

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТОВОДОВ ПО ИЗМЕРЕННОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ

Основные геометрические параметры световодов, ширина полосы частот, диаметр модового поля, условия распространения одной моды, коэффициент связи световодов могут быть связаны с профилем показателя преломления. Для определения указанных параметров необходимо иметь прецизионный метод для измерения профиля показателя преломления. Сложность реализации этой задачи обусловлена малыми геометрическими размерами оптических волокон и малой разницей показателя преломления.

Анализируя распределение излучения на выходе волоконного световода, можно получить ряд его характеристик. Поле в плоскости излучения описывается функцией интенсивности

$$I(x, y, z) = \frac{n}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} |\vec{E}|^2, \quad (1)$$

распределение которой может быть легко измерено. Здесь \vec{E} – амплитуда электрической составляющей модового поля; n – показатель преломления среды.

Анализ интенсивности электрической составляющей оптического поля проводится либо в ближней, либо в дальней зоне. Метод анализа в ближней зоне сигнала, прошедшего через волокно, основан на измерении интенсивности прошедшего луча вблизи торца волновода. В нем использована та особенность проходящего излучения, что мощность, переносимая всеми модами оптического волокна через данную точку поперечного сечения, пропорциональна разности показателей преломления сердцевины в этой точке и оболочки при условии равномерного распределения мощности излучения в пределах апертуры. Данная особенность вытекает из решения волнового уравнения

$$\nabla^2 E(x, y, z) + k_0^2 n^2(x, y, z) \cdot E(x, y, z) = 0, \quad (2)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число в вакууме, λ_0 – длина волны в вакууме, $n(x, y, z)$ – профиль показателя преломления сердцевины. Существует множество решений данного уравнения в виде

$$E(x, y, z, t) = E(x, y) \cdot \exp[i(\omega t - \beta z)], \quad (3)$$

которые представляют собой уравнения мод. Здесь $\beta = \omega/v_\phi$ – постоянная распространения, ω и v_ϕ – угловая частота и фазовая скорость волны соответственно. При заданной частоте вид решения зависит от постоянной распространения β , значения которой дискретны и соответствуют определенным направляемым модам. Причем условием существования направляемых мод является неравенство

$$k_0 n_2 < \beta < k_0 n_1. \quad (4)$$

При описании введено понятие эффективного показателя преломления для каждой моды N_{eff} , который удовлетворяет условию

$$n_2 < N_{eff} < n_1. \quad (5)$$

В прямоугольной системе координат (использование которой объясняется применением двухкоординатного многоэлементного фотоприемника для восприятия излучения световода) волновое уравнение для поперечных составляющих электрического поля приобретает вид

$$\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial y^2} + (k^2 n^2(x,y) - \beta^2) \cdot E(x,y) = 0. \quad (6)$$

Отсюда получается соотношение для определения профиля показателя преломления по измеренному распределению амплитуды поля

$$n^2(x,y) = \frac{\beta^2}{k^2} - \frac{1}{k^2 \cdot E(x,y)} \cdot \left(\frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x,y)}{\partial y^2} \right). \quad (7)$$

Как отмечалось, данное уравнение соответствует отдельным модам при дискретных $\beta = k \cdot N_{эф}$. С другой стороны, при распространении некоторого количества мод измеряемая амплитуда электрического поля является величиной интегральной, созданной суперпозицией полей мод в данной точке поперечного сечения. Поэтому говорить о точном измерении абсолютных значений показателя преломления по данному методу невозможно. В этих условиях можно получить только функцию изменения показателя преломления. Также данная особенность усиливается тем, что показатель преломления является дисперсионной характеристикой и для кварцевых волокон в зависимости от длины волны тестирующего излучения может изменяться в диапазоне от 1.44 мкм до 1.52 мкм. Любой источник излучения обладает ненулевой шириной спектра $\Delta\lambda$, фотоприемник имеет достаточно широкую спектральную характеристику, что совместно с вышесказанным также обуславливает возможность измерения только пространственного изменения показателя преломления, а не его точных значений в точках поперечного сечения. Это обеспечивает возможность использования в уравнении (7) для задания постоянной распространения β в качестве $N_{эф}$ показателя преломления материала кварца и искать профиль показателя преломления, используя соотношение

$$n(x,y) = \Delta n(x,y) + n_s, \quad (8)$$

где n_s – показатель преломления материала сердцевины, $\Delta n(x,y)$ – профиль показателя преломления.

Следующие особенности определения профиля показателя преломления связаны с влиянием на распределение интенсивности поля таких явлений, как дифференциальное модовое ослабление из-за поглощения и рассеяния, трансформация мод и наличие вытекающих мод, а также температурные и механические воздействия на сами волокна и измерительную установку. На результаты измерения распределения поля значительное влияние также оказывает форма выходного торца световода.

