

Исследование двулучепреломления в анизотропных волоконных световодах методом поляризационной бриллюэновской рефлектометрии*

А.С.Смирнов, В.В.Бурдин, Ю.А.Константинов, А.С.Петухов,
И.Р.Дроздов, Я.С.Кузьминых, В.Г.Беспозванных

Параметр двулучепреломления, равный разности эффективных показателей преломления ортогональных поляризационных мод, является одним из основных параметров анизотропных одномодовых световодов, характеризующих возможность сохранения состояния линейной поляризации вводимого излучения. Этот параметр обычно измеряют на коротких отрезках волокна, однако такой метод является разрушающим и позволяет определять параметр двулучепреломления только на концах протяженного световода. В настоящей работе рассмотрено использование метода поляризационной бриллюэновской рефлектометрии для оценки однородности величины двулучепреломления по всей длине анизотропного световода.

Ключевые слова: двулучепреломление, сохраняющие поляризацию световоды, анизотропные световоды, бриллюэновская рефлектометрия.

1. Введение

Чтобы оценить пригодность протяженных отрезков анизотропного световода для применения в волоконно-оптических датчиках физических величин, важно иметь информацию об однородности поляризационных свойств вдоль всего световода. В работах [1, 2] рассмотрен метод на основе поляризационной рефлектометрии, позволяющий локализовывать области связи поляризационных мод и оценивать величину этой связи. Еще одной важнейшей характеристикой одномодовых анизотропных световодов, определяющей их поляризационную устойчивость, является параметр модового двулучепреломления $B = |n_x - n_y|$, где n_x и n_y – эффективные показатели преломления сердцевинны световода для ортогональных поляризационных мод. Двулучепреломление световодов обычно измеряется спектральными методами [3–5] или методами, в которых излучение, вводимое в световод, некоторым образом модулируется. Среди методов модуляции широко распространен метод локального давления [6]. В большинстве случаев для измерения двулучепреломления используются короткие (~ 1 м) отрезки волокна либо из-

меряется среднее значение двулучепреломления на протяженном отрезке волокна. Вследствие случайных изменений параметров световода, неизбежно возникающих в процессе вытяжки, параметр двулучепреломления (ДЛП) может изменяться вдоль длины исследуемого образца.

Двулучепреломление объемных кристаллических образцов уже исследовалось методом бриллюэновской рефлектометрии [7]. Бриллюэновское рассеяние – это рассеяние света в результате его взаимодействия с акустическими фононами. Смещение частоты рассеянного назад света [8]

$$f = 2nV/\lambda, \quad (1)$$

где n – эффективный показатель преломления среды; V – скорость звука; λ – длина волны света в вакууме. В [7] разность обыкновенного и необыкновенного показателей преломления была определена по разности бриллюэновских сдвигов частот для обыкновенного и необыкновенного лучей в кристаллическом образце. Аналогичные измерения могут быть проведены и для анизотропных световодов. В этом случае может быть получено распределение параметра ДЛП вдоль световода. Возбуждая последовательно сначала одну поляризационную моду, а затем другую, можно получить две бриллюэновские рефлектограммы. Разность этих рефлектограмм (бриллюэновских смещений частот) на каждом участке световода пропорциональна параметру двулучепреломления B :

$$f_x - f_y = \frac{2(n_x - n_y)V}{\lambda} = \frac{2BV}{\lambda}. \quad (2)$$

Основная цель настоящей работы – изучение возможности применения метода бриллюэновской рефлектометрии для неразрушающего исследования ДЛП вдоль анизотропных световодов типа «Панда». В световодах данного типа двулучепреломление возникает вследствие анизотропии поля внутренних напряжений, которое создается путем введения в волокно нагружающих элемен-

* Доложена на 6-м российском семинаре по волоконным лазерам, Новосибирск, 2014.

