

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

<sup>1,2</sup> Бочкова С. Д., <sup>1,2</sup> Бурдин В. В., <sup>1,2</sup> Латкин К. П.

<sup>1</sup> Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Развитие оптической технологии передачи информации в последнее десятилетие привело к тому, что поляризационные эффекты в волоконно-оптических линиях, которые недавно считались незначительными, стали играть роль основного фактора, сдерживающего дальнейшее увеличение скорости, дальности и точности передачи информации. К оптическим волокнам предъявляются определенные требования, которые с каждым годом становятся более строгими. Поэтому возникает необходимость в добротных и универсальных метрологических приборах, с помощью которых мы можем контролировать качество оптических волокон. В работе были рассмотрены типовые поляризационные характеристики изотропного и анизотропного оптических волокон. Методом поляризационной рефлектометрии была произведена оценка распределения обратно рассеянной мощности при вводе излучения под углами 0 и 45 градусов к медленной оптической оси анизотропного волокна типа Панда. Исследовано изменения деполяризации света в месте соединения данных оптических волокон с помощью поляризационного рефлектометра. На базе полученных данных был сделан вывод о возможности применения импульсного рефлектометра РК-8000 (Photon Kinetics) для определения поляризационных параметров одномодовых оптических волокон с сохранением состояния поляризации вводимого излучения и без него.

**Ключевые слова:** рефлектометрия; поляризационный рефлектометр; длина поляризационных биений; двулучепреломление; поляризационно-модовая дисперсия.

## DEVELOPMENT OF METHODS INVESTIGATION OF POLARIZATION CHARACTERISTICS OF DIFFERENT TYPES OF OPTICAL FIBERS

Bochkova S.D., Burdin V.V., Latkin K.P.

The development of optical information transmission technology in the last decade has led to the fact that polarization effects in fiber-optic lines, which have recently been considered insignificant, have begun to play the role of a major factor constraining the further increase in speed, range and accuracy of information transmission. Certain requirements are imposed on optical fibers, which become more stringent every year. Therefore, there is a need for good-quality and universal metrological instruments, with which we can control the quality of optical fibers. In work, typical polarization parameters of isotropic and anisotropic optical fibers were considered. The method of polarization reflectometry to estimate the distribution of back-scattered power when entering radiation at angles of 0 and 45 degrees to the slow optical axis of an anisotropic Panda-type fiber was used. Also an experimental study of light depolarization changes in the connection of these optical fibers using the polarization reflectometer was made. On the basis of obtained data there was made the conclusion about possibility of application of impulse time domain reflectometer PK8000 (Photon Kinetics) to study the polarization parameters of single-mode optical fibers with and without polarization maintaining of input radiation.

**Key Words:** reflectometry; POTDR; polarization beat length; birefringence; Polarization Mod Dispersion.

В настоящее время стремительно развивается прикладная оптика. Особый интерес представляет направление волоконной оптики, в котором рассматривается распространение света по тонким нитям из кварцевого стекла (оптическим волокнам). На базе волоконно-оптических технологий создаются волоконные усилители и лазеры,

различные типы волоконных датчиков и многие другие устройства, которые уже находят применение в науке, технике и повседневной жизни человека.

Одними из наиболее востребованных видов оптических устройств являются волоконные интерференционные датчики, важным элементом которых является качественное оптическое волокно. Для транспортировки оптического излучения в таких интерференционных датчиках часто используется анизотропное волокно, сохраняющее поляризацию света. Это связано с тем, что эффективно интерферировать могут только когерентные волны с одинаковой поляризацией.

Основная цель данной работы - создание универсального программно-аппаратного инструмента для оценки поляризационных параметров для изотропных и анизотропных оптических волокон.

## 1. Исследование анизотропного оптического волокна типа Панда методом поляризационной рефлектометрии.

Одной из основных характеристик анизотропного оптического волокна является  $h$ -параметр, который характеризует связь двух ортогональных поляризационных мод, в результате которой происходит переход мощности излучения из одной моды в другую. У качественных производственных образцов оптического волокна с сохранением поляризации, произведенных промышленным способом, данная величина составляет порядка  $10^{-5} \text{ м}^{-1}$ . Величина  $h$ -параметра равна доли излучения перешедшей из основной поляризационной моды в ортогональную на 1 м длины оптического волокна.

Методика данного эксперимента основывается на методе поляризационной рефлектометрии [1], который, в свою очередь, позволяет получить распределенную оценку значений  $h$ -параметра по всей длине оптического волокна. Последнюю можно назвать интегральным способом измерения величины связи поляризационных мод.

