

## Детектирование и локализация дефектов сохранения поляризации в анизотропном волоконном световоде

В.В.Бурдин, Ю.А.Константинов, В.П.Первадчук, А.С.Смирнов

*Одним из наиболее важных требований к оптическим световодам как к средам, по которым распространяется излучение, является их однородность. В анизотропных световодах, сохраняющих поляризацию излучения, имеет место особый тип неоднородностей – неоднородности, приводящие к связи поляризационных мод. При этом часть оптического излучения перекачивается из одной поляризационной моды в другую, ортогональную ей. Рассматривается способ обнаружения и локализации подобных неоднородностей в анизотропном одномодовом световоде типа «панда». Измерения проводились методом поляризационной рефлектометрии.*

**Ключевые слова:** сохраняющие поляризацию световоды, рефлектометрия, однородность.

Анизотропные (сохраняющие поляризацию введенного излучения) световоды предназначены для работы в интерферометрических (фазочувствительных) устройствах, таких как волоконно-оптические датчики на основе интерферометра Саньяка. Сохранение фазы сигналов в рассматриваемых устройствах определяется в основном свойством световода сохранять состояние поляризации вводимого линейно поляризованного излучения. Для контроля качества анизотропных волоконно-оптических световодов существует целый ряд хорошо разработанных методик. Следует отметить интерференционные методы измерения параметров анизотропных световодов [1, 2], имеющие большую чувствительность по сравнению со стандартными рефлектометрическими методиками [3, 4]. Тем не менее различные модификации метода оптической рефлектометрии всегда привлекают тем, что они позволяют определить распределение дефектов по длине световода.

В методе поляризационной рефлектометрии отраженное излучение, перед тем как попасть на приемник, проходит через поляризатор, и по его мощности можно судить о поляризационном состоянии излучения при его распространении вдоль оптического волокна. Этот метод позволяет, например, определить распределение двулучепреломления вдоль одномодовых изотропных световодов и поляризационную модовую дисперсию [5, 6]. В настоящей работе предложена методика выявления и локализации дефектов в анизотропных световодах, приводящих к перекачке излучения из одной моды в другую, ортогональную ей, на основе поляризационной рефлектометрии. В обычных рефлектограммах данный тип дефектов не проявляется. Вероятной причиной дефектов сохранения поляризации являются случайные флуктуации двулучепреломления, неизбежно возникающие в процессе произ-

водства волокна, которые становятся сопоставимыми с величиной встроенного двулучепреломления на дефектных участках анизотропного световода.

В работе [7] была предложена методика корреляционного анализа поляризационных рефлектограмм, повышающая достоверность информации об оптической однородности анизотропных световодов по длине. Рефлектограммы были получены при различных углах ориентации поляризатора, размещенного между исследуемым волокном и рефлектометром. При этом данные углы не контролировались. Локальные особенности рефлектограмм («события») отражают как обычные неоднородности оптических потерь, так и локальные неоднородности анизотропии световодов. При корреляционной обработке проявляются только дефекты, повторяющиеся на различных рефлектограммах. Подобная обработка рефлектограмм не позволяет отличить дефекты, приводящие к перекачке излучения между двумя ортогональными модами, от дефектов иного типа. Для решения таких задач перспективно использовать модифицированный метод поляризационной рефлектометрии. Контролируя угол между вектором электрического поля (электрическим вектором) линейно поляризованного излучения и оптическими осями анизотропного световода, можно обнаружить дефекты, связанные с нарушением сохранения поляризации света и оценить мощность излучения, перешедшего в ортогональную моду. При этом особую роль играют «события», проявляющиеся не одинаковым, а различным образом на рефлектограммах, полученных при различных углах между электрическим вектором поляризованного излучения и оптическими осями анизотропного световода.

