

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫМ СПОСОБОМ

На практике для выбора многомодовых оптических волокон (ОВ) с необходимыми параметрами часто стоит задача экспресс-анализа их дисперсионных характеристик с точностью до нескольких процентов с использованием простых методик, а также надежных и дешевых установок. При измерении временной дисперсии на рабочих длинах волн как правило используют импульсную модуляцию выходной мощности источника излучения и в этом случае общую дисперсию оценивают по зависимости уширения оптического импульса от длины волокна [1]. Однако, для ОВ длиной сотни метров и менее данный метод не совсем пригоден, поскольку в этом случае для получения необходимой точности измерений требуется значительное усложнение регистрирующей и обрабатывающей аппаратуры.

Как известно, в многомодовых ОВ любой короткой оптический импульс, введенный в волокно, состоит из ряда лучей (пространственных мод), распространяющихся вдоль оптической оси и по траекториям, наклоненным к ней под различными углами, начиная от нулевого и до некоторого критического  $\varphi_{кр}$ , когда еще возможно полное внутреннее отражение на границе сердцевина-оболочка. Таким образом, лучи будут преодолевать ОВ длиной  $L$  за различное время и введенные в волокно одновременно, на выходе окажутся разделенными во времени. Это уширение светового импульса при его распространении по волокну известно как межмодовая (многолучевая) временная дисперсия ОВ. Величина этого уширения определяется суперпозицией лучей, выходящих из ОВ под различными углами, и попадающих на приемную площадку фотодетектора.

Для определения среднеквадратического значения межмодовой дисперсии  $\sigma_m$  (являющейся доминирующей в многомодовых волокнах) в ОВ длиной (10-500) м нами предлагается использовать рециркуляционный способ [2], основанный на изменении частоты рециркуляции одиночного импульса при смещении торцов исследуемого и короткого (длиной 1-2 м) ОВ относительно друг друга. Для экспериментов нами использовался описанный в [2,3] волоконно-оптический датчик (ВОД) на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы (ОЭРС) с периодической регенерацией амплитуды, длительности и формы импульсов на каждом цикле рециркуляции.

Методика измерения заключается в следующем. Воздушный промежуток между торцами ОВ является селектором пространственных мод. При совпадении оптических осей ОВ частота рециркуляции максимальна, поскольку на приемный блок попадают "быстрые" лучи, распространяющиеся вдоль оптической оси. В результате относительного смещения волокон происходит пространственная селекция мод ОВ и наблюдается уменьшение частоты рециркуляции, поскольку период циркуляции определяется более "медленными" модами, распространяющимися под углом к оптической оси. Величина относительного смещения определяется критическим углом  $\varphi_{кр}$ , под которым лучи выходят из ОВ, обусловленный, в свою очередь, значением числовой апертуры ОВ согласно следующему выражению:

$$NA = \sin \varphi_{кр} = (n_0^2 - n_1^2)^{1/2} \quad (1)$$

где  $n_0$  и  $n_1$ -коэффициенты преломления на оси и оболочки ОВ соответственно.

Таким образом, регистрируя изменение частоты рециркуляции и зная длину ОВ, можно оценить величину  $\sigma_m$ .

Для оценки точности определения межмодовой дисперсии ОВ рециркуляционным способом был проведен следующий эксперимент. Отрезок исследуемого многомодового градиентного ОВ длиной  $L=51$  м, имеющий коэффициент преломления на оси  $n_0=1,475$  числовую апертуру  $NA=0,2$  и диаметр центральной жилы  $D_1=50$  мкм, возбуждался оптическим импульсом длительностью 3 нс на полувысоте, сформированным многомодовым полупроводниковым инжекционным лазером с длиной волн  $\lambda=0,825$  мкм. Второй отрезок длиной 2,5 м имел  $NA=0,2$  и  $D_2=30$  мкм и был состыкован с германиевым лавинным фотодиодом типа ЛФД-2А, имеющим фотоприемную площадку диаметром 200 мкм. Первый отрезок был жестко закреплен, конец другого смещался в радиальном направлении относительно оптической оси с помощью микрометрического юстировочного устройства. Расстояние между торцами волоконных световодов составляло  $S \approx 150$  мкм.

Наличие зазора между ОВ, а также смещение их торцов относительно друг друга приводит не только к изменению модового состава принимаемого излучения, но и к уменьшению оптической мощности, попадающей на приемную площадку фотоприемника. Уменьшение уровня сигнала, поступающего с фотодетектора на пороговое устройство сбратывания последнего, что также влечет за собой изменение частоты рециркуляции, которое при определенных условиях может превысить изменения частоты рециркуляции, обусловленные дисперсионными свойствами ОВ. Для устранения данного явления нами при каждом измерении ток смещения лавинного фотодиода (ЛФД) поддерживался постоянным в пределах 56-57 мкА, т.е. с точностью приблизительно 20%. Таким образом, уменьшение оптической мощности, поступающей на фотоприемник, компенсировалось увеличением коэффициента лавинного умножения ЛФД.

