

Измерение дисперсии в волоконных световодах с микроструктурированной оболочкой

А.Е.Левченко, А.С.Курков, С.Л.Семенов

На основе интерференционного метода создана установка для измерения спектральной зависимости хроматической дисперсии в световодах с микроструктурированной оболочкой. Установка позволяет проводить измерения в широком спектральном диапазоне (от 670 до 1550 нм) с учетом двулучепреломления в световоде. Результаты измерения дисперсии в стандартном световоде с помощью разработанной установки и с использованием промышленного прибора хорошо совпадают.

Ключевые слова: волоконные световоды, микроструктурированные световоды, хроматическая дисперсия.

1. Введение

Волоконные световоды с микроструктурированной оболочкой являются относительно новым типом оптических волокон. Их особенность заключается в формировании профиля показателя преломления благодаря наличию воздушных промежутков в отражающей оболочке. Это позволяет существенно увеличить разность показателей преломления сердцевины и оболочки, что приводит к кардинальному изменению нелинейных и дисперсионных характеристик световодов с микроструктурированной оболочкой по сравнению с обычными волоконными световодами. Вследствие этого микроструктурированные световоды могут использоваться в качестве компенсаторов дисперсии, устройств сжатия солитонов, усилителей и преобразователей оптического сигнала на основе нелинейных эффектов. Основные особенности таких световодов и результаты их применения рассмотрены, в частности, в работе [1] и монографии [2].

Длина волны нулевой хроматической дисперсии световодов с микроструктурированной оболочкой может изменяться в широком спектральном диапазоне (0.7–1.6 мкм) в зависимости от конкретной структуры волновода, поэтому спектральная зависимость хроматической дисперсии является одной из основных характеристик данных световодов. Цель настоящей работы заключалась в создании методики измерения дисперсионных характеристик световодов с микроструктурированной оболочкой. При этом принимались во внимание следующие требования: необходимость измерения в широком спектральном диапазоне, возможность измерения при высоком уровне оптических потерь (до сотен дБ/км), исследование световодов с диаметром сердцевины в диапазоне 1–10 мкм, а также учет поляризационных свойств исследуемого образца.

2. Выбор метода измерения

Практически все методы определения хроматической дисперсии основаны на измерении спектральной зависимости групповой задержки. Коэффициент хроматической дисперсии D волокна определяется по разности групповых задержек световых сигналов с различными длинами волн $\tau(\lambda)$ в волокне известной длины L с помощью формулы

$$D = \frac{1}{L} \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda}, \quad (1)$$

где λ – длина световой волны.

Разнообразие методов измерения хроматической дисперсии фактически определяется числом методов измерения временных задержек. В настоящее время наиболее распространены три основных метода измерения групповых задержек [3]: фазовый, импульсный и интерферометрический.

Фазовый метод состоит в сравнении фазы прошедшего через измеряемый световод сигнала с фазой опорного сигнала. Полученные сдвиги фаз $\varphi(\lambda)$ связаны с групповыми задержками формулой

$$\tau(\lambda) = \frac{\varphi}{2\pi f}, \quad (2)$$

где f – частота модуляции сигнала.

Измерения фазовой задержки проводятся на нескольких длинах волн. Обработка результатов измерения заключается в подборе функциональной зависимости $\tau(\lambda)$, значения которой на заданных длинах волн наиболее близки к измеренным значениям.

Развитием фазового метода является дифференциальный фазовый метод [4], когда измеряются относительные фазовые сдвиги и относительные задержки τ_1 и τ_2 для двух сигналов на соседних, близко расположенных длинах волн λ_1 и λ_2 . Дисперсия на длине волны $\lambda_{1/2}$, равной полусумме длин волн λ_1 и λ_2 , определяется линейной аппроксимацией по формуле

$$D(\lambda_{1/2}) = \frac{1}{L} \frac{\tau_1 - \tau_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (3)$$

А.Е.Левченко, А.С.Курков, С.Л.Семенов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kurkov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 9 июня 2005 г.

