

Прецизионное измерение потерь в оптических волокнах малой длины рефлектометрическим методом без использования рэлеевского рассеяния света

Б.Г.Горшков, Г.Б.Горшков, К.М.Жуков

Для повышения точности измерения затухания излучения в оптических волокнах, особенно малой длины, измеряемых десятками и сотнями метров, предложено отказаться в рефлектометрической схеме от традиционного подхода, основанного на регистрации интенсивности рэлеевского рассеяния света. Для этой цели впервые предложено использовать бозонные пики комбинационного (рамановского) рассеяния, которые, с одной стороны, не создают интерференционных эффектов и связанного с ними эффекта «зашумления» рефлектограмм, а с другой стороны, полностью укладываются в С-диапазон длин волн. Ошибка измерения затухания уже при длине волокна 50 м не превышает 0.002 дБ/км. Показана возможность компенсации температурной зависимости интенсивности бозонных пиков путем одновременного получения рефлектограммы для антистоксовой компоненты основной линии комбинационного рассеяния.

Ключевые слова: оптические волокна, оптическая рефлектометрия, комбинационное рассеяние света.

1. Введение

Впервые возможность получения рефлектограмм с регистрацией интенсивности рэлеевского рассеяния света была продемонстрирована в работе [1]. С тех пор рефлектометры с временным разрешением, предназначенные для определения потерь излучения в оптических волокнах, прочно вошли в практику строительства оптических линий связи. Их характеристики, как правило, вполне соответствуют практическим потребностям. Однако имеется задача измерения затухания излучения на единицу длины оптического волокна для коротких отрезков (от десятков до сотен метров) с достаточной точностью (до сотых долей дБ/км), и она представляется весьма актуальной. Ограничение точности измерения потерь излучения в одно-модовых волокнах с помощью рефлектометров, основанных на регистрации рэлеевского рассеяния в направлении назад, обусловлено двумя основными причинами. Первая состоит в остаточной поляризационной чувствительности реальной конструкции рефлектометра. Эта причина может быть устранена введением деполяризации (как в среднем по спектру, так и осреднением по времени – скремблированием). Вторая причина носит более фундаментальный характер. Как показано в [2, 3], само по себе использование рэлеевского рассеяния неизбежно приводит к получению шумоподобных рефлектограмм, причем уровень этих «шумов», не устранимых накоплением сигналов, тем больше, чем уже спектр источника излучения. Расширение спектра излучения более чем на десятки нанометров невозможно без выхода из исследуемого диапазона (как правило, С-диапазона, 1525–1565 нм), к тому же

это неэффективно. Второй путь – ухудшение пространственного разрешения, например за счет удлинения зондирующих импульсов, неприемлем для коротких отрезков волокна. Таким образом, при использовании рэлеевского рассеяния поставленная задача не может быть решена.

В работе [2] показано, что принципиально можно получать значительно менее зашумленные рефлектограммы, регистрируя мощность линий стоксова или антистоксова комбинационного (рамановского) рассеянного света. Поскольку рассеяние происходит при взаимодействии света с оптическими фонами, имеющими при каждом акте рассеяния случайную фазу, эффекта «вмороженности» флуктуаций коэффициента обратного рассеяния [2] при условии осреднения по многим реализациям не возникает. Однако обе указанные линии по длине волны выходят за пределы С-диапазона, что может оказаться неприемлемым.

Как известно, наряду с комбинационным рассеянием (КР) в оптических средах существует рассеяние света на акустических фонах (манделштам-бриллюэновское рассеяние, МБР). В принципе, имеется возможность регистрации рефлектограмм на частотах этого рассеяния, которые отстоят от рэлеевских незначительно (10–11 ГГц для С-диапазона в волокнах на основе плавленого кварца). Однако технология работы с МБР предполагает использование дорогостоящих элементов и сложных способов обработки сигналов (см, напр., [4]) и вряд ли адекватна поставленной задаче.