Поглощение и рассеяние практически устраняются во всех современных световодах, обладающих низким уровнем затухания. Кроме того, для снижения данного влияния измерение распределения поля следует проводить на коротких отрезках волокна (около 1 м), что также способствует снижению межмодовой связи и трансформаций. Для устранения проникновения излучения в оболочку и снижения вклада вытекающих мод световод должен закрепляться в положении, исключающем изгибы. Однако в коротких волокнах вклад вытекающих мод максимален. На коротких отрезках обеспечить равномерное распределение энергии по модам (создать равновесное распределение возбуждающего модового состава) можно только с использованием специальных устройств, например, спирального фильтра мод.

Оптически плоские торцы получают технологией скола (поперечного надреза световода с последующим разрывом при его растяжении), так как даже при полировке мелкозернистыми алмазными пастами остаются дефекты поверхности в виде вырывов и мелких царапин,

что служит источником шума распределения интенсивности оптического поля. Дополнительными источниками значительных искажений служат загрязнения на поверхностях торца световода, линзах объектива и защитном стекле фотоприемника.

Установка для реализации метода ближнего поля содержит оптическую систему, многоэлементный ПЗС-фотоприемник, АЦП и управляющий персональный компьютер. Шаг расположения фоточувствительных элементов матрицы ФПЗС определяет разрешающую способность измерительной системы. При этом используется линзовая система с необходимыми параметрами, увеличивающая торец волокна, изображение которого сканируется телекамерой на основе многоэлементного фотоприемника с зарядовой связью. Для выполнения точных измерений необходимы прецизионная калибровка и совмещение оптики. В данном методе важная роль принадлежит числовой апертуре увеличивающей оптической системы: низкоапертурная оптика может производить неприемлемые отсчеты в пространственно-частотной области, вызывая большие ошибки в определении профиля показателя преломления. По этой причине должна использоваться оптика с $NA > 0,5$. Динамический диапазон систем контроля на основе NF-метода должен быть больше 40-45 дБ.

Описанные особенности обуславливают подверженность метода ближнего поля импульсному и высокочастотному шуму при измерении интенсивности (за счет неравномерности чувствительности и шумов ФПЗС, погрешностей аналого-цифрового преобразования, наличия загрязнений на торце и элементах оптической системы), что делает почти невозможным определить профиль показателя преломления непосредственно по измеренным данным. Основной задачей при разработке метода выступает создание эффективных методик обработки экспериментальных данных ввиду того, что оптическое излучение претерпевает несколько преобразований при прохождении от объекта до фотоприемника и подвергается воздействию описанных источников шума. Поле в плоскости фотоприемника является сверткой распределения напряженности модового поля по выходному торцу волокна и импульсной реакции системы $h(x, y)$. Поэтому при измерении распределения регистрируется линейная комбинация, описываемая в одномерном случае уравнением

$$g(y) = \int_{-\infty}^{\infty} h(y-t)E(t). \quad (9)$$

Обработка измеренных данных включает усреднение по результатам 10 измерений, нормировку и сглаживание для устранения высокочастотного шума. Затем амплитуда электрического поля используется в уравнении (7) для вычисления профиля показателя преломления. При этом на основе (7) и (8) использовано соотношение

$$\Delta n(x, y) = \sqrt{n_s^2 - \frac{1}{k^2 \cdot E(x, y)} \left(\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2} \right)} - n_s, \quad (10)$$

а с учетом правил численного дифференцирования выражение вида

$$\frac{1}{E(x, y)} \left(\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2} \right) = \frac{E_{i-1, j} - 2E_{i, j} + E_{i+1, j}}{E_{i, j} \cdot \Delta x^2} + \frac{E_{i, j-1} - 2E_{i, j} + E_{i, j+1}}{E_{i, j} \cdot \Delta y^2}, \quad (11)$$

где $E(x, y) = E_{i, j}$; Δx , Δy – горизонтальная и вертикальная разрешающие способности в измерении распределения амплитуды поля, обусловленные шагом между элементами ФПЗС и увеличением оптической системы, i и j – порядковые номера элементов матрицы распределения амплитуды поля.

Для устранения влияния на интенсивность ближнего поля возмущающих факторов в работе исследованы следующие методы:

- пространственное сглаживание измеренной интенсивности с использованием метода наименьших квадратов;
- использование цифровых фильтров нижних частот.

Определены вид и порядок аппроксимирующей кривой, количество точек при измерении интенсивности, шаг пространственной дискретизации. Восстановление проведено на базе ортогональных функций Лагерра [1]. На рис. 1 изображено измеренное с 10%-й погрешностью распределение амплитуды поля излучения дисперсионно модифицированного волокна W-типа, а на рис. 2 – результат его восстановления на базе ортогональных функций.



