

ВЛИЯНИЕ МОД ОБОЛОЧКИ НА ХАРАКТЕР ДИФФУЗИИ МОЩНОСТИ В КОРОТКИХ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СВЕТОВОДАХ

В настоящее время внутриобъектовые волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) реализуются, как правило, на основе коротких отрезков оптических кабелей, включающих в себя многомодовые световоды с пространственно-неустановившимся режимом распределения мощности по модам, который характеризуется процессом межмодового взаимодействия. Интенсивность этого процесса определяется существующими в световодах нерегулярностями, которые, в свою очередь, зависят от специфики технологического процесса изготовления световодов, их оптико-геометрических параметров. Оптическая мощность в таких световодах может распространяться как по сердцевине, так и по светотражающей оболочке, и относительное распределение мощности по этим областям световода будет зависеть от условий возбуждения, оптико-геометрических параметров и длины световода.

Обычно предполагается, что распространяющаяся по оболочке мощность пренебрежимо мала или для подавления этой мощности используется какое-нибудь устройство. Хотя это приближение и оказывается эффективным во многих применениях, существует ряд случаев, когда бывает необходимо изучить и учесть влияние мощности, распространяющейся по оболочке. Например, при исследовании распространения импульсов присутствие мод оболочки может существенно влиять на форму и дисперсию передаваемого сигнала. Это влияние будет сказываться даже при использовании устройства, подавляющего моды оболочки, так как мощность может туннелировать из сердцевины в оболочку по всей длине световода [1]. Эксперименты, сделанные различными авторами, подтверждают существенное влияние мод оболочки, причем в некоторых случаях мощность, содержащаяся в низших модовых группах оболочки может составлять 80 % и 50 % от максимальной мощности при возбуждении соответственно лазером и светодионом [2].

Для анализа процессов в многомодовых нерегулярных световодах наиболее широко применяется волновой подход, в рамках которого развита теория связанных мощностей и ее диффузионное приближение. Уравнение диффузии

$$\frac{\partial \bar{P}(m)}{\partial z} + 2\gamma(m)\bar{P}(m) = \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial m} \left(mh(m) \frac{\partial \bar{P}(m)}{\partial m} \right) \quad (1)$$

описывает процесс диффузии средней мощности, зависящей от расстояния при переходе от низших мод к высшим и наоборот.

Это дифференциальное уравнение в частных производных описывает производную второго порядка по обобщенному модовому числу m от средней мощности $P(m, z)$ с производной первого порядка по расстоянию z вдоль оси волокна. Здесь $h(m)$ — средний коэффициент связи мощностей, представляющий собой сумму всех коэффициентов связи между одной модой группы m и всеми модами группы $m+1$, связанные с ней через соответствующую кривизну оси.

Граничные условия устанавливаются из следующих соображений. Можно полагать, что низшая мода ($m=0$) не имеет внешних связей и мощность не может диффундировать в эту моду. Поэтому $\partial P(m, z)/\partial m = 0$. Что касается второго граничного условия, то при анализе диффузии мощности вдоль световода полагают, что связь высшей моды с модами излучения настолько велика, что диффузия мощности мод низшего порядка не может компенсировать потери мощности, вызванные этой связью, т. е. $P(m_c, z) = 0$. Здесь m_c — составное модовое число направляемых мод вблизи отсечки. Однако мощность этих мод не излучается мгновенно. Кроме этого, пространственно-неустановившийся режим в волоконных световодах определяется еще и модами оболочки, которые возбуждаются первоначально источником, поскольку не вся его энергия передается направляемым модам. Под влиянием любых нерегулярностей в сердцевине и оболочке, а также на их границе между направляемыми модами и модами оболочки возникает связь. Связь эта взаимная, и поэтому существует обратный поток энергии. Из этого следует, что при анализе коротких световодов, которые находятся в условиях пространственно-неустановившегося режима, необходимо расширить второе граничное условие и включить в рассмотрение моды оболочки. С этой целью вводится следующее граничное условие, позволяющее учитывать направляющие свойства границы между оболочкой и покрытием: $P(M_c, z) = 0$. Здесь M_c — составное модовое число мод оболочки вблизи отсечки и является наибольшим. Таким образом, в настоящей работе предлагается модель, в которой средняя мощность мод, имеющих составное модовое число $m_c < m \leq M_c$ описывается как аналитическое продолжение направляемых мод в область отсечки. Предположение о возможности такого подхода высказывались в работе [3].