В настоящей работе впервые предлагается получать рефлектограммы на частотах бозонных пиков КР. Спектр спонтанного КР в волокне на основе плавленого кварца с акцентом на выделение бозонных пиков получен в работе [5]. При проведении экспериментов использовался аргоновый лазер ($\lambda = 510$ нм). На рис.1 приведен спектр КР для волокна на основе плавленого кварца, заимствованный из указанной работы. Верхняя (частотная) шкала является универсальной и достаточно точно отражает характерные частотные сдвиги КР. На рисунке показаны стоксова и антистоксова компоненты КР (кривые 1 и 2 со-

Б.Г.Горшков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: gorgb@petrofibre.ru
Г.Б.Горшков. ООО «ПетроФайбер», Россия, Тульская обл., 301664 Новомосковск, Клинский пр-д, 7
К.М.Жуков. ООО «Лаборатория электронных и оптических систем», Россия, 105082 Москва, Спартаковская пл., 14, стр.4

Поступила в редакцию 10 октября 2018 г., после доработки – 6 ноября 2018 г.

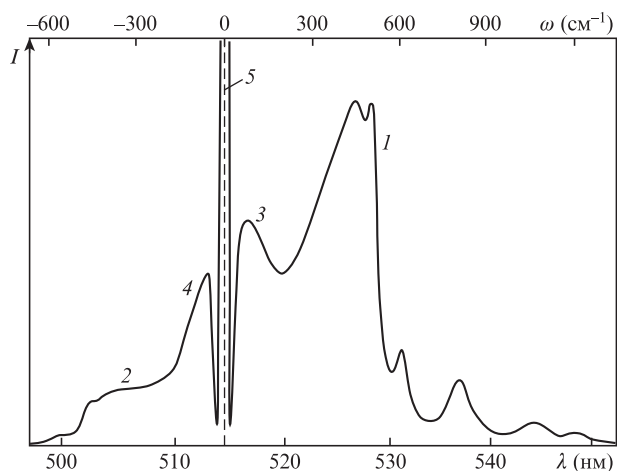


Рис.1. Спектр спонтанного КР в волокне на основе плавяного кварца: 1 и 2 – стоксова и антистоксова компоненты КР; 3 и 4 – стоксов и антистоксов пики; 5 – возбуждающее излучение.

ответственно), а также стоксов и антистоксов пики (кривые 3 и 4), именуемые бозонными. Природа возникновения этих пиков описана в [5]. Там же приведены температурные зависимости их интенсивностей.

Частотный сдвиг бозонных пиков составляет около 100 см⁻¹, что для С-диапазона в пересчете в длины волн составляет порядка десятка нанометров. Последнее обстоятельство важно, т. к. при зондировании излучением с длиной волны около 1550 нм рассеянное излучение бозонных пиков полностью попадает в С-диапазон. Таким образом, ни зондирующее, ни рассеянное излучение не выходит за пределы изучаемого диапазона.

2. Эксперимент

Рефлектометрическая схема экспериментальной установки с временным разрешением приведена на рис.2. Задающий лазерный диод 1 с распределенной обратной связью и длиной волны излучения 1551 нм при ширине спектра не более 1 нм генерирует импульсы длительностью 40 нс. После эрбиевого усилителя 2 зондирующее излучение проходит через узкополосный фильтр (DWDM) 3 с шириной спектра пропускания менее 100 ГГц для исключения вклада излучения люминесценции усилителя в исследуемые рефлектограммы (это излучение модулировано по мощности с частотой следования импульсов и мо-

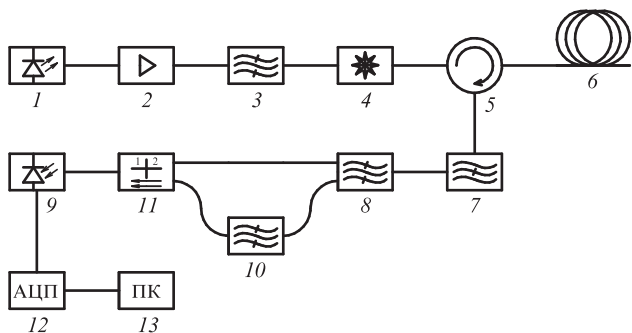


Рис.2. Схема экспериментальной установки: 1 – задающий лазерный диод; 2 – эрбиевый усилитель; 3 – узкополосный фильтр; 4 – поляризационный скремблер; 5 – циркулятор; 6 – исследуемое волокно; 7, 8, 10 – фильтры; 9 – фотоприемник; 11 – коммутатор; 12 – аналого-цифровой преобразователь; 13 – компьютер.

