечивает повышенную селективность мод. Регистрируя изменение частоты рециркуляции и зная длину ОВ, можно оценить величину  $\sigma_m$ .

Для исследуемого волокна выражение для расчета величины смещения имеет вид:

$$\Delta l = \frac{S}{\sqrt{\left(\frac{1}{NA}\right)^2 - 1}}, \quad (1)$$

где  $NA$  – числовой апертуры ОВ.

Согласно (1), при воздушном зазоре между торцами волокон  $S = 150$  мкм, для того чтобы пространственные моды, выходящие из исследуемого ВС под критическим углом, попадали на оптическую ось зондирующего ВС, необходимо сместить его на 30 мкм относительно оптической оси.

На рисунке 1 представлена экспериментальная зависимость изменения частоты рециркуляции от величины смещения для многомодового кварцевого градиентного ВС длиной 52 м на длине волны 0,825 мкм. Из рисунка 1 нашли, что при совпадении оптических осей волокон средняя частота рециркуляции при времени измерения частотомера 1 с и снятии семи экспериментальных значений для каждой точки, равнялась  $f_0 = 3350516$  Гц. При относительном смещении оптических осей ВС на  $\Delta l = 30$  мкм частота рециркуляции уже составляла  $f_1 = 3348416$  Гц, а изменение частоты рециркуляции равнялась  $\Delta f \approx 2100$  Гц.

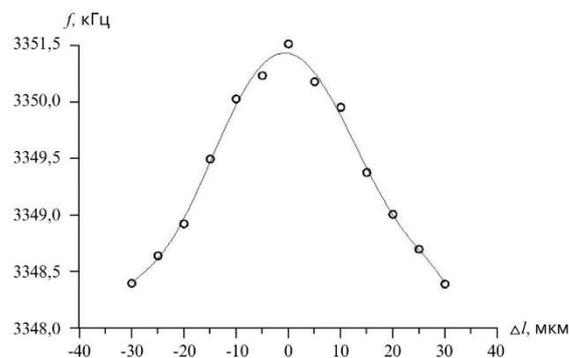


Рисунок 1 – Зависимость частоты рециркуляции волоконно-оптического датчика от величины смещения торца зондирующего ВС относительно оптической оси

Межмодовая дисперсия вычислялась по формуле:

$$\sigma_m = \frac{0,425}{L} \left( h_m \left[ \frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_0} \right] \right), \quad (2)$$

где длина ВС измерялась в километрах, а  $h_m$  определяла ту часть изменения частоты рециркуляции, которая обусловлена межмодовой дисперсией.

Рассчитанная по формуле (2) с использованием данных на рисунке 1 межмодовая дисперсия в нашем эксперименте составляла величину  $\sigma_m = 1,190 \pm 0,012$  нс/км. Это соответствует ширине полосы многомодового ВС  $357,1 \pm 3,4$  МГц · км. Экспериментально полученная величина полосы пропускания ВС хорошо совпадала с паспортным значением исследуемого волокна  $350$  МГц · км для данной длины волны. Относительная погрешность измерений межмодовой дисперсии не превышала 2%. Данная методика позволяет определять межмодовую временную дисперсию многомодовых ВС как с градиентным, так и со ступенчатым профилем показателя преломления.

Подставляя полученное значение  $\sigma_m$  и решая обратную задачу нашли, что для исследуемого волокна с  $n_0 = 1,475$  и  $n_1 = 1,465$  (числовая апертура  $NA = 0,17$ ) величина  $\alpha$  равнялась 2,12. Для полученного значения  $\alpha$ -профиля показателя преломления рассчитаны зависимость распределения показателя преломления вдоль сердцевины градиентного многомодового ВС и количество распространяющихся мод, равное 274.

#### Литература

1. Поляков, А.В. Определение дисперсионных характеристик многомодовых оптических волокон рециркуляционным способом / А.В. Поляков, С.И. Чубаров // Датчики и системы. – 2002. – № 3. – С. 12–15.