Исследования проводились на установке, схема которой приведена на рис.1. Данная схема позволяет контролировать угол между электрическим вектором линейно поляризованного излучения и оптическими осями анизотропного световода. К рефлектометру (Photon Kinetics 8000, спектральная ширина источника излучения 4.7 нм, длина волны 1550 нм, динамический диапазон 30 дБ) оптически присоединена катушка с телекоммуникационным одномодовым волокном (Corning SMF-28) для выведения исследуемого анизотропного волокна из мертвой зоны ре-

**В.В.Бурдин, Ю.А.Константинов, В.П.Первадчук, А.С.Смирнов.**  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990 Пермь, Комсомольский просп., 29;  
e-mail: nworhm@rambler.ru, a.s.smrnv@gmail.com

Поступила в редакцию 1 августа 2012 г., после доработки – 30 октября 2012 г.

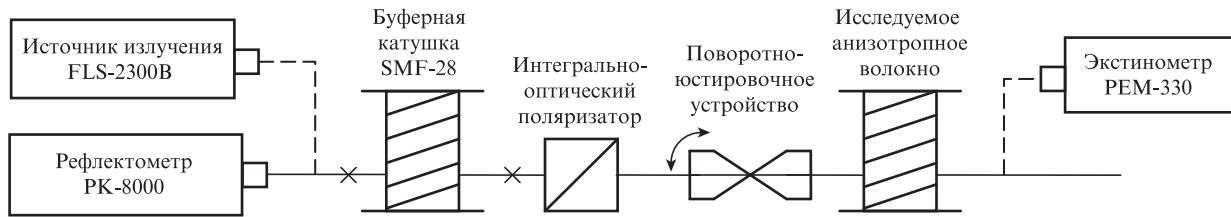


Рис.1. Схема установки.

флектметра. К буферной катушке приварен волоконный выход интегрально-оптического поляризатора с подложкой из ниобата лития (коэффициент поляризационной экстинкции 32.5 дБ). Второй волоконный выход поляризатора размещен в поворотном-юстировочном устройстве для стыковки через иммерсионную жидкость с исследуемым анизотропным волокном. Перед проведением измерений оптическая ось интегрально-оптического поляризатора ориентировалась относительно оптических осей исследуемого анизотропного световода с помощью экстинмометра. Для этого входной конец световода подключался к источнику непрерывного излучения (Exfo FLS-2300B) с той же длиной волны, что и используемая в рефлектометре, а выходной конец – к экстинмометру (Santec PEM-330, спектральный диапазон 1260–1630 нм, ошибка определения коэффициента поляризационной экстинкции не превышает 0.3 дБ), что соответствует классической схеме измерения коэффициента экстинкции [8]. По величине коэффициента экстинкции определялась ориентация поляризатора по отношению к оптическим осям анизотропного световода. Углом 0 и 90° соответствует максимальный коэффициент экстинкции, а углам 45° и –45° – минимальный.

В качестве объектов исследования были взяты образцы одномодового световода типа «панда», сохраняющего поляризацию, со следующими параметрами: длина волны отсечки  $1.40 \pm 0.05$  мкм, диаметр модового поля  $7.8 \pm 0.9$  мкм (на длине волны  $\lambda = 1.55$  мкм), величина двулучепреломления  $(6.6 \pm 0.6) \times 10^{-4}$  (на  $\lambda = 1.55$  мкм).

Рефлектограммы записывались длине импульса 20 м. Это обеспечивало достаточный динамический диапазон и низкий уровень зашумленности рефлектограмм. Длины  $L$  всех исследуемых образцов анизотропного волокна «панда» составляли  $\sim 1000$  м, а коэффициенты затухания  $\alpha$  варьировались в пределах 0.6–1.8 дБ/км. Погрешность определения коэффициентов затухания не превышала 0.01 дБ/км. Все измерения проводились на  $\lambda = 1.55$  мкм с обоих концов волокна.

В результате экспериментов было установлено, что затухание сигнала в световоде, регистрируемое рефлектометром, зависит от угла между электрическим вектором линейно-поляризованного излучения и оптическими осями анизотропного световода. Наибольшее затухание наблюдается, когда излучение поляризовано вдоль одной из осей световода, т. е. при вводе излучения, поляризованного под углом 0 (90°) к оси. Наименьшее затухание (близкое, в пределах точности измерений, к затуханию в схеме без поляризатора) регистрируется при вводе излучения, поляризованного под углом 45° (–45°) к оси.

