

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.7.068.2

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ВОЛОКОН МЕТОДОМ
КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ¹

©2026 г. А. Ю. Ткаченко*, И. А. Лобач, С. И. Каблуков

Институт автоматики и электрометрии

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

**E-mail: tkachenko@iae.nsk.su*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 13.05.2026

Принята к публикации 30.06.2026

Представлены результаты исследования уровня обратного рассеяния Рэлея с помощью когерентного оптического частотного рефлектометра (OFDR). Для бессердцевинного волокна (БСВ) наблюдалось изменение уровня сигнала в зависимости от наличия внешнего акрилатного покрытия. Сигнал для БСВ с оболочкой примерно на 10 дБ выше, что может быть объяснено как дополнительным рассеянием света в акрилате, так и увеличением числовой апертуры для БСВ с покрытием. Для активных эрбиевых волокон разных производителей наблюдаются разные уровни рассеяния Рэлея, они определяются коэффициентом захвата рассеянного излучения, который, в свою очередь, квадратично зависит от числовой апертуры. Это означает, что метод OFDR может быть использован для измерения относительного значения числовой апертуры оптических волокон.

Ключевые слова: когерентный оптический частотный рефлектометр, OFDR, самосканирующий волоконный лазер, специальные оптические волокна.

1. ВВЕДЕНИЕ

Когерентная оптическая частотная рефлектометрия (Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR) – одна из ключевых технологий распределенного анализа оптических систем с волноводной структурой (оптических волокон или фотонно-интегральных схем). Принцип ее действия основан на анализе интерференции между пробным и отраженным (или рассеянным) в тестируемом оптическом тракте сигналами при сканировании оптической частоты высококогерентного зондирующего излучения [1]. Получаемый интерференционный

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

сигнал несет информацию о точном положении и величине отражающих неоднородностей вдоль волоконной сенсорной линии; эти данные извлекаются с помощью преобразования Фурье. Ключевые особенности технологии – высокое пространственное разрешение (вплоть до микронных масштабов [2]) и исключительная чувствительность к малым дефектам (что позволяет регистрировать сигналы рассеяния и слабее [3]). Благодаря этим преимуществам OFDR является востребованным инструментом как для диагностики оптических систем [4], так и для распределенных сенсорных измерений [5, 6]. В ряде задач данный метод не имеет альтернатив среди других видов распределенной диагностики и зондирования. Следует отметить, что в подавляющем большинстве работ, посвященных применению OFDR, в качестве оптического тракта используются стандартные одномодовые волокна (см., например, [4, 7]). В то же время, другие типы волокон или волокна с модификациями практически не представлены в научной литературе. Можно ожидать, что сочетание всех перечисленных достоинств OFDR – высокого пространственного разрешения и чувствительности – с применением волокон иных типов откроет новые возможности этого метода. Действительно, в ряде работ показано применение специальных типов волокон в паре с технологией OFDR.

Например, в работе [8] представлена новая волоконно-оптическая сенсорная система на основе OFDR для распределенного обнаружения жидкостей, выполненная на базе бессердцевинного волокна. Ключевая особенность предложенной структуры заключается в том, что бессердцевинное волокно непосредственно контактирует с исследуемой жидкостью, что позволяет регистрировать ее присутствие по изменению характеристик обратного рэлеевского рассеяния. Система интегрирована с распределенным волоконно-оптическим зондированием, что обеспечивает высокую точность обнаружения жидких капель.

В работах [9, 10] исследуется возможность использования OFDR для распределенной дозиметрии. Авторы демонстрируют применение волокон, легированных фосфором, в качестве чувствительного элемента для измерения ионизирующего излучения путем регистрации вносимых потерь с высоким пространственным разрешением.

В работе [11] показано применение OFDR для неразрушающего измерения распределения коэффициента усиления вдоль эрбиевых волокон с высокой точностью. Анализ активных волокон также проводился в исследовании [12], где авторам удалось измерить температурное распределение внутри работающих лазеров на основе иттербиевого и гольмиевого волокон.

В настоящей работе представлены результаты измерения и анализа рефлектограмм для ряда специальных волокон с использованием метода когерентной оптической частотной рефлектометрии. В качестве объектов исследования были выбраны следующие типы волокон:

бессердцевинные волокна (БСВ) – как с оболочкой, так и без нее, – а также эрбиевые волокна (ЭВ) различных марок. БСВ представляет собой тип многомодового волокна, внешняя оболочка которого формируется окружающей средой [13]. Благодаря прямому контакту с внешней средой БСВ применяется в качестве чувствительного элемента для мониторинга окружающей среды, измерения температуры [14] и показателя преломления [15]. Кроме того, БСВ используется в мощных лазерных схемах для уменьшения обратных отражений и предотвращения повреждения торца волокна. В стандартном волокне высокая плотность мощности на границе воздух–стекло приводит к повреждению. БСВ, не имеющее сердцевины, не ограничивает диаметра входного пучка: мощное излучение вводится в БСВ-наконечник и уже внутри сходится к сердцевине стандартного волокна, что снижает плотность мощности на границе раздела. Также БСВ уменьшает обратное отражение в волоконно-оптических линиях, поскольку покрытие БСВ имеет более высокий показатель преломления, чем стеклянный стержень, и основные потери происходят именно там.