Типичная частота модуляции амплитуды оптического сигнала составляет десятки мегагерц, поэтому для обеспечения достаточной точности измерений минимальная длина измеряемого отрезка световода должна составлять примерно 1 км.

Импульсный метод определения хроматической дисперсии основан на прямом измерении задержки световых импульсов с различными длинами волн при прохождении через волокно заданной длины [5, 6]. Этим методом можно измерять времена задержки оптических импульсов при прохождении ими заданного участка волокна «туда и обратно», т. е. при отражении от удаленного конца световода. Так же как и в фазовом методе, необходима длина измеряемого отрезка составляет около 1 км, что определяется точностью измерения относительной временной задержки двух импульсов.

Интерференционный метод основан на измерении зависимости групповой задержки от длины волны в измеряемом волокне, введенным в плечо интерферометра. Существуют несколько модификаций интерференционного метода [7–14]. Существенное отличие интерференционного метода от импульсного и фазового заключается в том, что обычно измерение проводится на отрезке волокна субметровой длины (например, в [13] длина измеряемого образца составила 25.86 мм), что исключает влияние неоднородностей структуры по длине световода и позволяет с большей определенностью говорить о связи параметров структуры световода с хроматической дисперсией. Кроме того, величина оптических потерь в световоде оказывает существенно меньшее влияние на возможность измерения и его точность.

К недостаткам вышеупомянутых методов надо отнести невозможность корректно измерять двулучепреломляющие световоды, поскольку описанные выше методы дают некоторую усредненную величину коэффициента хроматической дисперсии для двух поляризаций. Однако для корректного описания нелинейных процессов, таких как четырехволновое смешение в волокнах, необходимо точно знать профиль дисперсионной кривой. Поэтому является необходимым создание установки, в которой можно измерять поляризационную дисперсию. К сожалению, промышленных приборов, позволяющих проводить измерения по одной поляризации, не существует. На основании анализа существующих методов измерения групповой задержки для экспериментальной реализации нами был выбран интерференционный метод.

3. Экспериментальная установка

Схема установки, идея которой взята из работ [11, 12], приведена на рис. 1. Интерферометр был собран по двухлучевой схеме. В одно из плеч интерферометра помещался исследуемый отрезок одномодового волоконного световода (ОВС) длиной около 50 см. В качестве точечного источника излучения использовался возбуждающий отрезок ОВС (обычно это был тот же световод, что и исследуемый образец), в который, в свою очередь, вводилось излучение от источника света. Отличительной особенностью целого класса микроструктурированных световодов является небольшой, от сотен нанометров и выше, диаметр сердцевины, что приводит к высоким потерям на ввод излучения в световод. Поэтому в качестве источников света использовались волоконный итербиевый суперлюминесцентный излучатель [15] и несколько

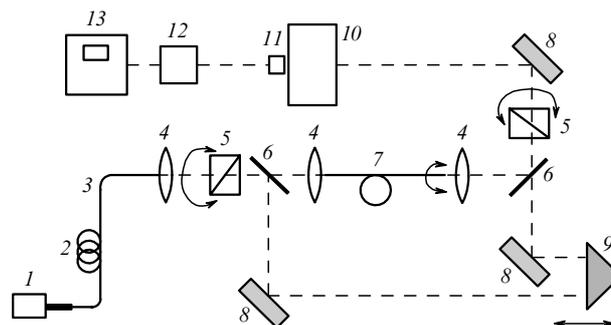


Рис.1. Схема установки:

1 – суперлюминесцентный источник; 2 – контроллер поляризации; 3 – одномодовый световод; 4 – объектив; 5 – поляризатор; 6 – светоделительная пластинка; 7 – исследуемый световод; 8 – 100 %-ное зеркало; 9 – 90-градусная призма на электромеханическом подвесе; 10 – монохроматор; 11 – фотоприемник; 12 – усилитель; 13 – осциллограф.

