

- Appl. Opt. 1977. Vol. 16, N 15. P. 1320—1322. 3. Zemon S., Fellows D. Tunneling leaky modes in parabolic index fiber//Appl. Opt. 1976. Vol. 15. N 8. P. 1936—1941.
4. Суховианов И. А. К определению дополнительных потерь в коротких многомодовых оптических волноводах//Радиотехника. 1985. Вып. 75. С. 26—29.
5. Унгер Х. Г. Планарные и волоконные оптические волноводы/Пер. с англ. Под. ред. В. В. Шевченко. М., 1980. 656 с.

Поступила в редколлегию 03.03.89

УДК 621.372

Е. В. ВОРОНЦОВА

## ОПТИЧЕСКИЙ СМЕСИТЕЛЬ МОД С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

При разработке компонентов волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) необходимо учитывать зависимость затухания, вносимого компонентами ВОСП, от условий возбуждения многомодовых волоконных световодов (МВС). Используемые в ВОСП источники излучения обладают существенной неоднородностью пространственного распределения интенсивности. Колебания интенсивности в пределах  $1-3^\circ$  могут достигать 50 % [1]. Это приводит к возбуждению как направляемых, так и вытекающих мод и плохо прогнозируемому распределению мощности по модам. В связи с этим необходимо обеспечить стабильность параметров источника, чтобы при измерениях всегда использовать незначительно отличающиеся распределения мощности по модам.

Известны три основных типа воспроизводимого межмодового распределения мощности (МРМ) передаваемого сигнала, которое можно использовать при измерениях. Это равновесное, стационарное и некое промежуточное распределение, получаемое с помощью цепочки из последовательно соединенных ступенчатых и градиентных световодов.

Равновесным МРМ считается распределение, полученное при возбуждении МВС ламбертовым излучателем, т. е. при равномерном возбуждении всех модовых групп.

Стационарное модовое распределение — это распределение, которое получено на выходе длинного (порядка нескольких километров) МВС, т. е. когда вытекающие моды фактически исчезли и трансформация передаваемой мощности между направляемыми модами, вызванная наличием микро- и макродефектов в оптическом волокне, привела к получению постоянного по длине МРМ. Искусственно создавая сильную связь мод в МВС, можно получить распределение, близкое к стационарному и в коротких отрезках волокна.

Третий тип распределения может быть получен с помощью многозвенного смесителя мод, который состоит из последовательно соединенных коротких (1,5—2 м) отрезков градиентного и ступенчатого волокна [2].

В связи с тем, что стационарное распределение наиболее распространено при проведении измерений затухания, вносимого пассивными компонентами ВОСП, разработано множество устройств, дающих на выходе распределение, близкое к стационарному. Такие устройства — смесители мод — создают сильную связь между отдельными группами мод и вызывают распределение передаваемой мощности между ними. Простейший из данных устройств — смеситель, получаемый при помещении световода между двумя листами абразивной бумаги с соответственно подобранным диаметром зерна [3]. Указанный способ невыгоден, потому что сильная связь мод в этом случае достигается за счет возникновения достаточного количества новых дефектов, микроизгибов, напряжений, что в конечном итоге приводит к разрушению МВС. Этот смеситель имеет еще один существенный недостаток — большую величину затухания.

Другой чаще всего используемый смеситель — S-образный смеситель. Он изготавливается путем навивки световода на штыри с радиусом, близким к критическому для данного световода и фактически является сочетанием смесителя и модового фильтра, поскольку вызывает не только перемешивание отдельных модовых групп, но и выводит моды высоких порядков. Однако такой изгиб вызывает разрушение волокна и приводит к выходу в облочку и затуханию не только вытекающих мод, но и определенной части направляемых мод.

Идеальным смесителем мод является волокно с длиной, превышающей длину связи мод. Недостатком такого смесителя является некоторая громоздкость, так как для достижения стационарного МРМ необходимо использовать волокна длиной не менее 1 км.

В последнее время в качестве смесителей мод было предложено использовать многозвенные световоды [2]. Работа такого смесителя основана на том, что любая бесконечная последовательность пар звеньев с различными профилями показателя преломления обладает предельным модовым составом, который воспроизводится при стыковке с любым источником света, имеющим неизвестную диаграмму излучения. Однако такой смеситель предполагает равенство диаметров и числовых апертур звеньев и их полное геометрическое согласование.

Все известные смесители мод обладают одним существенным недостатком: каждый смеситель мод, обеспечивая некое МРМ, в то же время формирует свое значение пятна излучения и числовой апертуры выходного пучка.