А.С.Смирнов, В.В.Бурдин. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990 Пермь, Комсомольский просп., 29; Пермский научный центр УрО РАН, Россия, 614990 Пермь, ул. Ленина, 13а; e-mail: a.s.smrnv@gmail.com, Ю.А.Константинов. Пермский научный центр УрО РАН, Россия, 614990 Пермь, ул. Ленина, 13а; e-mail: yuri.al.konstantinov@ro.ru А.С.Петухов, И.Р.Дроздов, Я.С.Кузьминых, В.Г.Беспозванных. Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990 Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: aleksandrfo09@rambler.ru, ivan91@59.ru, yaninakuzm@gmail.com, bvg1959@rambler.ru

Поступила в редакцию 16 июля 2014 г.; после доработки – 15 сентября 2014 г.

тов – стержней на основе боросиликатного стекла с большим коэффициентом теплового расширения, чем у кварцевого стекла.

2. Эксперимент

Экспериментальные исследования ДЛП вдоль анизотропного волоконного световода проводились на установке, оптическая схема которой представлена на рис.1.

Бриллюэновские рефлектограммы записывались с помощью бриллюэновского анализатора (БА) BOTDA Omnisens DiTeSt STA-R202, работа которого основана на явлении ВРМБ [8]. Параметры БА: рабочая длина волны 1550 нм, максимальное количество усреднений 10^4 , минимальное пространственное разрешение 1 м. Для характерных значений B анизотропного световода типа «Панда» $\sim 5 \times 10^{-4}$ и скорости звука в объемном образце кварцевого стекла $V \approx 5 \times 10^3$ м/с согласно (2) имеем $f_x - f_y \approx 3$ МГц. Исходя из этого шаг сканирования по частоте (частотное разрешение) БА был выбран равным 0.1 МГц. Для увеличения динамического диапазона и, следовательно, уменьшения шумовой составляющей сигнала длительность зондирующего импульса была принята равной 100 нс, а количество усреднений сигнала составило 10^4 . Заметим, что метод получения распределенного двулучепреломления ориентирован на протяженные (~ 1 км) отрезки анизотропных световодов. Поэтому при подборе параметров была поставлена задача как можно более точного определения разности между бриллюэновскими рефлектограммами двух поляризационных мод. При этом не было необходимости в высоком пространственном разрешении.

Для получения бриллюэновской рефлектограммы каждой поляризационной моды исследуемого световода к обоим его концам были приварены оптические поляризаторы с волоконными выходами, поляризационные оси которых параллельны оптической оси выбранной поляризационной моды. Параметры поляризаторов: рабочий диапазон длин волн 1550 ± 50 нм, минимальная экстинкция 30 дБ, максимальные потери 0.5 дБ. Сварка производилась на сварочном аппарате Fujikura PM-100 по алгоритму, описанному в [9].

Для наблюдения корреляции между разностью бриллюэновских сдвигов поляризационных мод и двулучепреломлением необходимо провести серию измерений световодов типа «Панда» с различным двулучепреломлением. Другой вариант – исследование световода с переменным по длине параметром ДЛП. Для проведения эксперимента был специально изготовлен световод со следующими параметрами: длина 450 м, коэффициент затухания оптического сигнала 1 дБ/км, длина волны отсечки 1054 нм, диаметр поля моды 6.9 мкм, диаметр оболочки 80 ± 2 мкм,

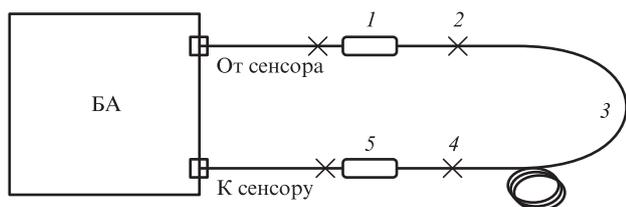


Рис.1. Экспериментальная установка:
1, 5 – оптические поляризаторы с волоконными выходами; 3 – исследуемый образец; 2, 4 – сварные соединения волоконных световодов, сохраняющих поляризацию, с ориентацией по оптическим осям.

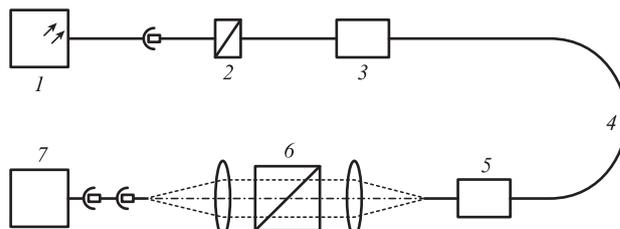


Рис.2. Установка спектрального метода определения ДЛП:
1 – широкополосный источник излучения; 2 – волоконный поляризатор; 3 – юстировочный столик, ориентирующий выход поляризатора для одинакового возбуждения обеих поляризационных мод анизотропного исследуемого световода; 4 – исследуемый образец; 5 – юстировочный столик; 6 – поляризационная призма Глана – Томсона; 7 – анализатор оптического спектра YOKOGAWA AQ6319.