различных суперлюминесцентных диодов производства Superlum Diodes Ltd (Москва), что позволяло кусочно-непрерывно покрывать диапазон длин волн 670–1550 нм. Длина линии задержки (воздушного плеча интерферометра) регулировалась положением призмы 9 при помощи микрометрического винта. Кроме того, положение призмы модулировалось с помощью прецизионного электромеханического модулятора с амплитудой модуляции до 2 мм и частотой колебаний до 20 Гц.

В отличие от предыдущих работ, использование электромеханического модулятора с такой большой амплитудой модуляции позволило в реальном времени регистрировать интерференционную картину целиком, что, в свою очередь, в силу большого набора распределений дало возможность увеличить точность определения интерференционного максимума и значительно уменьшить влияние внешних воздействий в виде возможных турбулентных потоков в воздушном плече и вибраций оптического стола.

Интерференционный сигнал, возникавший при равенстве оптических путей в воздухе и в исследуемом световоде, регистрировался германиевым фотоприемником, находящимся за монохроматором. Типичная картина интерференции приведена на рис. 2. Особое внимание нами уделялось поддержанию одномодового режима возбуждения световода и сохранению поляризации при прохождении исследуемого образца. С этой целью использовались два поляризатора (призмы Глана), один из которых был установлен до входа в интерферометр, а второй – на выходе из него. Каждый поляризатор был помещен в оп-

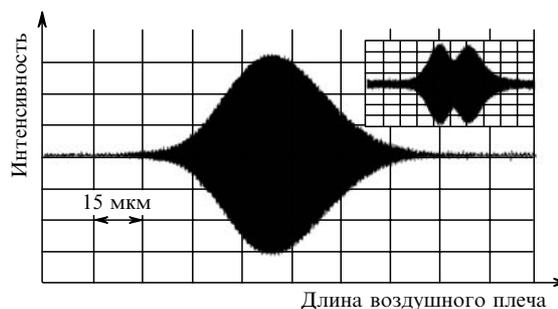


Рис.2. Типичный корреляционный сигнал в области нулевой дисперсии. На вставке – интерференционный сигнал в случае световода с сильным двулучепреломлением при неправильной юстировке поляризации излучения.

раву, позволяющую вращать его вокруг оптической оси. Вторым поляризатор использовался только при юстировке, а во время проведения измерений снимался.

Образцы микроструктурированных световодов обладают, как правило, заметным двулучепреломлением; например, величина двулучепреломления B в работе [16] составила 1.5×10^{-4} . Для увеличения видности интерференционной картины необходимо обеспечить совпадение поляризации излучения в интерферометре с осями двулучепреломления измеряемого световода; при этом поляризация на выходе световода должна быть параллельна поляризации излучения в воздушном плече интерферометра. Поляризатор на входе в интерферометр настраивался таким образом, чтобы степень поляризации на выходе из измеряемого волокна была максимальной. Последняя определялась путем вращения выходного поляризатора при перекрытом воздушном плече интерферометра. Крепление выходного конца исследуемого волокна позволяло вращать торец световода вокруг его оси и обеспечивать тем самым параллельность поляризации излучения на выходе волокна поляризации излучения в воздушном плече интерферометра. Контроллер поляризации на возбуждающем отрезке ОВС использовался для достижения максимального прохождения сигнала через первый поляризатор.

Использование электромеханического подвеса для модуляции положения призмы упростило контроль качества интерференционной картины на этапе юстировки интерферометра. Например, на вставке рис.2 показан интерференционный сигнал, возникновение которого обусловлено несовпадением поляризации входного излучения с поляризационной осью волокна и поляризации излучения с поляризацией в воздушном плече. Причем установка второго поляризатора позволяет убрать первый либо второй горб сигнала. Однако режим измерения с двумя поляризаторами приводит к спектральной селекции длин волн, что негативно сказывается на точности определения положения максимума интерференционной картины и соответственно приводит к увеличению погрешности интерполяции.

