

Поляризационная рефлектометрия анизотропных волоконных световодов

Ю.А.Константинов, И.И.Крюков, В.П.Первадчук, А.Ю.Торошин

С помощью рефлектометра и присоединенного к нему интегрально-оптического поляризатора исследуются анизотропные волоконные световоды, сохраняющие поляризацию излучения. Линейно поляризованные импульсы вводятся в исследуемый световод при различных углах между его главной оптической осью и плоскостью поляризации импульса. Специально разработанная методика корреляционного анализа поляризационных рефлектограмм позволяет повысить достоверность полученной информации об оптической однородности анизотропных волоконных световодов по длине.

Ключевые слова: рефлектометрия, волоконная оптика, сохраняющие поляризацию световоды, корреляционный анализ.

Анизотропные (сохраняющие поляризацию введенного в них излучения) световоды нашли широкое применение в волоконно-оптических датчиках физических величин. Особенно важна их роль в волоконно-оптических гироскопах (ВОГ), точность которых в значительной степени определяется параметрами этих световодов, в частности двулучепреломлением. Еще одним важным требованием к качеству анизотропных световодов является их однородность по длине. Только при выполнении этого условия можно обеспечить требование взаимности, являющееся фундаментальным в теории ВОГ [1, 2].

Методики контроля однородности волоконных световодов достаточно хорошо разработаны [3]. Обычно они реализуются с помощью оптической рефлектометрии при использовании стандартного оборудования. Зондирующие оптические импульсы (они, в частности, могут быть линейно поляризованными) вводятся в исследуемый световод, а затем регистрируется обратное рассеяние излучения. Таким способом выявляются и локализуются все оптические неоднородности на пути распространения импульсов по всей длине световода.

Для заведомо неоднородных по структуре анизотропных световодов получили развитие поляризационная [3] и низкокогерентная рефлектометрия [4, 5]. Эти методики позволяют значительно более точно, чем стандартные, анализировать обратное рассеяние в сложных структурах.

В данной работе предлагается еще один вариант повышения точности анализа структуры анизотропных световодов. Контроль световодов типа «Panda» (ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания») проводился модифицированным методом поляризационной рефлектометрии; при этом для повышения объективности выявления и локализации дефектов была

Ю.А.Константинов, И.И.Крюков, В.П.Первадчук, А.Ю.Торошин. Институт фотоники и оптоэлектронного приборостроения, Пермский государственный технический университет, Россия, 614990 Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: nworhm@rambler.ru, root@ppk.perm.ru, pervadchuk@mail.ru

Поступила в редакцию 25 июня 2009 г., после доработки – 23 сентября 2009 г.

использована специально разработанная методика корреляционного анализа полученных результатов. Метод предназначен для детального исследования особо ответственных световодов и волоконно-оптических компонентов.

Исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Чтобы вывести исследуемый световод из мертвой зоны рефлектометра (Photon Kinetics 8000), к его выходу была присоединена балластная катушка со стандартным одномодовым волокном (Corning SMF28) длиной 800 м. К выходному концу балластной катушки был приварен волоконный выход интегрально-оптического поляризатора на подложке из ниобата лития. Торцы другого волоконного выхода интегрального поляризатора и исследуемого световода состыковывались через иммерсионную жидкость.

Параметры исследуемого световода следующие.

Длина (м)	3360
Затухание оптического сигнала (дБ/км)	1.2
Длина волны отсечки (нм)	1210
Диаметр поля моды (мкм)	6.9
h -параметр (м^{-1})	3.2×10^{-6}
Двулучепреломление	5.5×10^{-4}

После проведения каждого измерения осуществлялся поворот световода вокруг его центральной оси на угол

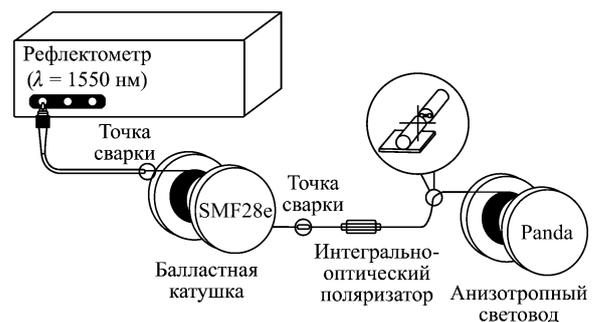


Рис. 1. Схема установки.