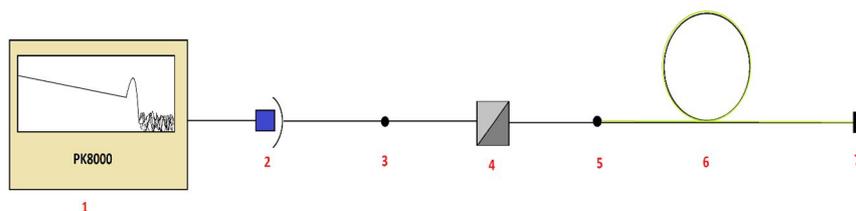


Рис. 1.1 - Схема измерений анизотропного оптического волокна методом поляризационной рефлектометрии.

Экспериментальная установка представлена на рисунке 1.1. С одной стороны находился выходной торец оптического волокна с сохранением поляризации типа Панда (7), а с другой стороны входной торец волокна (6) приваривался (5) к выходному концу оптического поляризатора-анализатора (4), чтобы плоскость поляризации выходного излучения была ориентирована под углами  $0^{\circ}$  либо  $45^{\circ}$  к медленной оси волновода. Непосредственно к входному концу данного оптического поляризатора подваривался (3) коннектор (2) для подключения к одному из каналов импульсного рефлектометра Photon Kinetics PK8000 (1).

Были использованы следующие параметры зондирующего излучения: длина волны источника излучения 1550 нм, длительность импульса 200 нс (что соответствует пространственному разрешению 20 м), время усреднения 60 с, длина одномодового оптического анизотропного волокна Панда 1 км.

На рис.1.2 представлены рефлектограммы, соответствующие вводу излучения под углом  $45^{\circ}$  (на рисунке показана синим цветом) и  $0^{\circ}$  (показана красным цветом) к медленной оси волокна. Рефлектограммы совмещены в начальной точке по уровню мощности обратно рассеянного излучения для более наглядного наблюдения разности наклонов полученных графиков. «Красная» рефлектограмма соответствует большим потерям по сравнению с «синей» по следующей причине. Часть мощности излучения, вводимого под углом  $0^{\circ}$  переходит в ортогональную поляризационную моду и на обратном пути перед входом в рефлектометр «отсекается» поляризатором. Таким образом, при вводе излучения под углом  $0^{\circ}$  получается дополнительный источник потерь. Разница потерь двух рефлектограмм на рис.1.2 характеризует величину связи ортогональных мод, т.е. значение  $h$ -параметра.

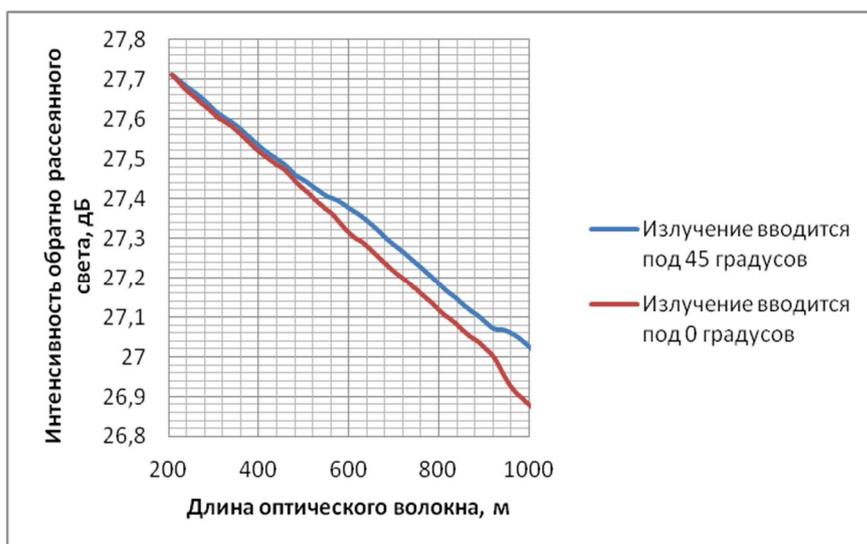


Рис. 1.2 – Совмещенные поляризационные рефлектограммы

Оценка  $h$ -параметра была выполнена по формуле, предложенной в работе [1]:

$$h = \frac{1}{2L} \cdot \ln\left(2 \cdot 10^{\left(\frac{\Delta\alpha L}{10}\right)} - 1\right)^{-1} \quad (1)$$

где  $\Delta\alpha L$  – дополнительные поляризационные потери за счет связи ортогональных мод в дБ,  $\Delta\alpha$  - разность потерь на единицу длины в дБ/км,  $L$  – длина участка оптического волокна. Для получения распределенной величины  $h$ -параметра дополнительные поляризационные потери усреднялись скользящим окном длины  $L = 50$  м.

