

Д. т. н. И. Ш. НЕВЛЮДОВ, к. т. н. А. И. ФИЛИПЕНКО

Дата поступления в редакцию

07.03 1997 г.

Оппонент А. Ю. ЮРКИНА

Украина, г. Харьков

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДИАМЕТРА МОДОВОГО ПОЛЯ ОДНОМODOВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Оборудование контроля основано на электронном сканировании поперечного распределения интенсивности излучения световода.

The equipment of control is based on electronic scanning of cross distribution of radiation intensity.

Современные высокоскоростные волоконно-оптические системы передачи информации (ВОСПИ) используют одномодовые оптические волокна (ОМВ), или волоконные световоды (ОВС), эксплуатационные свойства которых в значительной мере определяются параметром, называемым «диаметр модового поля» (ДМП) и характеризующим эффективные размеры поперечного поля распределения электрического вектора единственной распространяющейся моды.

На протяжении восьмидесятых годов ДМП успешно определялся по результатам измерения торцевого излучения ОМВ на уровне $1/e$ ($e=2,718$) максимальной мощности сигнала [1]. Однако данная методика применима только в случае гауссовского распределения поля, а в последние годы все более широкое использование находят дисперсионно-модифицированные ОМВ, имеющие сложный профиль показателя преломления и соответствующее ему сложное распределение электрического поля. В настоящее время Международным консультативным комитетом по телефонной и телеграфной связи (ССИТТ) в качестве стандартизованных величин рекомендованы два вида определения ДМП, основанные на определении размеров модового поля по эффективной ширине одной из картин распределения интенсивности излучения торца оптического волокна в ближнем или дальнем поле [2]. ССИТТ установлены рекомендуемый и альтернативный метод измерения для каждого контролируемого параметра оптического волокна.

В соответствии с рекомендацией G652 «Характеристики одномодовых волокон» для измерения ДМП рекомендован метод анализа в ближней зоне прошедшего через волокно сигнала (TNFT — transmitted near-field technique) [2]. При его реализации производится сканирование увеличенного изображения распределения интенсивности излучения по торцу световода. Оптическая система осуществляет Фурье-преобразование распределения амплитуды

поля в ближней зоне и проецирует образ на приемную плоскость сканирующего фотодетектора (при этом учитываются увеличивающие свойства используемой оптики). Наиболее пригодными, с точки зрения технической реализации, являются методы, основанные на прямом сканировании распределения интенсивности, которое можно осуществить механически (с использованием установленных на прецизионные пьезокерамические устройства точечных фотоприемников) или электронно (с использованием видеоконвекторов или фоточувствительных приборов с зарядовой связью ФПЗС).

Рассмотрим результаты контроля ДМП, измеренного по методу TNFT, представленные в [3, 4]. Были исследованы три типа оптических волокон со ступенчатым профилем SI (step index), дисперсионно-модифицированные DS (dispersion-shifted) и многооболочечные дисперсионно-выравненные DF (dispersion-flattened). При контроле в качестве фотодатчика использовано оптическое волокно, соединенное с фотодиодом и перемещаемое пьезодвигателями. Шаг перемещения в плоскости изображения — 1 мкм. Увеличение объектива $\times 50$, что соответствует ошибке $\pm 0,01$ мкм на торце волокна. Результаты представлены в таблице.

Погрешность измерения ДМП методом TNFT

Тип волокна	Теоретическое значение ДМП	Случайная ошибка, мкм	Систематическая ошибка, мкм
SI	13,45	$\pm 0,05$	+0,09
DS	7,51	$\pm 0,04$	+0,08
DF	8,54	$\pm 0,2$	+0,03

Было выявлено три источника систематической погрешности. Во-первых, влияние конечного размера детектора, не превышающее 1% от полной погрешности. Во-вторых, систематическая погрешность, обусловленная дифракционными эффектами. Дифракция вызывает искажение изображения ближнего поля, что приводит к завышению или занижению результата в зависимости от динамического уровня и числовой апертуры оптики системы контроля. И в-третьих, техника цифровой обработки, уменьшая влияние шумов, приводит к потере части информации о распределении интенсивности.

Анализируя результаты, можно отметить, что систематическая ошибка приводит к завышению

ДМП на величину порядка 1%. Случайная погрешность контроля ДМП методом ближнего поля составляет $\pm 0,05$ мкм для ступенчатых структур. Для структур с более сложным профилем показателя преломления шумовые эффекты ухудшают точность измерения приблизительно до $\pm 0,2$ мкм.