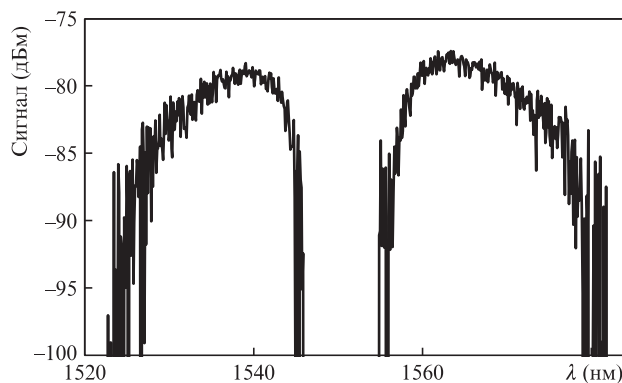


Рис.3. Спектр обратно рассеянного излучения, содержащего бозонные пики КР, перед фотоприемником.

жет исказить принимаемую рефлектограмму). Через поляризационный скремблер 4 (General Photonics PSM-002) и циркулятор 5 зондирующее излучение поступает в исследуемое волокно 6. Пиковая мощность зондирующего излучения, составляющая 1.4 Вт, была ограничена во избежание возникновения нелинейных эффектов, искажающих рефлектограммы. Рассеянное в обратном направлении излучение через циркулятор 5, фильтры 7, 8 и коммутатор 11 поступает на фотоприемник (лавинный фотодиод с трансимпедансным усилителем) 9. Фильтр 7 выполняет режекторную функцию, отсекая сигнал рэлеевского рассеяния (его спектральная ширина 6 нм). Фильтр 8 сварной конструкции одновременно подавляет стоксову и антистоксову компоненты КР, пропуская их бозонные составляющие. Спектр излучения, поступающий на фотоприемник, показан на рис.3. Спектр получен с помощью анализатора ANDO AQ6319 при установленном спектральном разрешении 1 нм. Сигнал с фотоприемника после усилителя оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 12 и вводится в память компьютера 13.

Пример рефлектограммы для отрезка оптического волокна Fujikura Future Guide LWP длиной 1000 м приведен на рис.4 (кривая 1). Рефлектограмма получена при накоплении сигнала в течение 40 с посредством АЦП с тактовой частотой 100 МГц. Пространственное разрешение рефлектометра оценено в 5 м. На рисунке имеются две вертикальные шкалы. Левая соответствует исходному сигналу в том виде, в котором он регистрируется АЦП (с накоплением по времени). Правая шкала соответствует представлению, принятому в обычных рефлектометрах, когда учитывается проход излучения в двух направлениях (вперед и назад); по этой шкале принято отсчитывать потери излучения. Уровень зашумленности рефлек-

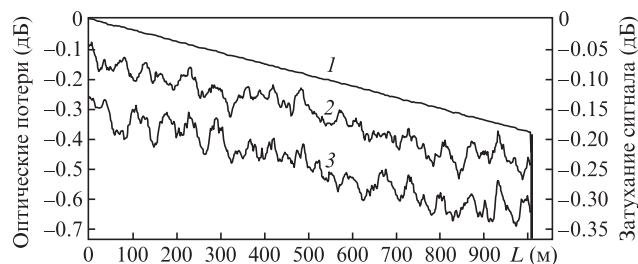


Рис.4. Рефлектограммы для отрезка оптического волокна Fujikura Future Guide LWP (L – координата по длине волокна). Кривые 2 и 3 получены при помощи серийного рефлектометра (2 – с использованием поляризационного скремблера, 3 – без скремблера) и смещены по вертикали вниз для лучшей визуализации.