Наличие эрбия в ЭВ придает им способность усиливать оптический сигнал в диапазоне длин волн около 1.55 мкм [16]. Благодаря этому свойству они стали ключевым компонентом волоконно-оптических усилителей. Усилители на основе ЭВ позволяют напрямую усиливать многоканальные сигналы в плотных спектральных системах уплотнения без преобразования в электрическую форму, обеспечивая широкую полосу усиления от 1530 до 1625 нм, высокую эффективность и низкий уровень шума. Помимо телекоммуникаций, эрбиевые волокна широко применяются в волоконных лазерах, медицинской диагностике, волоконно-оптических гироскопах и распределенных сенсорных системах.

В настоящей работе показано, что метод OFDR позволяет получать новую информацию об исследованных волокнах, которая может быть полезна, в том числе, для сенсорных задач.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Описание эксперимента

Схема эксперимента показана на рис. 1. Система состоит из двух ключевых элементов: когерентного рефлектометра COBRA (Coherent Optical Backscatter Reflectometric Analyzer) и анализируемого специального волокна.

Рис. 1.Схема эксперимента.

Ключевой особенностью рефлектометра COBRA является использование в качестве источника излучения самосканирующего волоконного лазера (СВЛ) с перестраиваемой **оптической** частотой. Перестройка оптической частоты происходит без применения внешних перестраиваемых элементов [17]. Такой лазер генерирует регулярную последовательность

микросекундных импульсов, каждый из которых состоит из одной продольной моды резонатора, при этом оптическая частота изменяется от импульса к импульсу ступенчатым образом. Резонатор СВЛ с низкой добротностью сформирован широкополосным высокоотражающим волоконным зеркалом на основе волоконного соединителя 50/50 и торца сколотого под прямым углом волокна. В качестве активной среды использовалось волокно с двойной оболочкой, легированное иттербием, длиной 3 м. Активная среда накачивалась многомодовым лазерным диодом с длиной волны около 975 нм и выходной мощностью до 9 Вт. При рабочей мощности накачки 2 Вт лазер функционирует в режиме самосканирования длины волны в диапазоне 1060–1080 нм.

Для вывода основной части лазерного излучения через изолятор использовался выходной ответвитель 20/80. Лазерный сигнал разделялся на два канала с помощью ответвителя 10/90. При этом 10% мощности выходного излучения направлялось на эталонный фотодетектор, а основная часть (90%) поступала в измерительный тракт на основе интерферометра Маха–Цендера (ИМЦ). Одно из плеч ИМЦ содержало анализируемое специальное волокно. Для регистрации сигналов от слабых рассеивателей и отражателей была повышена чувствительность системы. Коэффициент ветвления ответвителей был выбран таким образом, чтобы две волны, участвующие в двухлучевой интерференции, имели сопоставимую мощность на выходном ответвителе [18]. Разность плеч ИМЦ была частично скомпенсирована добавлением отрезка пассивного волокна в опорное плечо. Кроме того, для повышения чувствительности сенсорной системы интерференционный сигнал был усилен с помощью волоконного иттербиевого усилителя. На выходе усилителя дополнительно установлен спектральный фильтр с полосой пропускания 2 нм и центральной длиной волны 1064 нм для подавления нежелательного спонтанного излучения.

Опорный сигнал СВЛ и сигнал от интерферометра детектировались двумя высокоскоростными фотодетекторами и оцифровывались АЦП в течение 2 с, что определялось спектральной шириной фильтра. Для обработки полученных данных была выполнена поимпульсная нормализация сигнала согласно работе [19]. В процессе получения рефлектограммы для анализируемого волокна к нормированному интерференционному сигналу применялось быстрое преобразование Фурье. Кроме того, все рефлектограммы нормировались на единицу в нулевой точке. Таким образом, амплитуда пика в нулевой координате равна 1 и 0 дБ в линейном и логарифмическом масштабах соответственно. Более подробное описание лазера и рефлектометра можно найти в работе [20]. Ранее нами уже была показана возможность регистрации с помощью рефлектометра на основе СВЛ в тестовой линии как сильноотражающих элементов (ВБР, сколы волокна и др.) [18], так и слабоотражающих –

неоднородности показателя преломления (по рассеянию Рэлея), а также измерение их температур.