С целью обеспечения отечественных предприятий — изготовителей компонентов ВОСПИ оборудованием технологического контроля ДМП с систематической погрешностью менее $\pm 0,05$ мкм и случайной ошибкой не более $\pm 0,1$ мкм авторами разработаны две установки на основе линейных датчиков и матричных приборов с зарядовой связью, реализующие метод ближнего поля. При этом во внимание принималась необходимость удовлетворения требований по производительности, простоте эксплуатации и использованию отечественной элементной базы при обеспечении высоких метрологических характеристик. Преимуществом данных разработок является то, что электронно-механическое устройство сканирования заменено электронным, выполненным на доступной и более дешевой элементной базе с сохранением требуемых характеристик за счет тщательной проработки устройства и применения эффективной процедуры обработки измеренного распределения модового поля, предложенной авторами.

Диаметр модового поля (d_n) предлагается определять через начальные моменты m_k k -го порядка ($k=0, 1, 2$) функции распределения интенсивности излучения $I(x)$ по торцу ОМВ. Учитывая известное соотношение электродинамики

$$I(x) = \frac{n_c}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} |E_{NF}(x)|^2, \quad (1)$$

где n_c — показатель преломления среды; ϵ_0 и μ_0 — диэлектрическая и магнитная постоянные, соответственно,

выражение для диаметра модового поля приобретает вид

$$d_n = \sqrt{\frac{m_2}{m_0} - \left(\frac{m_1}{m_0}\right)^2} = \sqrt{\frac{\int_0^\infty x^2 \cdot E_{NF}^2(x) dx}{\int_0^\infty E_{NF}^2(x) dx} - X_C^2}, \quad (2)$$

где x — текущая координата в плоскости излучающего торца оптического волокна, связанная с линейной осью фотоприемника, вдоль которой производится сканирование поля (измерение распределения интенсивности излучения); нижний предел интегрирования принимается равным нулю, т. к. начало координат связано с первой ячейкой многоэлементного фотоприемника;

X_C — координата центра модового поля, определяемая как «центр тяжести» функции распределения интенсивности:

$$X_C = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\int_0^\infty x \cdot E_{NF}^2(x) dx}{\int_0^\infty E_{NF}^2(x) dx}. \quad (3)$$

Здесь $E_{NF}(x)$ — амплитуда распределения электрического поля в ближней зоне, которая определяется путем решения обратной задачи — восстановления по результатам измерения распределения интенсивности электрического поля в плоскости изображения (E_{IP}) и аппроксимируется рядом ортогональных функций Лагерра $\Phi_n^{(\alpha)}$

$$E_{NF}(x) \approx \sum_{n=0}^N c_n \cdot \Phi_n^{(\alpha)}(x). \quad (4)$$

Учитывая, что результат взаимодействия поля излучения волокна с оптической системой описывается сверткой импульсной характеристики $h(x)$ системы с напряженностью поля, а само поле излучения E_{NF} аппроксимируется рядом ортогональных функций Лагерра $\Phi_n^{(\alpha)}$, число слагаемых ряда N определяется минимизацией критерия эмпирического риска (минимальной ошибкой восстановления)

$$I_e(c) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \left(E_{IP} - \int h(y-x) \cdot \left\{ \sum_{n=0}^N c_n \cdot \Phi_n^{(\alpha)}(x) \right\} dx \right)^2, \quad (5)$$

где $h(x)$ — импульсная характеристика оптической системы;

L — число элементов ФПЗС;

E_{IP} — измеренное с некоторой ошибкой электрическое поле в плоскости изображения;

y — координаты точек измерения поля в плоскости изображения.