тограммы (кривая 1) крайне низкий – среднеквадратичное отклонение (СКО) шума составляет 5×10^{-4} дБ, или 0.01%.

Для сравнения на рис.4 приведены данные, полученные для того же отрезка волокна при помощи серийного рефлектометра (кривая 2 – с использованием поляризационного скрэмблера, кривая 3 – без скрэмблера). Определенное по автокорреляционной функции пространственное разрешение составило 10 м. СКО шума в первом случае равно 0.34%, во втором – 0.41%. Последняя величина не представляет для нас существенного интереса, поскольку поляризационная чувствительность определяется индивидуальными характеристиками элементов оптической схемы рефлектометра и не имеет фундаментальных ограничений. Кривая 2 наглядно демонстрирует невозможность точного определения затухания при длине отрезков волокна, измеряемых десятками и сотнями метров. Отметим, что при подключении к тестируемому волокну другого рефлектометра AQ7275, работающего на той же длине волны, получена рефлектограмма, не отличающаяся от приведенной на рис.4.

Волокно длиной 25 км (такое же, как тестируемое), намотанное на катушку, по данным производителя имело затухание 0.189 дБ/км. В точности такое же значение получено нами при измерении затухания на той же катушке с помощью рефлектометра AQ7275. Примем это значение за истинное, от которого в дальнейшем будем отсчитывать ошибки измерения.

Зависимость затухания в волокне от длины участка измерения приведена на рис.5. Видно, что уже при длине волокна 50 м ошибка измерений (если считать значение 0.189 дБ/км истинным) не превышает 0.002 дБ/км. На рис.6 показана случайная ошибка (СКО) измерения затухания (по результатам 10 последовательных замеров) также в зависимости от длины участка. Немонотонность кривой на рис.6 объясняется недостаточно полной статистикой измерений (ср. с кривыми 2 и 3 на рис.4).

Сравним полученные экспериментально результаты с теоретической оценкой для уровня шумов рефлектоме-

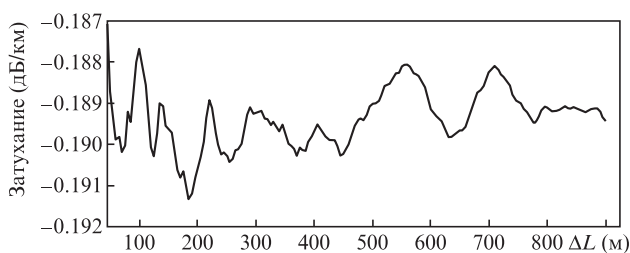


Рис.5. Зависимость измеренного затухания от длины ΔL исследуемого участка.

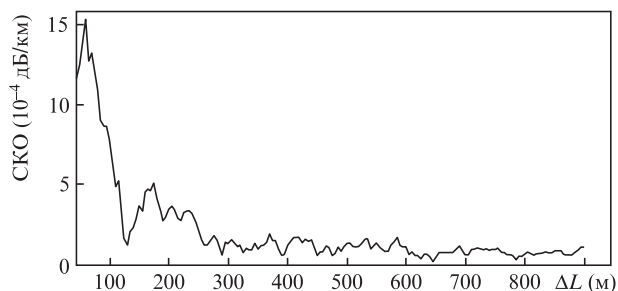


Рис.6. Зависимость СКО измерения затухания от длины исследуемого участка.