Рис. 1

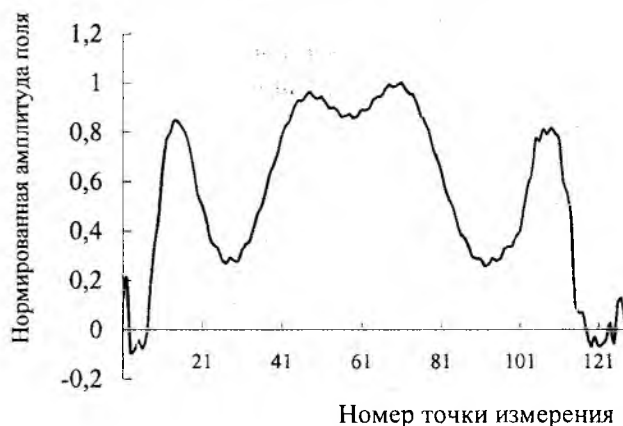


Рис. 2

Размерность базиса восстановления распределения поля определялась по результатам невязки измеренного и восстановленного профиля поля. Результаты экспериментов показали, что минимальное значения функционала достигается при 6...7-м порядках полинома восстанавливающей функции для гауссовых профилей и 18...20-м порядках для сложных профилей. Получено условие, которому должно удовлетворять количество отсчетов измеряемого распределения, достаточного для восстановления с заданной точностью. Выявлено, что для волокон с гауссовыми профилями достаточно осуществлять измерение в точках, которые отстоят друг от друга на $d = (0.5...0.75)\lambda$, где λ – длина волны измерения. Для более сложных профилей интервал должен быть уменьшен до величины $d = (0.05...0.25)\lambda$.

При разработке цифрового фильтра основной задачей является определение его передаточной функции. Для идеального фильтра нижних частот полное подавление высокочастотных составляющих вызывает значительное сглаживание и снижает разрешение в определении профиля показателя преломления. Очень важно сохранить разрешение сглаженного профиля в заданных пределах, особенно вблизи острых границ профиля, которые имеют локальный спектр с заметным высокочастотным содержанием. Использован фильтр Баттерворта с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{1}{(s+1) \cdot (s^2 + s + 1)}, \quad s = j \cdot \omega \quad (12)$$

для восстановления измеренного излучения ступенчатого волокна по типовому алгоритму фильтрации: БПФ \Rightarrow умножение АЧХ на передаточную характеристику фильтра такую, что более 99% мощности сигнала находится в пределах полосы пропускания \Rightarrow ОБПФ для перехода в пространственную область. Критерием выбора частоты среза (99%-е границы по мощности) является компромисс между подавлением шума и обеспечением требуемого разрешения в анализе сигнала. Кроме того, увеличение степени фильтрации не приводит к улучшению окончательной формы профиля показателя преломления. Эксплуатационные показатели фильтра измерены путем вычисления коэффициента подавления мощности $K_{под}$

$$K_{\text{под}} = \frac{P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (13)$$

где $P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}}$ – мощности на входе и выходе фильтра соответственно, интегрированные по всему поперечному сечению. Относительная погрешность (ε) между профилем на входе фильтра и сглаженным профилем получается из выражения

$$\varepsilon = \frac{\int_S |E_{\text{вых}} - E_{\text{вх}}| ds}{\int_S E_{\text{вх}} ds}, \quad (14)$$

где $E_{\text{вх}}, E_{\text{вых}}$ – нормированные интенсивности электрического поля на входе и выходе фильтра соответственно.

На рис. 3 показано распределение излучения ступенчатого оптического волокна, а на рис. 4 – результат применения фильтрации: исходный и восстановленный профили. Коэффициент подавления мощности, определяемый в соответствии с (13), составил $0.6 \cdot 10^{-2}$, а различие между исходным профилем и сглаженным – около 1%. Это подчеркивает, что фильтр не оказывает никакого побочного влияния на форму профиля распределения интенсивности и, в то же самое время, удаляет высокочастотные колебания. Реальный профиль не плоский и не может быть аппроксимирован ступенчатой функцией. Причины этого явления рассмотрены выше.

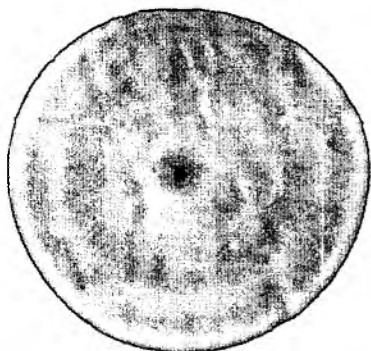


Рис. 3



Рис. 4

Предложенные методики легли в основу создания программного обеспечения для системы комплексного контроля параметров волоконно-оптических компонентов.

Список литературы: 1. Филипенко А.И. Метод анализа излучения оптических волокон // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьков: ХТУРЭ, 1997. Вып. 103. С. 26 – 30. 2. Невлюдов И.Ш., Филипенко А.И. Технологический контроль диаметра модового поля одномодовых оптических волокон // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 1998. № 1. С. 22 – 24.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 22.07.2002