Для нахождения решения уравнения (1) необходимо определить функцию связи $h(m)$, обусловленную нерегулярностью волокна. Анализ ряда работ показал, что наиболее хорошо описывает типичные нерегулярности следующий класс функций: $h(m) = h_0 m^{-2g}$ (2), где g — параметр степенного закона. Функция коэффициента связи (2) позволяет исследовать широкий круг задач для волоконных световодов со степенным профилем показателя преломления, включая ступенчатый. В работе [4] было получено выражение для компонентов функции связи мод световода со ступенчатым профилем показателя преломления при учете только направляемых мод. Однако очевидно, что вследствие разных ус-

ловий распространения направляемых мод и мод оболочки эффективностью взаимодействия этих мод также будет разной. Поэтому и выражения для компонентов функции связи направляемых мод и мод оболочки будут отличаться. Для направляемых мод

$$h_0 = h_1 = \frac{16 \langle x^2 \rangle}{\pi^4} n_1^2 k^2 p_1 \sin(\pi/2 p_1) L_1^{1-2p_1} (4\Delta_1)^{-p_1} a^{2p_1+2}, \quad g = p_1 \quad (3)$$

совпадает с выражением, полученным в работе [4]. Для мод оболочки

$$h_0 = h_2 = \frac{16 \langle x^2 \rangle}{\pi^4} n_2^2 k^2 p_2 \sin(\pi/2 p_2) L_2^{1-2p_2} (4\Delta_2)^{-p_2} b^{2p_2+2}, \quad g = p_2. \quad (4)$$

В этих выражениях κ — кривизна оси световода; p_i — показатель степени, определяющий форму спектра микроизгибов и называемый параметром спектра; L_i — интервал корреляции, определяющий длину отрезка световода, для которой отклонения границы сердцевинки и оболочки соотносятся между собой; a , b — радиус сердечника и светотражающей оболочки соответственно; Δ_1 , Δ_2 определяются разностью показателей преломления сердцевина—оболочка и оболочка—покрытие.

Упругость материалов сердцевинки, оболочки и покрытия определяет интервал корреляции [5] для направляемых мод

$$L_1 = \left(\frac{\pi}{4} \frac{E_1}{E_2} \right)^{\frac{1}{4}} b \quad (5)$$

и для мод оболочки

$$L_2 = \left(\frac{\pi}{4} \frac{E_2}{E_3} \right)^{\frac{1}{4}} (b + t_d), \quad (6)$$

где E_1 , E_2 , E_3 — модули упругости сердцевинки, оболочки и защитного покрытия; t_d — толщина защитного покрытия.

Уравнение (1) имеет бесконечное множество решений, которые можно представить в виде

$$\bar{P}_k(m, z) = V(m) \exp(-(2\gamma(m) + \Gamma_{l,k})z). \quad (7)$$

Каждому из решений (7) соответствует собственная функция $U_k(m)$ с собственным значением $\Gamma_{l,k}$

$$U_k(m) = N_k m^g J_\omega(u_{\omega k} m^{1-g}); \quad (8)$$

$$\Gamma_{l,k} = h_l (1 + g)^2 u_{\omega k} / M_l, \quad (9)$$

где $\omega = -g/1 + g$; M_l — полное число распространяющихся мод, а величины $u_{\omega k}$ являются нулями функции Бесселя $J_\omega(u)$. Ин-

декс $i=1$ для направляемых мод, а $i=2$ — для мод оболочки. Нормированная постоянная определяется следующим образом:

$$N_k = \frac{2(1+g)^{\frac{1}{2}}}{|J_{w+1}(u_{wk})|} \quad (10)$$

Собственные функции $U_k(m)$ в рамках диффузионного приближения указывают как мощность нормальных мод случайно связанной системы, называемых статистическими модами, распределяется по группам почти вырожденных мод с составным модовым числом m . Статистическая мода k распространяется со своим собственным значением $\Gamma_{i,k}$, являющимся ее коэффициентом затухания.