тра, использующего рэлеевское рассеяние света. Статистические характеристики рэлеевских рефлектограмм для одномодового волокна описываются полученными в [3] выражениями (в частности, формулой (19), преобразованной для удобства)

$$C = A\sqrt{\tau/T}, \tag{1}$$

где C – контраст рефлектограммы, определяемый как отношение СКО σ к математическому ожиданию сигнала M ; τ – длина когерентности зондирующего излучения; T – длительность импульса; A – коэффициент порядка единицы, слабо зависящий от формы спектра и формы импульса [3]. Необходимо отметить, что формула (1) не учитывает импульсную характеристику фотоприемника и возможную аналоговую и цифровую фильтрацию принимаемого сигнала, поэтому под T в формуле (1) при сравнении с экспериментальными данными следует понимать характерное временное разрешение прибора в целом. Отметим также, что описываемый формулой (1) контраст не зависит от характеристик волокна (потери, числовой апертуры, легирующих добавок) и определяется только особенностями рэлеевского рассеяния света. С учетом сказанного, расчет по формуле (1) при ширине спектра зондирующего излучения 10 нм дает $C = 0.32\%$, что близко к экспериментально измеренному значению 0.34%. Это свидетельствует о том, что перспектива уменьшения шумов при использовании рэлеевского рассеяния света отсутствует. Таким образом, наши эксперименты показали, что уровень шумов при использовании бозонных пиков КР в 30–35 раз меньше.

Однако следует иметь в виду, что, в отличие от рэлеевского рассеяния, интенсивность спонтанного рассеяния на фонах зависит от температуры. Конкретно для бозонных компонент КР температурный коэффициент интенсивности рассеяния равен примерно 0.003 K^{-1} [5]. Чем выше требуется точность измерения, тем более высокие требования приходится предъявлять к однородности температуры по объекту измерения. Если таким объектом является оптический кабель на катушке, то обеспечить достаточную однородность в ряде случаев затруднительно. Одно из возможных решений состоит в дополнительной регистрации антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния, спектр которой показан на рис.7. Этот спектр получается путем использования соответствующего выхода фильтра 8 и дополнительного тонкопленочного фильтра 10, который отсекает все длины волн более 1500 нм. В нашей установке излучение со спектрами, показанными на рис.3 и 7, последовательно подавалось на фотоприемник через оптический коммутатор 11. Поскольку температурная чувствительность интенсивности

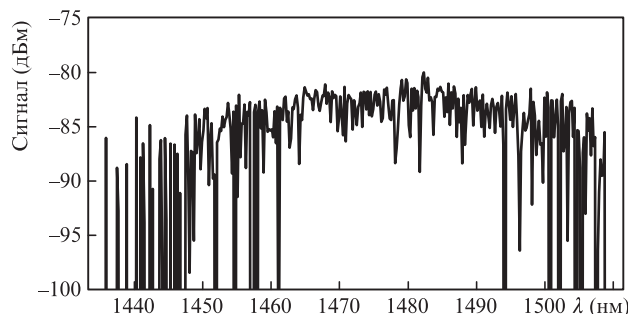


Рис.7. Спектр антистоксовой компоненты КР.

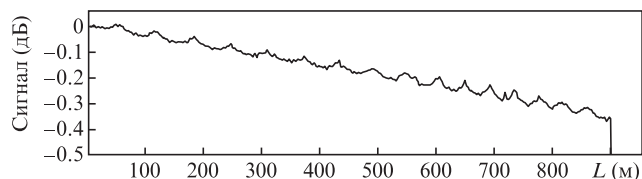


Рис.8. Исходная рефлектограмма для бозонной компоненты КР, полученная для отрезка волокна, находящегося в неоднородном температурном поле.

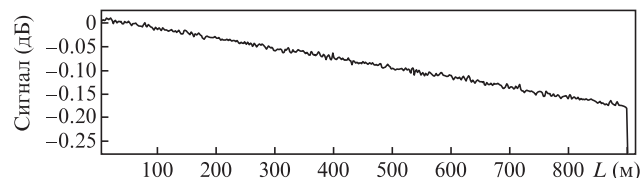


Рис.9. Рефлектограмма для бозонной компоненты КР после компенсации температурной ошибки.

указанной антистоксовой компоненты вблизи комнатной температуры составляет 0.008 K^{-1} , что значительно больше, чем для бозонных пиков, создаются предпосылки для эффективной компенсации температурных вариаций.