В результате рефлектометр обладал следующими характеристиками. Пространственная дискретизация рефлектограммы составляла примерно 0.2 мм. Это значение было ограничено использованием спектрального диапазона всего в 2 нм. Максимальная длина линии составляла 9 м, что определялось величиной скачка частоты используемого лазера (5.7 МГц). Минимальный уровень сигнала составлял –105 дБ/мм. Для снижения уровня шумов проводились усреднения данных по 10 последовательным измерениям и сглаживание по 10 соседним пространственным точкам.

К рефлектометру независимо друг от друга подключались две тестируемые линии, изображенные на рис. 1 в пунктирном прямоугольнике. Линия А (рис. 1) использовалась для исследования БСВ (Thorlabs FG125LA [21]) с кварцевой частью диаметром 125 мкм и акрилатным покрытием толщиной 62.5 мкм. Согласно спецификации производителя, обратный сигнал подавляется более чем на 65 дБ при длине БСВ 25 см. Отрезок БСВ длиной 43 см был частично (примерно наполовину) очищен от защитного покрытия с помощью термострипера; поверхность БСВ перед измерениями дополнительно очищалась ацетоном и безворсовой салфеткой. Для подключения к рефлектометру с обеих сторон отрезка БСВ были приварены два одномодовых волокна, оконцованных с одной стороны FC/APC-коннекторами.

Линия Б (рис. 1) использовалась для исследования эрбиевых волокон различных производителей: Nufern (PM-ESF-7/125 [22]), Coreactive (ER35-7-PM [23]), nLIGHT (ER80-8-125-PM [24]), IXblue (IXF-EDF-HD-PM [25]), Nufern (PS-ESF-3/125 [26]), Nufern (EDFC-980-HP [27]) и ПНППК (известно только значение диаметра оболочки – 80 мкм). Для подключения активных эрбиевых волокон к рефлектометру использовались FC/APC-коннекторы (1550 нм), что позволило избежать дополнительных потерь в линии. Для уменьшения уровня обратного отражения от торца активного волокна к нему был приварен отрезок БСВ длиной 20 см. Следует также отметить, что волокна Nufern (PS-ESF-3/125) и Nufern (EDFC-980-HP) не сохраняют линейное состояние поляризации, что приводило к зависимости измеряемого сигнала от способа укладки волокна. В связи с этим критерием правильной укладки служило достижение максимального уровня рассеянного сигнала.

2.2. Бессердцевинное волокно

К рефлектометру последовательно подключались образцы БСВ. Стоит отметить, что для длины волны зондирующего излучения в БСВ возбуждалось огромное количество поперечных мод. Для БСВ были проведены измерения при двух способах ввода зондирующего излучения:

через сторону с защитной оболочкой (рис. 2а) и через сторону без оболочки (рис. 2б). Обе рефлектограммы содержат как множество пиков (точечные отражения), так и участки с постоянным уровнем сигнала (распределенные отражения). Соответствующие области и точки отмечены цифрами на рисунках. Следует отметить, что все точечные отражения имеют достаточно протяженную структуру, что может быть связано с межмодовой дисперсией из-за возбуждения большого числа поперечных мод.

Рис. 2. Измеренные рефлектограммы для БСВ при двух способах ввода зондирующего излучения

Рассмотрим рис. 2а подробнее. Уровень сигнала 1 соответствует рэлеевскому рассеянию в одномодовом волокне (–70 дБ). Провал 2 соответствует сварному соединению между одномодовым волокном и БСВ с оболочкой. Для выполнения сварки потребовалось удалить небольшой участок оболочки БСВ, поэтому ширина провала соответствует длине зачищенной области. Уровень сигнала 3 соответствует рэлеевскому рассеянию в БСВ с оболочкой (–80 дБ). Также наблюдаются отдельные пики небольшой амплитуды, амплитуда и положение которых зависят от качества очистки поверхности ацетоном. Эти пики можно ассоциировать с остаточными загрязнениями поверхности. Уровень сигнала 5 соответствует рэлеевскому рассеянию в бессердцевинном волокне без оболочки (–90 дБ). Отсюда следует, что пик 4 соответствует отражению от торца оболочки на границе с воздухом. Уменьшение уровня сигнала примерно на 10 дБ до и после сварки можно объяснить значительным коэффициентом отражения от сварки. Сигнал 6 соответствует концу линии БСВ, что подтверждается прямым измерением длины образца линейкой. Природа пика 7 не установлена.

На рис. 2б показана рефлектограмма при заведении излучения в БСВ со стороны, очищенной от оболочки. Уровень сигнала 1 также соответствует рэлеевскому рассеянию в одномодовом волокне (–70 дБ). Уровень сигнала 2 соответствует сигналу рассеяния Рэлея в БСВ без оболочки (–89 дБ), при этом в сигнале также наблюдаются одиночные пики небольшой амплитуды из-за остаточной загрязненности поверхности. Уровень сигнала 4 соответствует уровню рассеяния Рэлея в БСВ без оболочки, –80 дБ. Наблюдается аналогичное изменение сигнала на 10 дБ при переходе из отрезка БСВ без оболочки в отрезок БСВ с оболочкой. Пик 5 соответствует концу линии БСВ. Природа пика 6 не установлена.