На рис.2 представлены рефлектограммы образца 1 (табл.1), полученные при введении излучения, поляризованного под углами 0 (90°) и 45° (–45°) к выбранной оптической оси световода. Рефлектограммы, полученные для излучения, поляризованного под углом 0 (90°), имеют больший наклон. Кроме того, следует отметить, что реф-

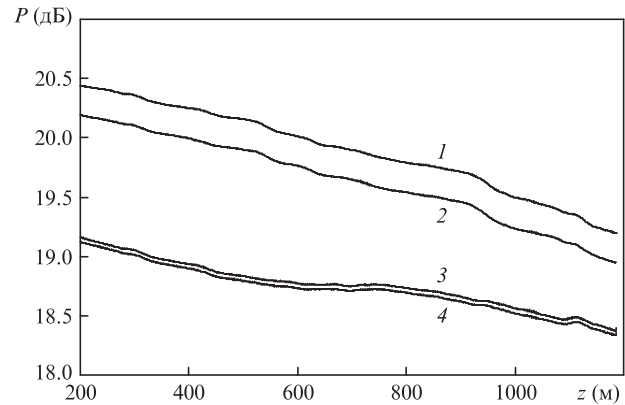


Рис.2. Рефлектограммы, полученные при ориентации поляризатора под углами 0 (1), 90° (2), 45° (3) и –45° (4) к выбранной оптической оси анизотропного световода ( $P$  – относительная мощность излучения на приемнике рефлектометра,  $z$  – координата вдоль оси световода). Участок  $z = 0$ –200 м, соответствующий мертвой зоне рефлектометра по затуханию, здесь и на рис.3–5 не показан.

Табл.1. Характеристики исследованных световодов.

Образец	$L$ (м)	$\alpha$ (дБ/км)	$\alpha_0$ (дБ/км)	$\Delta\alpha$ (дБ/км)	$h$ ( $10^{-5} \text{ м}^{-1}$ )
1	1186	1.14	0.67	0.47	7.34
2	1190	1.61	1.31	0.30	5.42
3	1086	0.76	0.65	0.10	1.79
4	1194	1.42	1.04	0.38	6.65
5	1092	1.36	1.28	0.07	1.74

Примечание:  $h$  – параметр анизотропного световода, характеризующий его способность сохранять линейную поляризацию излучения.

лектограммы, полученные при поляризации излучения под углами 0 (90°) и 45° (–45°), имеют разные профили затухания.

Коэффициенты затухания  $\alpha_0$  и  $\alpha$ , найденные из рефлектограмм при вводе в волокно излучения, поляризованного под углами 45° (–45°) и 0 (90°) соответственно, определяются выражениями

$$\alpha_0 = \frac{1}{2}[\alpha'_{in}(45^\circ) + \alpha'_{in}(-45^\circ)] + \frac{1}{2}[\alpha'_{out}(45^\circ) + \alpha'_{out}(-45^\circ)],$$

$$\alpha = \frac{1}{2}[\alpha'_{in}(0) + \alpha'_{in}(90^\circ)] + \frac{1}{2}[\alpha'_{out}(0) + \alpha'_{out}(90^\circ)],$$

где  $\alpha'_{in,out}(\theta)$  – затухание, полученное из участка рефлектограммы от  $z = L/2$  до  $z = L$ , снятой с внутреннего (in) и наружного (out) концов световода при угле  $\theta$  между электрическим вектором линейно поляризованного излучения и оптической осью световода.

В первом случае возбуждаются обе поляризационные моды световода, и мощность излучения, приходящего к рефлектометру, есть сумма мощностей двух обратно рас-

сеянных поляризационных мод, ослабленных в соответствии с законом Малюса. При этом поляризатор работает в качестве аттенюатора, и профиль получаемой рефлектограммы аналогичен профилю обычной рефлектограммы, т. е. соответствует потерям за счет рэлеевского рассеяния. Во втором случае возбуждается только одна поляризационная мода, и к рефлектометру приходит излучение только этой обратно рассеянной поляризационной моды. При этом на рефлектограмме будет наблюдаться затухание как за счет рэлеевского рассеяния, так и за счет перекачки излучения в невозбужденную моду. Таким образом, разность коэффициентов затухания  $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$  определяет дополнительные потери, связанные с перекачкой мощности излучения между поляризационными модами, и экспериментально регистрируется рефлектометром (рис.2, табл.1).