Для демонстрации возможностей компенсации, связанных с неоднородностью температурного распределения по длине волокна, был выполнен следующий эксперимент. Бухта волокна длиной 1000 м была неоднородно нагрета с максимальными отклонениями температуры от среднего значения 3 К. Надо понимать, что на практике такие отклонения недопустимы. При этом рефлектограмма для бозонных пиков КР приобрела вид, показанный на рис.8. Совместная обработка рефлектограммы с аналогичной, полученной для антистоксовой компоненты КР, позволила получить результирующий график для оптических потерь (рис.9), из которого видно, что в основном температурные ошибки устранены. Уровень шумов, однако, увеличился в 6–7 раз. Представляется вероятным,

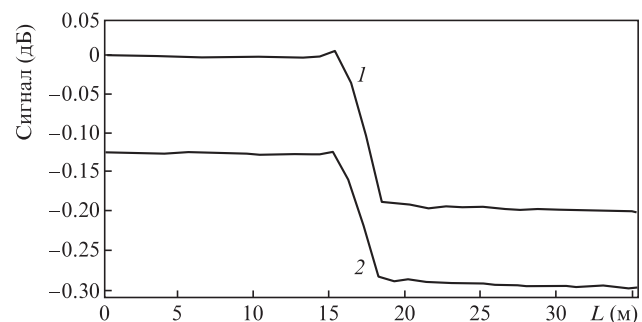


Рис.10. Рефлектограммы для двух отрезков волокна, соединенных при помощи коннекторов FC-UPC (1) и механического соединителя УП-125/2 FC-UPC (2).

что совершенствование алгоритма компенсации способно улучшить результат.

Отметим еще одну особенность исследованной схемы, выгодно отличающую ее от традиционных схем, основанных на использовании рэлеевского рассеяния. Поскольку рэлеевская компонента подавляется фильтром, установленным перед фотоприемником, то ослабляется и отраженное зондирующее излучение, а следовательно, существенно уменьшается сигнал от неоднородностей, в частности от коннекторов (френелевское отражение) и некачественно выполненных сварок. Соответственно, не возникает «мертвых зон» после коннекторов, что важно при исследовании относительно коротких волокон. На рис.10 представлена рефлектограмма для двух отрезков волокон, соединенных посредством коннекторов FC-UPC различных типов. Видно, что отражение оказывает минимальное воздействие на ход рефлектограммы, пространственное разрешение можно оценить в 2 м (при длительности зондирующих импульсов 20 нс), а «мертвая зона» после коннекторов отсутствует.

3. Заключение

Впервые предложена и экспериментально исследована схема рефлектометра для измерения затухания излучения в оптических волокнах, использующего бозонные пики комбинационного (рамановского) рассеяния света. Путем исключения интерференционных явлений, связанных с использованием рэлеевского рассеяния, достигнута высокая точность измерения затухания на коротких отрезках волокна – от 50 до 1000 м. Продемонстрировано уменьшение шумов более чем в 30 раз. При этом измерения происходят полностью в С-диапазоне длин волн. Недостатком схемы является температурная зависимость интенсивности КР. Предложен способ температурной компенсации связанной с этим погрешности путем дополнительного получения рефлектограммы на длине волны антистоксовой компоненты КР, имеющей сильную зависимость интенсивности от температуры.

Авторы признательны И.В.Фролову за полезные обсуждения.

1. Personick S. D. *Bell System Techn. J.*, **56**, 355 (1977).
2. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Гринштейн М.Л., Таранов М.А. *Квантовая электроника*, **47**, 83 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 83 (2017)].
3. Горшков Б.Г., Таранов М.А., Алексеев А.Э. *Laser Phys.*, **27**, 085105 (2017).
4. Будьлин Г.С., Горшков Б.Г., Горшков Г.Б., Жуков К.М., Парамонов В.М., Симикин Д.Е. *Квантовая электроника*, **47**, 597 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 597 (2017)].
5. Горшков Б.Г., Горбатов И.Е., Данилейко Ю.К., Сидорин А.В. *Квантовая электроника*, **17**, 345 (1990) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **20**, 283 (1990)].