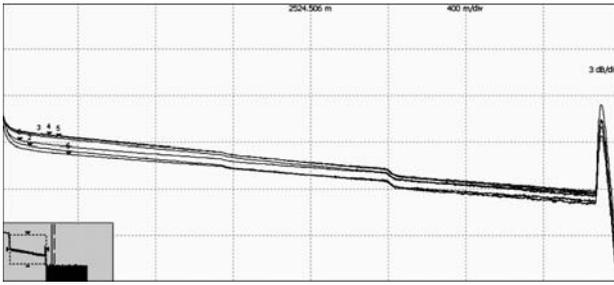


Рис.2. Рефлектограммы анизотропного световода при различных углах между его главной оптической осью и плоскостью поляризации входного импульса.

30°, поэтому каждому исследуемому световоду соответствовала серия из 6 рефлектограмм.

Затем проводилась обработка полученных данных. Поскольку программное обеспечение, поставляемое в комплекте с рефлектометром, не приспособлено для экспорта зарегистрированных рефлектограмм в распространенные форматы, для их анализа и обработки нами были созданы специальные программные средства.

Типичные рефлектограммы, полученные на экране прибора, приведены на рис.2. Участки, соответствующие балластной катушке, исключены.

Локальные особенности рефлектограмм («события») соответствовали как обычным для рефлектометрии неоднородностям оптических потерь, так и локальным неоднородностям анизотропии световода. Последние чаще всего вызываются нарушениями геометрии световода либо иными технологическими причинами (изгибами малого радиуса, перехлестами при намотке, локальными сжатиями или растяжениями). Вопрос об уровне допустимости выявленных неоднородностей может быть решен после соответствующих количественных оценок и конструкторских испытаний световодов, используемых в различных волоконно-оптических компонентах и изделиях.

Характер полученных рефлектограмм говорит о повторяемости дефектов структуры анизотропных световодов при различных углах между плоскостью поляризации зондирующего импульса рефлектометра и оптической осью световода. Различающийся уровень сигналов объясняется погрешностями юстировки при вводе излучения в световод. Нужно, однако, отметить относительно высокий уровень зашумленности рефлектограмм на участках с анизотропным световодом. В силу этого непосредственный их анализ оказывается затруднительным. Смысл последующей обработки рефлектограмм заключается в сведении их набора к одной функции, максимумам которой с высокой достоверностью соответствуют структурные неоднородности световода.

Для дальнейшего исследования рефлектограмм, представляющих собой после первичного преобразования дискретные функции линейной координаты световода, определялся коэффициент их взаимной корреляции. Общая горизонтальная ось всех шести рефлектограмм была разбита на отрезки одинаковой длины. Коэффициенты корреляции рассчитывались для каждой пары рефлектограмм на каждом из отрезков по известной формуле [6]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\left(\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right)^{\frac{1}{2}}},$$

где u, v – исходные значения функций сигналов, а \bar{u}, \bar{v} – их средние значения на отрезке.

Таким образом, для каждого отрезка (участка световода) были определены 15 коэффициентов. Далее рассчитывалось среднее значение коэффициента взаимной корреляции поляризационных рефлектограмм на каждом участке световода. Выбор длины такого участка, очевидно, зависит от поставленной задачи и размеров исследуемых неоднородностей.

Предполагалось, что в отсутствие «события» на выбранном участке световода рефлектограммы некоррелированы в силу случайности процесса рассеяния (участок однороден). Напротив, относительно высокое значение коэффициента корреляции на каком-либо из отрезков световода дает основания предполагать наличие неоднородности, регулярным образом меняющей соответствующие рефлектограммы.