характер изменения двулучепреломления по длине – линейный.

После измерений на БА была проведена проверка полученных данных. Анизотропный световод был разделен на фрагменты длиной ~ 50 м, и метровые отрезки каждого фрагмента были исследованы спектральным интерференционным методом [4], схема которого представлена на рис.2. Этим методом определяется длина биений поляризационных мод L_b , а затем рассчитывается ДЛП: $B = \lambda/L_b$.

Точность измерения B на данной установке в абсолютных единицах показателя преломления составляет 10^{-6} , что позволяет использовать ее для проверки представленного метода.

3. Обсуждение полученных результатов

На рис.3 приведены бриллюэновские рефлектограммы, снятые для обеих поляризационных мод исследуемого анизотропного световода «Панда». Данные рефлектограммы представляют собой зависимость частоты бриллюэновского сдвига от координаты z , измеряемой вдоль оси световода. Различие бриллюэновских смещений частоты поляризационных мод, равное примерно 3.5 МГц, обусловлено различием эффективных показателей преломления поляризационных мод. На рис.3 наглядно демонстрируется возможность визуального контроля двулучепреломления вдоль анизотропного световода, по крайней мере при $B \sim 5 \times 10^{-4}$. При $f_B \sim 10.58$ ГГц и характерном показателе преломления сердцевинки световода типа «Панда» ~ 1.47 оценка скорости звука по формуле (1) дает $V = 5580$ м/с.

Разность бриллюэновских рефлектограмм поляризационных мод представлена на рис.4. Разность бриллюэнов-

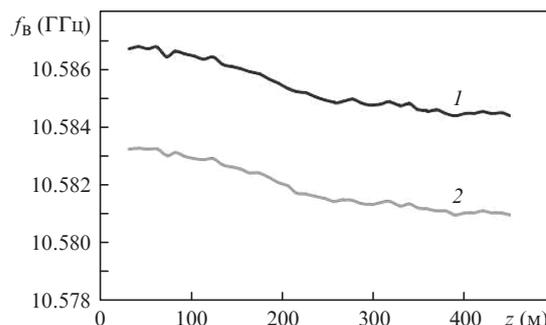


Рис.3. Зависимости частот бриллюэновского сдвига от координаты z для медленной (1) и быстрой (2) поляризационных мод.

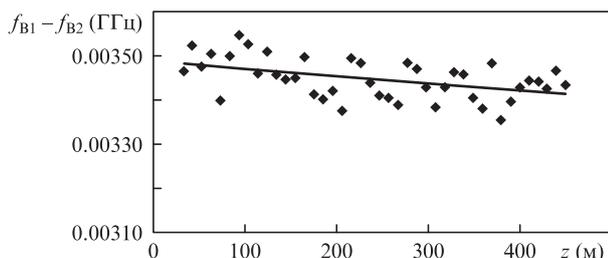


Рис.4. Разность бриллюэновских рефлектограмм поляризационных мод исследуемого анизотропного световода.

ских смещений частоты уменьшается вдоль световода примерно на 0.1 МГц (от 3.5 до 3.4 МГц). Частота 0.1 МГц в пересчете на единицы показателя преломления по формуле (1) соответствует примерно 10^{-6} . В связи с тем, что шаг частотного сканирования при записи бриллюэновских рефлектограмм составлял 0.1 МГц, зависимость на рис.4 сильно зашумлена. Можно говорить о том, что относительные изменения разности бриллюэновских смещений частоты вдоль световода не превышают 5%. Используя рассчитанную выше скорость звука, можно вычислить параметр двулучепреломления. Для смещений частот 3.5 и 3.4 МГц двулучепреломление $B = 4.86 \times 10^{-4}$ и 4.72×10^{-4} соответственно.