Для исследуемого волокна из (1) получаем, что  $\varphi_{кр}=11,5^{\circ}$ . Следовательно, при воздушном зазоре между торцами волокон 150 мкм, для того чтобы пространственные моды, выходящие из исследуемого ОВ под критическим углом, попадали на оптическую ось короткого отрезка зондирующего ОВ, необходимо сместить его на 30 мкм относительно оптической оси. Было получено, 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. Относительная долговременная нестабильность частоты рециркуляции составляла при этом величину  $4 \cdot 10^{-6}$ . При относительном смещении оптических осей ОВ на  $\Delta l=30$  мкм частота рециркуляции уже составляла  $f_1=3348416$  Гц, а изменение частоты рециркуляции равнялось  $\Delta f \approx 2100$  Гц. Это связано как с изменением модового состава излучения, так и с изменением задержки сбратывания блока регенерации за счёт уменьшения мощности сигнала при постоянном значении порога компаратора. Как отмечалось выше, вклад последнего из названных явлений может составлять приблизительно 20%. Следовательно, разница времени задержки между модами, распространяющимися вдоль оси волокна и по траекториям, наклонным к ней, в приближении гауссовой формы импульса и предположении, что межмодовая дисперсия будет вызывать уширение импульса также приблизительно по гауссовому закону, составляла величину  $\sigma_m=1,247 \pm 0,014$  нс/км. Оптическую полосу пропускания волокна  $\Delta f$  определяют из условия [1], что максимальная скорость передачи информации  $V$  не должна превышать величины  $1/4\sigma$ , при этом влияние межсимвольных помех не превышает 1 дБ. Общая дисперсия  $\sigma$  многомодовых ОВ представляет собой результирующее действие межмодовой  $\sigma_m$  и хроматической  $\sigma_x$  дисперсий. Поскольку хроматическая дисперсия как правило на два порядка меньше межмодовой, то выражение для определения  $\Delta f$  можно записать следующим образом [1]:

$$1,34\Delta f=V=1/4\sigma_m \quad (2)$$

Из (2) находим, что  $\Delta f=149,6 \pm 1,5$  МГц·км. Экспериментально полученная величина полосы пропускания ОВ хорошо совпадает с паспортным значением исследуемого волокна 150 МГц·км для данной длины волны. Погрешность измерений межмодовой дисперсии определяется значением относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции и не превышает 1%. Данная методика позволяет определять межмодовую временную дисперсию многомодовых ОВ как с градиентным, так и со ступенчатым профилем показателя преломления.

Дисперсионные свойства многомодовых градиентных ОВ сильно зависят от параметра профиля показателя преломления  $\alpha$  и могут различаться на несколько порядков [1].

Для минимизации межмодовой дисперсии при изготовлении волокон обычно стремятся сделать величину  $\alpha$  близкой к 2, однако в процессе производства ОВ для различных образцов значения  $\alpha$ , как правило, отклоняются от оптимальной величины. Известно [1], что среднеквадратическая межмодовая дисперсия  $\sigma_m$  для данной длины волны связана с параметром  $\alpha$  следующими соотношениями:

$$\sigma_m = \frac{LN_0\Delta}{c} \left[ \frac{C_1^2\alpha^2}{(\alpha+2)(3\alpha+2)} + \frac{C_1C_2\alpha^2\Delta}{(\alpha+2)(2\alpha+1)} + \frac{C_2^2\alpha^2\Delta^2}{(\alpha+2)(5\alpha+2)} \right]^{1/2},$$

$$C_1 = (\alpha - 2 - 4\delta)/2(\alpha + 1); C_2 = (3\alpha - 2 - 8\delta)/(3\alpha + 2) \quad (3)$$

$$\Delta = (n_0^2 - n_1^2)/2n_0^2; N_0 = n_0 - \lambda \frac{dn_0}{d\lambda}; \delta = -\frac{n_0}{2N_0} \frac{\lambda}{\Delta} \frac{d\Delta}{d\lambda}.$$

Спектральная зависимость показателя преломления  $n_0$  с высокой точностью описывается известной трёхчленной дисперсионной формулой Селмейера [4]:

$$n_0^2 - 1 = \sum_k \frac{G_k \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_{1k}^2}, \quad (4)$$

где коэффициенты  $G_k$  и  $\lambda_{1k}$  определяются экспериментально [4].

Используя полученное значение  $\sigma_m$  и решая обратную задачу с использованием формул (3-4), находим, что для исследуемого волокна с  $n_0=1,475$  и  $n_1=1,4614$  (согласно (1) из условия, что числовая апертура  $NA=0,2$ ) величина  $\alpha$  равна  $2,54 \pm 0,025$ . Для проведения измерений и расчетов по описанной методике необходимы следующие априорные данные по исследуемому отрезку ОВ: коэффициент преломления на оси волокна  $n_0$ , числовая апертура  $NA$ , диаметр сердцевины и длину волны излучения. Зная величину задержек во всех элементах контура при определенных режимах работы, по частоте рециркуляции можно определить длину волокна  $L$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований была разработана методика определения дисперсионных характеристик многомодовых оптических волокон длиной начиная с десятков метров и более рециркуляционным способом. Точность данного метода и минимальные длины исследуемых ОВ ограничиваются стабильностью частоты рециркуляции. Проведенные экспериментальные исследования показали, что величину  $\sigma_m$  ОВ длиной 51 м можно определить с погрешностью 1%. Это вполне достаточно для многих практических применений. Зная  $\sigma_m$ , можно рассчитать  $\alpha$ -профиль для данного отрезка градиентного ОВ. Знание точного значения  $\alpha$ -профиля позволяет получить распределение показателя преломления по пространственной координате, траекторию распространения оптического луча по ОВ, число распространяющихся в ОВ пространственных мод.

#### Литература

Гауэр Дж. Оптические системы связи.— М.: Радио и связь, 1989.—501 с.

Кузьмин К.Г., Малевич И.А., Поляков А.В., Чубаров С.И. Прецизионный волоконно-оптический датчик на основе оптоэлектронной рециркуляционной системы // Измерительная техника.— 1999.— №7.— С. 32–35.

Кузьмин К.Г., Поляков А.В., Чубаров С.И. Многофункциональная волоконно-оптическая измерительная система рециркуляционного типа // Материалы XII науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов "Датчик-2000".— Судак, 2000.— С.168–170.

Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов / Под.ред. И.А. Сисякана.— М.: Мир, 1984.— 512 с.