4. Результаты

Непосредственно в эксперименте измерялась спектральная зависимость относительного положения максимума интерференционного сигнала. Неточность в определении максимума составляла около ± 2 мкм. На рис.3 представлена соответствующая зависимость, полученная для образца Н04.09.14.10. Фотография торца световода показана на вставке рис.4. Диаметр сердцевины составлял 2.9 мкм, коэффициент заполнения $k = d/\Lambda$ для первого слоя отверстий был равен 0.75, для второго – 0.79 (d – диаметр отверстий, Λ – расстояние между их центрами). Потери излучения в основной моде на длине волны 1500 нм были менее 10 дБ/км. Для аппроксимации групповой задержки, как правило, использовался шестичленный полином вида

$$\tau(\lambda) = \frac{\Delta l(\lambda)}{c} = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2} + D\lambda^4 + F\lambda^{-4} + G\lambda^6 \quad (4)$$

(где $\Delta l(\lambda)$ – изменение длины воздушного плеча интерферометра с длиной волны); соответствующая ему кривая представлена на рис.3.

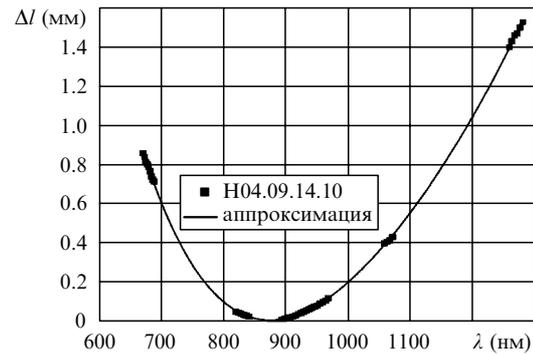


Рис.3. Спектральная зависимость положения максимума корреляционной функции для образца Н04.09.14.10.

Коэффициент хроматической дисперсии рассчитывался по формуле

$$D = \frac{1}{Lc} \frac{d\Delta l(\lambda)}{d\lambda}. \quad (5)$$

График дисперсии групповых скоростей для исследованного световода с микроструктурированной оболочкой представлен на рис.4. Длина волны нулевой хроматической дисперсии в данном образце составила 874 нм.

К недостаткам данной схемы измерения можно отметить то, что изначально интерферометр не является сбалансированным. Дисбаланс возникает из-за наличия в одном плече интерферометра двух микрообъективов, а в другом – 90-градусной стеклянной призмы. Поэтому размер призмы подбирался таким образом, чтобы оптический путь в ней был приблизительно равен оптическому пути в материале линз микрообъективов. Погрешность измерения групповой задержки вследствие оставшегося дисбаланса плеч по оценке составляет менее 0.5 %.

Для проверки правильности определения хроматической дисперсии на нашей установке было проведено исследование стандартного телекоммуникационного световода SMF 28 фирмы Corning. На рис.5 приведены графики дисперсии групповых скоростей для данного образца. Точками отображен результат измерения для 25-километрового отрезка световода с использованием промышленной установки CD 400 (PerkinElmer). Штриховой кривой показана зависимость $D(\lambda)$, представленная фирмой-изготовителем световода, и третья, сплошная ли-

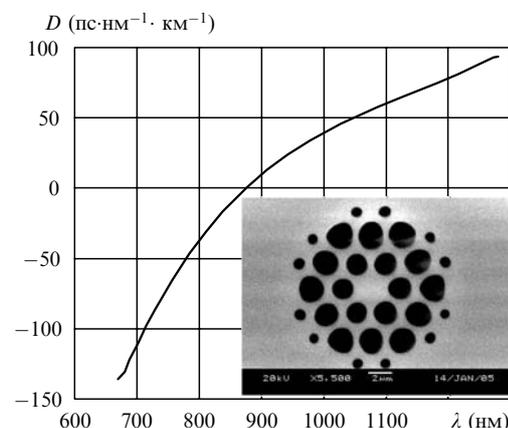


Рис.4. Спектральная зависимость хроматической дисперсии для образца Н04.09.14.10. На вставке – фотография торца световода.