Применяя различные смесители, можно получить значительные отличающиеся друг от друга значения затухания в исследуемом МВС. Считается, что в оптическом волокне достигнуто стационарное распределение, когда пятно излучения и числовая апертура выходного пучка равны 70 % от первоначальных значений диаметра сердцевинки и числовой апертуры волокна. Предлагалось даже использовать «70 % отрезки» для формирования

стационарного МРМ в измеряемом МВС [4]. Но эти отрезки очень чувствительны к изменениям условий засветки и не сглаживают неоднородности пространственного распределения интенсивности источника излучения. Поэтому необходимо создать смеситель мод с изменяющимися оптическими параметрами, чтобы можно было выдерживать условия стационарности и 70 % возбуждения. Такой смеситель можно получить, используя трехзвенный смеситель мод и два модовых фильтра. Рассмотрим работу такого смесителя на примере Г—С—Г цепочки: буквой Г обозначено звено с квазипараболическим профилем показателя преломления (ППП), буквой С — звено с квазиступенчатым ППП. В работе [2] получено аналитическое выражение для трансформированного модового состава в случае, если апертуры и радиусы звеньев равны и при условии их полного геометрического согласования, т. е. при прохождении сигнала через идеальную цепочку. Тогда модовый состав трансформируется в соответствии с выражением

$$x_i Q_i(x_i) = \int_0^1 dx_{i-2} x_{i-2} Q_{i-2}(x_{i-2}) + \int_{x_i}^1 dx_{i-2} (x_i - x_{i-2}) Q_{i-2}(x_{i-2}), \quad (1)$$

где  $x_{i-2}$ ,  $x_i$  и  $Q_{i-2}$ ,  $Q_i$  — нормированные постоянные распространения и модовые составы на выходе  $(i-2)$  и  $i$ -го звеньев с параболическим ППП. Модовым составом  $Q$  здесь будет называть мощность, приходящуюся на одну моду вырожденной группы мод.

Нормированная постоянная распространения определится следующим образом:

$$x = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\beta^2}{n_1^2 k_0^2} \right), \quad (2)$$

где  $\beta$  — постоянная распространения, характеризующая погонную фазовую задержку на данном луче;  $n_1$  — показатель преломления на оси МВС;  $k_0$  — волновое число в вакууме.

Из формулы (1) следует, что при равномерном возбуждении всех мод, когда  $Q_1(x) = 1$ ,

$$Q_3(x) = 1 - \frac{x}{2}, \quad (3)$$

где  $Q_3$  — модовый состав в 3-м звене Г—С—Г цепочки.

Наличие такого модового распределения в третьем звене смесителя мод можно проверить, используя метод измерения интенсивности излучения в ближней зоне [5].

Измерения по методу ближней зоны основываются на следующих предложениях:

а) все моды с постоянными распространения, лежащими в интервале  $(\beta, \beta + d\beta)$ , имеют одинаковую мощность;

б) возбуждается большое число мод и для вычисления интенсивности излучения в ближней зоне применимо приближение геометрической оптики;

в) фазы мод случайны по отношению друг к другу, так что на выходном торце происходит некогерентное сложение их полей.

Распределение интенсивности связано с модовым составом таким образом (4):

$$J(r) = \frac{k_0^2 n_1^2}{\pi} \int_{\Delta f\left(\frac{r}{a}\right)}^{\Delta} dx Q(x), \quad (4)$$

где 
$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}; \quad f\left(\frac{r}{a}\right) = \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha;$$

$\alpha$  — параметр, принимающий значения от 1 до  $\infty$ .

Вычисление распределения интенсивности при известном модовом распределении  $Q(x)$  и известных параметрах МВС не представляет труда.

Для контроля вида распределения интенсивности использовалась система видеоконтроля, которая включает в себя источник излучения, микроскоп, телевизионную камеру, дисплей профиля интенсивности, монитор, блок считывания размеров кривой профиля интенсивности. Неизменность модового распределения на выходе смесителя можно проверять по разработанной нами методике. Так как МРМ, получаемое с помощью смесителя мод, не должно изменяться при изменении условий засветки, то и профиль распределения выходной интенсивности в ближнем поле не должен изменяться при изменении условий возбуждения исследуемого смесителя. Реализовать предлагаемую методику проверки смесителей мод можно при наличии системы видеоконтроля. Изменение условий засветки достигается изменением апертуры источника излучения от значения 0,05 до 0,5, т. е. от величины, значительно меньшей средней апертуры волокна, до величины, существенно превышающей ее.

Контроль ширины кривой интенсивности осуществляется по монитору с помощью блока считывания размеров кривой профиля интенсивности. Если смеситель дает на выходе стационарное МРМ, то ширина кривой интенсивности на уровнях 60 %, 70 %, 80 % для градиентного волокна и на уровнях 10 % и 20 % для ступенчатого волокна не должна изменяться при двух описанных значениях апертуры источника. Данные уровни интенсивности были выбраны как наиболее чувствительные к изменению условий засветки.

Как указывалось, трехзвенный смеситель мод предполагает полное согласование звеньев по диаметрам и числовой апертуре и точную геометрическую стыковку. Этого можно избежать, обеспечив условие «70 % возбуждения» второго (ступенчатого) волокна. Для этого на 1-м градиентном звене необходимо изготовить модовый фильтр.

Наиболее удобным в данном случае является спиральный модовый фильтр, в котором часть МВС наматывается без натяжения на цилиндрическую оправку с соответствующим диаметром [5].