Преимуществом этого метода является то, что диаметр модового поля может быть прямо получен через нормированные коэффициенты разложения c_n^* :

$$d_n = 2 \left\{ 5 + \sum_{n=0}^N 4n(c_n^*)^2 + (N+1)[2(c_N^*)^2 + N(c_N^* - c_{N-1}^*)^2] + \sum_{n=0}^N c_n^*(n+1)(n+2)(c_n^* - 2c_{n+1}^* + c_{n+1}^*) - X_C^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

где

$$X_C = 1 + 2N(c_N^*)^2 + 2 \sum_{n=0}^{N-1} c_n^*(n \cdot c_n^* - (n+1)c_{n+1}^*), \quad (7)$$

$$\sum_{n=0}^N |c_n^*|^2 = 1. \quad (8)$$

В качестве датчиков для сканирования излучения ОМВ использованы в одном приборе линейный ФПЗС типа К1200ЦЛ1, позволяющий разложить

предъявляемое для контроля изображение на 1024 элемента строки, а в другом — матричный ФПЗС K1200ЦМ2 форматом 576 строк на 360 столбцов. Структурное построение систем технологического контроля одинаковое. Формируемый датчиками и усиленный видеосигнал преобразуется в двоичный код аналого-цифровым преобразователем на базе ИМС K1107ПВ2 и заносится в память микропроцессорного блока. В общем случае вместо последнего может быть подключен персональный компьютер. Оптическая система предусматривает возможность быстрой смены объективов, в качестве которых использовались ОМ-29(40×0,65) и ОПА-4(60×0,85). Источник света — полупроводниковый лазерный диод с длиной волны 1,3 мкм. Использование высокоапертурной оптики исключает отсечки в пространственно-частотной области, вызывающие дополнительную погрешность при контроле ДМП. Последняя также обусловлена точностью формирования фоточувствительных элементов, точностью определения увеличения оптики, конечной апертурой фотоприемника и погрешностями цифровой обработки. Погрешности, связанные с расфокусировкой оптической системы, могут быть, в принципе, устранены.

Опытные образцы оборудования были испытаны и по полученным результатам внедрены на Харьковском ПО «Радиореле». На установках проведен контроль в условиях производства ОВС со ступенчатым профилем показателя преломления типа ОВ-ЕС01-1-10-1/6 ТУ16, имеющим согласно техническим условиям ДМП 10 ± 1 мкм, числовую апертуру $NA=0,11$. Случайная погрешность при контроле составила $\pm 0,08 \dots \pm 0,1$ мкм, а систематическая $+0,02 \dots +0,04$ мкм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что по показателям случайной погрешности созданное оборудование несколько уступает зарубежным аналогам, рассмотренным выше, зато его систематическая погрешность ниже, чем у зарубежного. Следует отметить, что для проведе-

ния высокоточного контроля (которым является технологический контроль ДМП) требуется создание соответствующих внешних условий. Отчасти эта проблема была решена за счет размещения оптического блока систем на массивных стальных основаниях. Однако испытания и опытная эксплуатация производилась на участке отдела технического контроля цеха волоконно-оптических компонентов, где не были обеспечены требуемые условия по температурным и механическим воздействиям, что и стало причиной повышения случайной погрешности. Для ее снижения должны быть оборудованы специальные помещения на нижнем этаже производственного здания с постоянной температурой и использованием массивного основания (например, гранитного) под установкой контроля.

Оценивая в целом результаты работ и сравнивая их с рассмотренными в [3, 4], можно сделать вывод, что все эти методики и средства контроля ДМП обладают аналогичными метрологическими характеристиками и могут быть использованы в производстве компонентов ВОСПИ: оптических волокон, волоконных соединительных и коммутационных устройств, а также, при условии соответствующего программного обеспечения, применяться для восстановления профиля показателя преломления волоконных световодов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. ГОСТ 26792 — 85. Волокно оптическое. Методы измерения параметров.
2. G652. Characteristics of single-mode optical fibre cable. CCITT Recommendation, 1984.
3. Artiglia M., Coppa G., Di Vita P. and others. Mode field diameter measurements in single-mode optical fibers // CSELT Technical reports. — 1990. — Vol. XVIII, N 1, February. — P. 43—55.
4. Artiglia M., Coppa G., Di Vita P., Potenza M. Accuracy of mode field diameter measurements in single-mode optical fibers from near-field technique // CSELT Technical reports. — 1990. — Vol. XVIII, N 2, April. — P. 119—120.

**Харьковский технический университет радиозлектроники
приглашает предприятия и организации
принять участие в постоянно действующей
выставке-продаже**

**"РАДИОЭЛЕКТРОННОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ:
ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ"**

**Справки по адресу: 310726, Украина, Харьков,
пр. Ленина, 14, ХТУРЭ, каф. ТАПР.
Тел. (0572) 40-94-86**