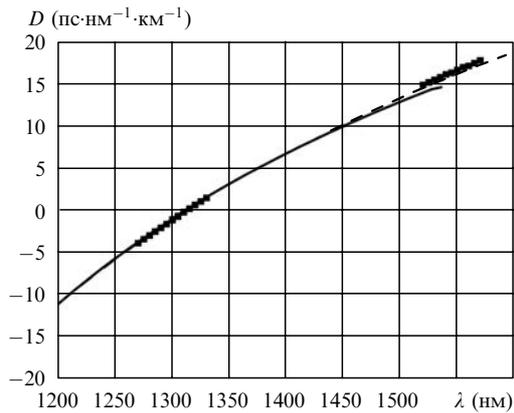


Рис.5. Зависимости дисперсии групповых скоростей для световода SMF 28. Точками представлено измерение, проведенное на установке CD 400, штриховая кривая – теоретическая зависимость, сплошная кривая – результат, полученный на разработанной установке.

ния, – это кривая $D(\lambda)$, измеренная на нашей установке. Разброс значений D в районе 1530 нм составил менее 4 %. Ошибка определения длины волны нулевой дисперсии нашим методом для волокна SMF 28 была равна 2 нм, причем эта ошибка может быть как ошибкой измерения, так и возникнуть из-за локального изменения формы световода. Полученные результаты позволяют сделать вывод о приемлемой точности измерения спектральной зависимости хроматической дисперсии.

5. Заключение

Таким образом, создана установка, позволяющая измерять с использованием интерференционного метода поляризационную спектральную зависимость хромати-

ческой дисперсии в коротком отрезке волоконного световода с микроструктурированной оболочкой. Установка позволяет проводить измерения в широком спектральном диапазоне (от 670 до 1550 нм). Модуляция длины воздушного плеча интерферометра дает возможность упростить процедуру юстировки интерферометра и измерения относительной задержки. Установка позволяет учитывать влияние двулучепреломления исследуемого световода. Для стандартного световода получено хорошее совпадение результатов измерения на разработанной установке и с использованием промышленного устройства.

1. Russell P. *Science*, **299**, 358 (2003).
2. Желтиков А.М. *Оптика микроструктурированных волокон* (М.: Наука, 2004).
3. Бородниковский А.М. *Lightwave Russian Edition*, **1**, 36 (2004).
4. Barlow A.J., Jones R.S., Forsyth K.W. *J. Lightwave Technol.*, **5**, 1207 (1987).
5. Cohen L.G., Lin C. *Appl. Opt.*, **16** (12), 3136 (1977).
6. Payne D.N., Hartog A.H. *Electron. Lett.*, **13** (21), 627 (1977).
7. Hen-Tai Shang. *Electron. Lett.*, **17** (17), 603 (1981).
8. Stone J., Marcuse D. *Electron. Lett.*, **20** (18), 751 (1984).
9. Bomberger W.D., Burke J.J. *Electron. Lett.*, **17** (14), 495 (1981).
10. Mengel F. *Electron. Lett.*, **20** (2), 66 (1984).
11. Tateda M., Shibata N., Seikai S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **17** (3), 404 (1981).
12. Белов А.В., Дианов Е.М., Курков А.С. *Квантовая электроника*, **13**, (8), 1680 (1986).
13. Gander M.J., McBride R., Jones J.D.C., Mogilevtsev D., Birks T.A., Knight J.C., Russel P.St.J. *Electron. Lett.*, **35** (1), 63 (1999).
14. Belov A.V., Kurkov A.S., Semenov V.A., Chicolini A.V. *J. Lightwave Technol.*, **7** (5), 863 (1989).
15. Грух Д.А., Богатырев В.А., Сысолятин А.А., Парамонов В.М., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34** (3), 247 (2004).
16. Folkenberg J.R., Nielsen M.D., Mortensen N.A., Jakobsen C., Simonsen H.R. *Opt. Express*, **12**, 956 (2004).