Поскольку потери  $\Delta\alpha$  связаны с перекачкой мощности излучения между ортогональными модами, они должны коррелировать с  $h$ -параметром волокна. Эта корреляция была обнаружена нами экспериментально для более чем двадцати образцов анизотропного световода «панда». В табл.1 представлены данные для пяти образцов. Величина  $\Delta\alpha$  увеличивается с возрастанием  $h$ -параметра анизотропного световода, который определялся стандартным способом по измерениям коэффициентов поляризационной экстинкции световодов из соотношения

$$\frac{P_2(z)}{P_1(z) + P_2(z)} = \frac{1}{2}[1 - \exp(-2hz)],$$

где  $P_1$  – мощность излучения во входной поляризационной моде 1, а  $P_2$  – мощность в моде 2, перешедшая из моды 1. Таким образом, разность рефлектограмм, полученных при ориентации поляризатора под углами  $0$  ( $90^\circ$ ) и  $45^\circ$  ( $-45^\circ$ ) (рис.3), представляет собой распределение по длине световода дополнительных потерь  $\Delta\alpha$ , связанных с перекачкой мощности излучения основной возбужденной моды в ортогональную ей.

На рис.3 представлены разности рефлектограмм для образца 1 (табл.1). Форма кривых обусловлена затуханием излучения вследствие связи поляризационных мод. При  $z \approx 500, 600, 700, 900$  и  $1100$  м явно наблюдаются «ступеньки», связанные с поляризационными дефектами световода.

Для более наглядного представления о распределении поляризационных дефектов удобно построить графики

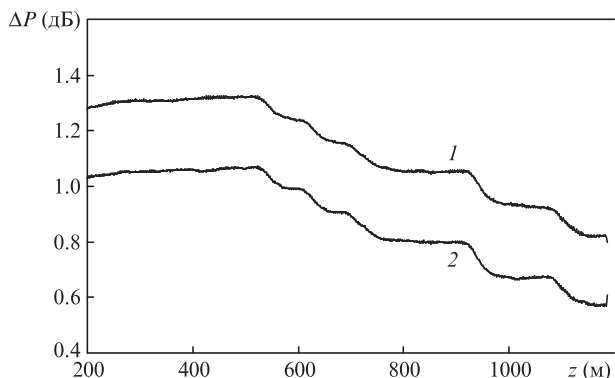


Рис.3. Разности рефлектограмм, полученных при ориентации поляризатора под углами  $0$  и  $45^\circ$  (1),  $90^\circ$  и  $45^\circ$  (2) к выбранной оптической оси анизотропного световода.

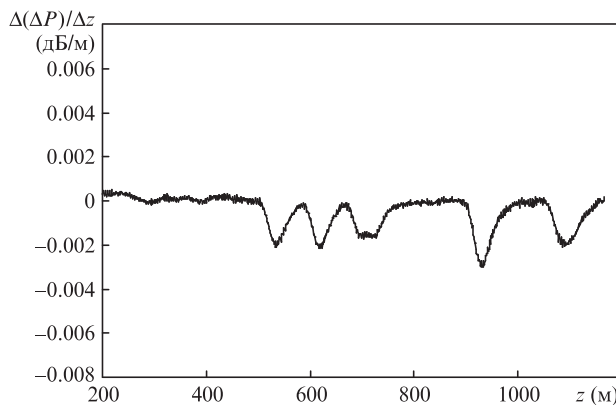


Рис.4. Производная разности рефлектограмм  $\Delta P$  по длине световода для образца 1 (табл.1).

производных кривых, приведенных на рис.3, по длине световода. Возможным представляется также вычисление коэффициента взаимной корреляции, как и в работе [7], однако выбор производной в нашем исследовании обусловлен дальнейшей необходимостью автоматизации поиска и локализации дефектов, а также удобством их количественного описания. Данный метод к тому же достаточно прост в реализации и не требует масштабных системных ресурсов при вычислениях.