Результаты, полученные при расчете по вышеописанному методу, представлены на рис.3. На участке 1 (балластная катушка) средний коэффициент корреляции рефлектограмм высок (близок к единице) ввиду высокой однородности изотропных световодов, малой зашумленности рефлектограмм и практически полной их идентичности. Коэффициент корреляции на участке 2 (участок исследуемого световода, на котором не выявлено неоднородностей) намного ниже (0.8–0.4), постепенное его снижение, скорее всего, обусловлено инструментальными погрешностями метода – зависимостью степени «зашумленности» рефлектограммы от уровня сигнала. «Событие» – пережатие (микроизгибы) световода (участок 3) – отображается на рефлектограмме в виде незначительного падения сигнала, а на коррелограмме в виде отчетливого пика с коэффициентом корреляции, равным 0.8. На участке 4 показано «событие» – изгиб световода (перехлест витков) на катушке. Коэффициент взаимной корреляции равен ~0.9. При отражении от свободного торца волоконного световода (участок 5) коэффициент взаимной корреляции составил ~0.98.

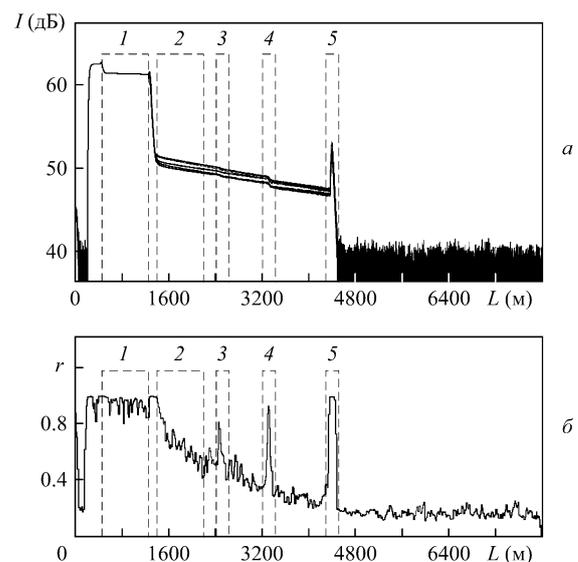


Рис.3. Рефлектограммы (а) и коррелограмма (б) анизотропного световода: 1 – балластная катушка; 2 – участок исследуемого световода, на котором не выявлено неоднородностей; 3 – «событие» (пережатие световода); 4 – «событие» (изгиб световода на катушке); 5 – отражение от свободного торца.

Таким образом, разработанная методика корреляционного анализа поляризационных рефлектограмм позволяет существенно повысить точность локализации и количественной оценки оптических неоднородностей анизотропных световодов. При этом достигается очень важная для производителей и потребителей волоконных световодов практическая цель – отбраковка относительно простыми инструментальными средствами образцов, непригодных к использованию в точных измерительных системах.

Эта же методика, очевидно, может быть применена и для решения другой важной задачи – контроля качества намотки волоконных компонентов на основе ани-

зотропных световодов, в первую очередь чувствительных элементов оптоволоконных датчиков.

1. Lefevre H.C. *The Fiber Optic Gyroscope* (Boston: Artech House, 1993).
2. Андропова И.А., Малыкин Г.Б. *УФН*, **172** (8), 849 (2002).
3. Листвин А.В., Листвин В.Н. *Рефлектометрия оптических волокон* (М.: ЛЕСАРпт, 2005).
4. Davé D.P., Akkin T., Milner T.E. *Opt. Lett.*, **28**, 1775 (2003).
5. Волков П.В., Иванов В.В., Маркелов В.А., Новиков М.А., Уставщиков С.С. В сб. *Труды Научной конференции по радиофизике. Квантовая радиофизика и оптика* (Нижний Новгород : ННГУ, 2005, с. 377).
6. Гудмен Дж. *Статистическая оптика* (М.: Мир, 1988).