На рис.5 представлены результаты измерения двулучепреломления вдоль световода, полученные спектральным методом. Видно, что двулучепреломление уменьшается вдоль световода от 6.4×10^{-4} до 6.1×10^{-4} , относительное изменение ДЛП по-прежнему составляет примерно 5%, что соответствует результату, полученному из бриллюэновских рефлектограмм. Однако абсолютные значения разности $n_x - n_y$ примерно на 30% больше. Это можно объяснить механизмом получения ВРМБ, лежащего в основе работы бриллюэновского анализатора. В процессе ВРМБ в результате электрострикции индуцируются изменения плотности среды, которые в свою очередь приводят к модуляции показателя преломления [10]. Изменения показателя преломления, малые по сравнению с его исходным значением 1.47, по порядку величины сопоставимы с параметром ДЛП. Таким образом, заниженное значение B , полученное бриллюэновским методом, можно объяснить тем, что индуцированные значения показателя преломления различны для двух мод со взаимно ортогональной поляризацией.

Итак, используя результаты одних только бриллюэновских рефлектограмм, полученных в процессе ВРМБ, можно судить об относительных изменениях B , но точно определить его абсолютные значения невозможно. Поэтому для нахождения абсолютных значений параметра ДЛП по всей длине световода следует определить двулучепреломление на концах длинного световода каким-либо иным методом, а затем осуществить пересчет полученных на бриллюэновском анализаторе результатов.

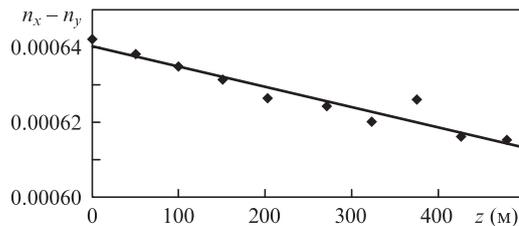


Рис.5. Распределение параметра ДЛП вдоль световода, измеренное спектральным методом.

4. Выводы

Полученные данные свидетельствуют о том, что метод поляризационной бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять неразрушающее исследование распределения параметра двулучепреломления на протяженных фрагментах анизотропных световодов. Точность определения разности смещений частот для поляризационных мод при шаге частотного сканирования 0.1 МГц соответствует точности спектрального метода и в абсолютных единицах показателя преломления составляет 10^{-6} . На данной стадии исследования можно заключить, что предлагаемый метод поляризационно-бриллюэновской рефлектометрии пригоден для экспресс-анализа распределенных поляризационных свойств по длине анизотропного световода на стадиях его исследования после вытяжки. Для дальнейшего развития метода необходима его отработка на большом количестве образцов с целью практического установления погрешности. Продолжением работы станет практическое сравнение предлагаемой методики со способами измерения ДЛП по длине анизотропного световода, представленными другими авторами.

Авторы благодарят А.А.Фотиади (Université de Mons) за плодотворные дискуссии и ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» за изготовление световода с заданными свойствами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Пермского края и Пермской научно-производственной приборостроительной компании в рамках научного проекта № 14-42-08009 р_офи_м.

1. Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Первадчук В.П., Смирнов А.С. *Квантовая электроника*, **43**, 531 (2013).
2. Бурдин В.В., Константинов Ю.А., Первадчук В.П., Смирнов А.С. *Фотон-Экспресс-Наука-2013*, **6**, 173 (2013).
3. Rashleigh S.C. *Opt. Lett.*, **8**, 336 (1983).
4. Rashleigh S.C. *Opt. Lett.*, **7**, 294 (1982).
5. Shlyagin M.G., Khomenko A.V., Tentori D. *Opt. Lett.*, **20**, 869 (1995).
6. Takada K., Noda J., Ulrich R. *Appl. Opt.*, **24**, 4387 (1985).
7. Lee S., Hwangbo C.K. *J. Opt. Soc. Korea*, **5**, 67 (2001).
8. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996, с.257).
9. Константинов Ю.А., Солдатов П.Н., Смирнов А.С. *Фотон-Экспресс-Наука-2013*, **6**, 308 (2013).
10. Buckland E.L., Boyd R.W. *Opt. Lett.*, **21**, 1117 (1996).