На рис.1.3 представлен итоговый график распределения  $h$ -параметра по длине волокна. Резкое увеличение  $h$ -параметра на отрезке 850-980 метров соответствует увеличению углу наклона красной рефлектограммы на рис.1.2. Низкое значение  $h$ -параметра на отрезке 250-450 м соответствует малой разности потерь двух рефлектограмм на том же рисунке. Пороговая чувствительность метода при определении значения  $h$ -параметра на отрезках волоконного световода длиной 50 м составляет  $10^{-5} \text{ м}^{-1}$ . Поэтому на отрезках 250-350 м и 600-800 м можно лишь дать оценку значения  $h$ -параметра, которое на данных участках составляет  $\sim 10^{-5} \text{ м}^{-1}$  или  $< 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ . Среднее значение  $h$ -параметра, определенное на участке 200-900 м составляет величину  $\sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ , что соответствует технической спецификации данного волокна, согласно которой  $h=2,03 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ .



Рис. 1.3 – Зависимость  $h$ -параметра от длины анизотропного одномодового волокна типа Панда

Итак, модифицированный метод поляризационной рефлектометрии позволяет оценить распределение  $h$ -параметра по длине анизотропного оптического волокна. Величина расхождения двух рефлектограмм, соответствующих вводу поляризованного излучения под углами  $0$  и  $45^\circ$  характеризует связь двух поляризационных мод.

## 2. Исследование длины деполяризации в изотропном волокне.

В оптическом волокне существуют некоторые случайные отклонения от идеальной круговой формы поперечного сечения, неоднородности плотности из-за остаточных механических напряжений, неоднородности распределения легирующих примесей. Все эти факторы создают локальную анизотропию в сечениях и двулучепреломление (различные значения фазовой и групповой скорости распространения света), что, в свою очередь, вызывает ослабление поляризации.

В изотропном оптическом волокне поляризация разрушается очень быстро, что соответствует высокому значению  $h$ -параметра. На поляризационной рефлектограмме мощность, переходящая из одной поляризационной моды в другую, отражается в виде дополнительных потерь. С целью оценки длины изотропного оптического волокна, на которой разрушается состояние поляризации, а также с целью верификации метода поляризационной рефлектометрии была получена поляризационная рефлектограмма стыка анизотропного и изотропного волокон.

Экспериментальная установка, изображенная на рисунке 2.1, аналогична предыдущему пункту (рис.1.1). Разница состоит в том, что к анизотропному оптическому волокну типа Панда (6) с другой стороны дополнительно было подварено (7) изотропное одномодовое оптическое волокно (8), а измерения осуществлялись только при  $0^\circ$  к медленной оптической оси.

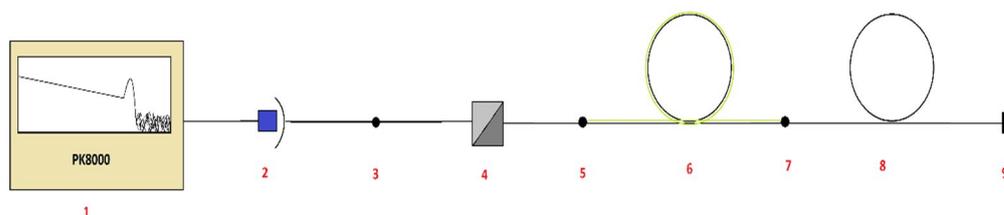


Рис. 2.1 - Схема исследования длины деполяризации в соединении анизотропного и изотропного оптического волокна методом поляризационной рефлектометрии.