Для образца 1 производная разности рефлектограмм, снятых при ориентации поляризатора под углами  $0$  и  $45^\circ$ , показана на рис.4. Она рассчитывалась как разность близких значений из массива данных по разности рефлектограмм. При этом для уменьшения шумов подбиралась оптимальная длина шага, которая оказалась примерно равной длине сканирующего импульса.

Площадь под пиками на рис.4 пропорциональна суммарному затуханию сигнала. Таким образом, мы получаем картину распределения поляризационных дефектов вдоль анизотропного волокна.

Большое значение  $h$ -параметра не всегда означает, что на всей длине световода происходит смешение мод. Может оказаться, что в нем есть лишь небольшой участок, на котором происходит смешение двух ортогональных мод. В качестве иллюстрации можно привести производную разности рефлектограмм, снятых при ориентации поляризатора под углами  $0$  и  $45^\circ$  к выбранной оптической оси анизотропного световода для образца 4 (табл.1, рис.5), на которых в области  $z = 1050$  м наблюдается «событие», являющееся поляризационным дефектом образ-

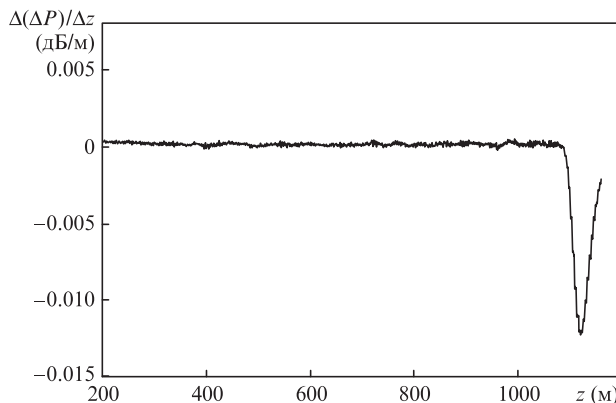


Рис.5. Производная разности рефлектограмм  $\Delta P$  по длине световода для образца 4 (табл.1).

ца. Отметим, что на рефлектограмме, снятой без поляризатора, какие-либо «события» в данной области не наблюдались.

После уменьшения длины световода на 200 м со стороны дефектного конца значение  $h$ -параметра образца снизилось до  $2.1 \times 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ .

Рассмотренный метод обработки поляризационных рефлектограмм позволяет получить распределение по длине волокна поляризационных дефектов, связанных с перекачкой мощности излучения между двумя ортогональными модами. Получен способ выбора пригодных для различных применений участков анизотропного световода. Метод чувствителен, по крайней мере, до значений  $hL \sim 0.01$  ( $L$  – длина отрезка волокна) при достаточном динамическом диапазоне рефлектометра и может быть использован для выявления и локализации как собственных, так и наведенных дефектов сохранения поляризации.

Следует отметить, что представленный метод, как и описанный в работе [7], позволяет изучать распределенные

поляризационные характеристики анизотропных оптических волокон и, благодаря введению в принципиальную схему дополнительных излучающих и регистрирующих элементов, детектировать наличие таких неоднородностей на более высоком, по сравнению с [7], уровне. Это диктуется общими мировыми тенденциями улучшения качества волокон разных типов.

1. Котов О.И., Лиокумович Л.Б. *Письма в ЖТФ*, **30**, 62 (2004).
2. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Медведев А.В. *ЖТФ*, **77**, 102 (2007).
3. Листвин А.В., Листвин В.Н. *Рефлектометрия оптических волокон* (М.: ЛЕСАРарт, 2005).
4. Свинцов А.Г. *Рефлектометрические методы измерения параметров ВОЛС* (М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999).
5. Huttner В., Gissinand В., Gissin N. *J. Lightwave Technol.*, **17**, 1843 (1999).
6. Sunnerud H., Olson В.Е., Karlsson M., Andrekson P., Brentel J. *J. Lightwave Technol.*, **18**, 897 (2000).
7. Константинов Ю.А., Крюков И.И., Первадчук В.П., Торошин А.Ю. *Квантовая электроника*, **39**, 1068 (2009).
8. Sezerman O., Best G. *Laser Focus World*, **33**, 27 (1997).