Из литературных источников известно [6], что излучатель возбуждает МВС и излучение распространяется по сердцевине, вплоть до изгиба с радиусом кривизны  $R$ . На изгибе нарушаются условия полного внутреннего отражения для части волноводных мод сердцевины. Часть излучения выходит при этом в оболочку. Излучение, покидающее сердцевину, возбуждает часть волноводных мод оболочки из совокупности:  $k \leq \beta_0 \leq kn_0$ , где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\beta_0$  — постоянная распространения мод оболочки;  $n_0$  — показатель преломления оболочки. Моды оболочки лежат в интервале  $\beta_1 \leq \beta_0 \leq \beta_2$ . Величина  $\beta_1, \beta_2$  определяются для градиентного волокна из соотношений [6]

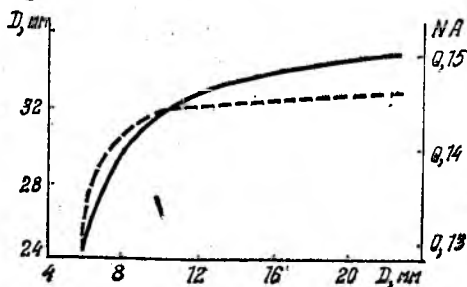
$$\beta_1 = kn_k \exp [(-r + \rho)/R];$$

$$\beta_2 = kn_k \exp [(-r - \rho)/R], \quad (5)$$

где  $n_k$  — показатель преломления материала, окружающего сердцевину;  $r$  — радиус оболочки МВС;  $\rho$  — радиус сердцевины;  $R$  — радиус кривизны изогнутого волокна.

Как известно, в реальных МВС за оболочкой имеется либо силиконовое, либо эпоксиакрилатное покрытие, что приводит к сокращению интервала постоянных распространения мод оболочки:  $kn_{\text{покр}} \leq \beta_0 \leq kn_0$ , где  $n_0$  — ПП оболочки,  $n_{\text{покр}}$  — ПП покр.

При определенных радиусах изгиба величина  $kn_{\text{покр}}$  достигает значения  $\beta_1$  и начинается выход излучения из оболочки в покрытие, что в свою очередь приводит к уменьшению числа мод излучения в сердцевине МВС. Таким образом, можно регулировать диаметр пятна излучения и апертуру пучка, наматывая его на цилиндрические оправки с различным диаметром. Однако отметим, что волокна с силиконовым покрытием при изготовлении модового фильтра требуют очень малых радиусов изгиба. Из соотношений (5) вытекает, что выход излучения из оболочки в покрытие для кварц-кварцевых градиентных МВС с диаметром сердцевины 50 мкм и оболочки 125 мкм, и силиконовым покрытием ( $n_{\text{покр}} \approx 1,39$ ) начинается при  $R \approx 0,8$  мм, что значительно меньше допустимых радиусов изгиба волокна. Поэтому наиболее удобными для изготовления модовых фильтров являются световоды с эпоксиакрилатным покрытием.



Из изложенного следует, что на основе трехзвенной цепочки МВС с различными профилями показателя преломления можно получить оптический смеситель мод с изменяющимися параметрами. Для этого на 1-м и 3-м звеньях цепочки, выполненных из

**МВС в эпоксинакрилатном покрытии, необходимо сформировать модовые фильтры.**

Неизменность модового распределения, даваемого таким смесителем, можно контролировать по распределению выходной интенсивности в ближнем поле. Необходимые значения пятна излучения и апертуры выходного пучка можно получать с помощью цилиндрической оправки соответствующего диаметра. На рисунке приведена зависимость размеров пятна излучения (сплошная кривая) и числовой апертуры штриховая) выходного пучка от диаметра оправки модового фильтра. Используя эту зависимость, можно настраивать смеситель для работы с МВС, имеющими любые оптические параметры. Таким образом, предлагаемый смеситель мод обеспечивает стабильное МРМ, независимое от характеристик источника излучения, и позволяет обеспечить у большого числа пользователей оптимальные условия при измерениях вносимого затухания.

**Список литературы:** 1. *Комплексный подход к исследованиям коротких волоконно-оптических линий связи*/А. И. Сухоианов, А. А. Контарь, А. В. Кублик, В. С. Макаревич//Радиотехника. 1987. Вып. 83. С. 52—58. 2. *Кугушев А. И., Исаков В. П., Керимов А. А. Расчет трансформации модового состава в многозвенных световодах*//Электросвязь. 1988. № 3. С. 17—20. 3. *Мидвинтер Дж. Э. Волоконные световоды для передачи информации*. М., 1983. 328 с. 4. *Котюк А. Ф. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем*. М., 1987. 223 с. 5. *Кугушев А. И., Керимов А. А., Яковлев М. Я. Дифференциальные характеристики многомодовых градиентных волоконных световодов и методы их измерения*//Зарубеж. радиоэлектроника. 1983. № 7. С. 54—65. 6. *Моршнев С. К., Францессон А. В. Пропускание светового излучения*//Квантовая электроника. 1981. № 2. С. 285—290.

*Поступила в редколлегию 28.02.89*