Рис. 2.2 – Поляризационная рефлектограмма

На рефлектограмме на рис.2.2 стык анизотропного и изотропного волокон примерно соответствует координате 700 м. В анизотропном волокне в промежутке 100-700 м потери невелики, на стыке в области 700 м потери резко возрастают и на промежутке 700-750 м уровень рефлектограммы падает на 3 дБ, т.е. мощность, попадающая в приемник уменьшается в 2 раза. Полученный результат полностью подтверждает сущность метода поляризационной рефлектометрии, описанную выше. Состояние поляризации в изотропном волокне полностью разрушается, при этом половина мощности переходит в ортогональную поляризационную моду. Отраженный сигнал ортогональной поляризационной моды не пропускается поляризатором, поэтому мощность отраженных сигналов после 750 м, регистрируемая приемником, падает в 2 раза или на 3 дБ. По рефлектограмме на рис.2.2 можно оценить длину деполяризации света. Спад уровня рефлектограммы наблюдается в области 700-750 метров, поэтому длина разрушения поляризации составляет примерно 50 м.

Далее на участке от 750 до 1200 м рефлектограмма наблюдаются квазипериодические изменения уровня рефлектограммы. Это объясняется биениями состояния поляризации в изотропном волокне. Биения возникают из-за неидеальности волокна – в сечениях случайным образом возникают анизотропия и двулучепреломление. Это явление рассмотрено в следующей части.

3. Исследование длины поляризационных биений в стандартном одномодовом оптическом волокне с помощью лабораторного рефлектометра с подключением поляризатора.

Для исследования биений состояния поляризации в изотропном оптическом волокне был взят участок изотропного одномодового оптического волокна от 750 до 1200 м (рис.2.2, рис.3.1). Биения поляризации в точности соответствуют биениям рефлектограммы. Биения имеют случайный характер, длины биений находятся в диапазоне  $L_b = 30-100$  м. Всего в промежутке от 750 до 1200 м наблюдается 6-7 биений. Следовательно средняя длина биений поляризации составляет  $L_b \sim 70$  м. Длины биений поляризации по порядку величины соответствуют длине разрушения поляризации (50 м) в однородном оптическом волокне, определенной в пункте 2. Для сравнения, в анизотропном оптическом волокне длина биений состояния поляризации составляет примерно  $L_b \sim 2$  мм.

Длина поляризации зависит от коэффициента двулучепреломления  $V = n_x - n_y$  (разности показателей преломления вдоль быстрой и медленной оптических осей волокна):

$$L_b = \frac{\lambda}{V} \quad (2)$$



Рис. 3.1 – Характерный вид поляризационных биений, наблюдаемых в одномодовом изотропном оптическом волокне.

Формула (2) показывает, что в идеальном изотропном волокне ( $V=0$ ) длина биений бесконечно велика. На рефлектограмме идеального волокна биения бы отсутствовали.

Оценочное значение среднего коэффициента двулучепреломления для изотропного оптического волокна при  $\lambda=1,55$  мкм составляет величину  $B=2,2 \cdot 10^{-8}$ . Величины  $L_b$  и  $B$  для изотропного волокна являются параметрами его качества. Чем больше  $L_b$  и чем меньше  $B$ , тем качественнее изотропное волокно.

### **Выводы**

Применение импульсного рефлектометра РК-8000 (Photon Kinetics) позволяет исследовать поляризационные параметры одномодовых анизотропных и изотропных оптических волокон.

Получена оценка величины связи поляризационных мод в анизотропных оптических волоконных световодах типа Панда: определена зависимость  $h$ -параметра от координаты вдоль волокна.

В изотропном оптическом волокне определена длина разрушения поляризации и средняя длина биений состояния поляризации.

Авторы выражают особую благодарность заведующему Лабораторией Фотоники ПФИЦ УрО РАН Константинову Ю.А. и доценту кафедры Общая Физика ПНИПУ Баяндину Д.В. за обсуждение и анализ полученных результатов.

### **Список литературы**

1. Смирнов А.С., Бурдин В.В, Константинов Ю.А. Об оценке  $h$ -параметра в сохраняющем поляризацию оптическом волокне на основе данных поляризационной рефлектометрии. - Прикладная фотоника. - 2014. - №1. - С.51-57.
2. Huttner B., Reecht J. and Gisin N., Passy R. and J.P.von der Weid. Polarization OFDR for measurements of birefringence and polarization mode coupling lengths in optical fibers.
3. Legre M., Wegmuller M., and Gisin N. Investigation of the Ratio Between Phase and Group Birefringence in Optical Single-Mode Fibers PMD Study & Measurement – Fixed Analyzer Method Rastislav Motuz, Petr Munster, and Miloslav Filka.
4. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. – Artech House Optoelectronics Library, 1993.
5. Edwards M., Ten S. An Introduction to the Fundamentals of PMD in Fiber. - 2006.