Если все моды возбуждаются одновременно и начальная мощность распределена по всем модам в соответствии с законом $\bar{P}(m, 0)$, то начальное возбуждение каждой статистической моды определяется выражением:

$$W_k = \int_0^{M_c} m U_k(m) \bar{P}(m, 0) dm. \quad (11)$$

Общее решение уравнения потока мощности (1), описывающее диффузию распределения мощности вдоль световода, выражается суперпозицией решений уравнения (7)

$$\bar{p}(m, z) = \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^{\infty} W_k u_k(m) \exp(-(2\gamma(m) + \Gamma_{l,k})z). \quad (12)$$

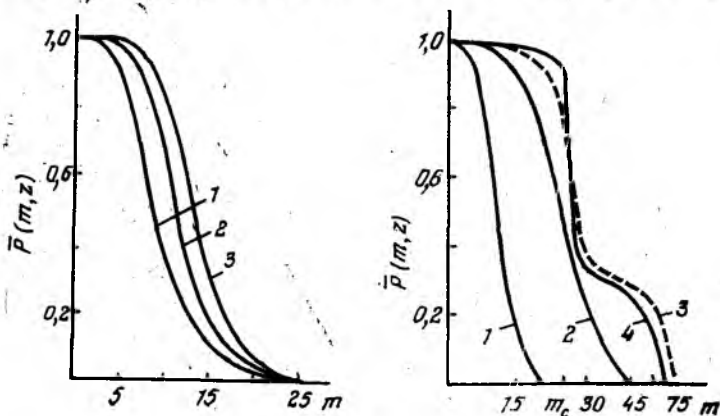
Статистические моды этого распределения претерпевают различные потери вдоль световода. При наличии достаточно длинного световода имеет место пространственно-установившийся режим для средней мощности в виде первой статистической моды. Для нахождения этого расстояния достаточно вычислить собственные значения первой и второй статистической моды.

Для анализа с помощью уравнения диффузии коротких световодов, находящихся в условиях пространственно-неустановившегося режима, необходимо использовать критерий, описанный в [4], который позволяет найти для каждой конкретной длины световода необходимое и достаточное число k_{\max} , определяющее верхний предел суммирования в уравнении (12).

Результаты исследования диффузии мощности в коротких нерегулярных световодах в условиях пространственно-неустановившегося режима, полученные данным методом без учета мод оболочки представлены на рис. 1 для длин световода 5 м — кривая 1, 20 м — 2 и 50 м — 3. Очевидна интенсивная диффузия мощности в области низших мод. Однако об изменениях распределения в области высших мод такая модель не дает достаточной информации, так как в коротких образцах световодов условие $\bar{P}(m_c) = 0$ не выполняется. Поэтому выражения (8) — (12), определяющие решение диффузионного уравнения, были использованы

ны совместно с предложенным расширенным граничным условием, позволяющим учесть моды оболочки.

На рис. 2 кривыми представлены характеристики, полученные при узконаправленном начальном распределении $\bar{P}(m, 0)$, — кривая 1; на длинах световода 5 м — 2; 50 м — 3; 100 м — 4. Оптико-геометрические параметры световода, как и в рассмотренном



выше случае, следующие: $2a=50$ мкм, $2b=125$ мкм, $t_d=500$ мкм, $E_1=60$ ГПа, $E_2=3,5$ ГПа, $E_3=1,5$ ГПа, $p=1$, $\kappa=0,2$ м⁻¹. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. На начальном отрезке световода имеет место интенсивная диффузия в области направляемых мод ($m \leq m_c$) — при $z=5$ м уширение характеристики по уровню $0,5 P_{\text{макс}}$ составило 113 %. При дальнейшем увеличении z становится заметной диффузия из направляемых мод в моды оболочки. В случае оптически менее плотного покрытия мощность этих мод может распространяться на всю длину внутриобъектовой ВОСП. Следует отметить, что при этом практически не изменяется характер распределения мощности по модам оболочки, а происходит лишь уменьшение абсолютных значений мощности (кривая 3, 4). Таким образом, у световодов с описанными выше оптико-геометрическими параметрами вследствие постепенного перераспределения мощности между направляемыми и оболочечными модами часть оптической мощности присутствует в оболочке и участвует в передаче оптического сигнала. Указанный режим можно считать целесообразным для внутриобъектовых ВОСП, однако окончательный вывод может быть сделан после определения величины потерь и дисперсии в таком световоде.

Список литературы: 1. Irving D. H., Karbowiak A. E. Power coupling between core and cladding of an optical fibre and its effect on measurements//Opt. and Quant. Electron. 1981. Vol. 13, N 15. P. 385—392. 2. Kashima N., Usida N. Excess loss caused by an outer layer in multimode step-index fibers: experiment//

- 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].