На рис. 2в для сравнения одновременно показаны обе рефлектограммы. При этом рефлектограмма на рис 2б развернута и смещена по оси длин. Видно, что уровни сигналов в отрезках БСВ с оболочкой и без оболочки и соответствующие пики хорошо совпадают.

2.3. Эрбиевое волокно

Далее к рефлектометру последовательно подключались образцы эрбиевых волокон. Поскольку самосканирующий волоконный лазер, используемый в качестве перестраиваемого источника в схеме рефлектометра, работает в области 1.06 мкм, а исследуемые волокна – в области 1.55 мкм, для их подключения использовались FC/APC-коннекторы (1.55 мкм) для снижения потерь. К свободному концу каждого активного волокна приваривались отрезок поляризационно-сохраняющего одномодового волокна и отрезок БСВ для уменьшения отражения от свободного конца линии.

Результаты для различных волокон приведены соответственно на рис. 3а–ж.

Рис. 3. Рефлектограммы для активных эрбиевых волокон разных производителей...
--

Можно отметить, что рефлектограммы для всех исследованных ЭВ имеют схожий характер. Во всех измерениях уровень сигнала, соответствующего рэлеевскому рассеянию в одномодовом волокне до образца, составлял порядка –70 дБ. Уровень шума измерительной системы составляет –97 дБ. После первой сварки происходит увеличение уровня рассеянного сигнала (от –65 до –71 дБ), величина которого практически не меняется на всей длине образцов. Этот уровень сигнала также можно связать с рэлеевским рассеянием в сердцевине ЭВ. Постоянство уровня свидетельствует о незначительном вкладе процесса поглощения зондирующего излучения ионами эрбия. После активного волокна наблюдается обратное уменьшение сигнала рассеяния; его уровень практически равен уровню сигнала в одномодовом волокне до ЭВ. Незначительное уменьшение уровня можно объяснить качеством сварных соединений. Высокий пик соответствует отражению Френеля от конца линии. Все охарактеризованные образцы можно разделить на две группы: образцы, для которых наблюдается изменение уровня сигнала, и образцы, у которых сигнал сравним с сигналом в одномодовом волокне.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В табл. 1 приведены различные параметры эрбиевых волокон. Параметры как взяты из спецификаций производителя (числовая апертура, диаметр поля моды, диаметр оболочки), так и получены экспериментально (уровень рассеянного сигнала). В таблице наблюдается определенная корреляция между уровнем сигнала и числовой апертурой (NA) волокна. Можно предположить, что уровень сигнала на рефлектограмме пропорционален значению числовой апертуры. Это предположение подтверждается также сравнением с известным значением числовой апертуры (0.125) для одномодового волокна с сохранением поляризации PM 1550-XP.

Таблица 1. Измеренные и справочные параметры для активных эрбиевых волокон, используемых в эксперименте

Производитель	Марка волокна	Уровень сигнала в ЭВ ± погрешность, дБ	Числовая апертура NA	Диаметр поля моды для 1550 нм, мкм	Диаметр оболочки, мкм
Nufern	PM-ESF-7/125	-71.36 ± 1.42	0.15	8.8	125
Nufern	PS-ESF-3/125	-64.12 ± 1.69	0.28	4.9	124.8
Nufern	EDFC-980-HP	-62.32 ± 1.95	0.23	5.8	125
Coreactive	ER35-7-PM	-65.86 ± 1.45	0.22	6.5	124.0
nLIGHT	ER80-8-125-PM	-71.76 ± 1.52	0.13	9.5	125
iXblue	IXF-EDF-HD-PM	-65.71 ± 1.71	0.20	7.4	125.7
ПНППК	нет данных	-65.71 ± 1.45	нет данных	нет данных	80
нет данных	PM 1550-XP	-71.29 ± 1.46	0.125	10.1	125

На рис. 4 показана зависимость уровня сигнала в образцах ЭВ от величины числовой апертуры, приведенной в единицах $10\lg(\text{NA})$. Красной точкой показано значение для пассивного волокна PM 1550. При указанном разбросе точек данную зависимость имеет смысл аппроксимировать прямой линией. Наклон зависимости в двойном логарифмическом масштабе оказался равным 2.64 ± 0.43 . Этот результат означает, что уровень обратно рассеянного сигнала квадратично или кубически зависит от числовой апертуры волокна. Следует отметить, что в работе [28] показано, что коэффициент захвата волны, рассеянной назад, пропорционален квадрату числовой апертуры. Также стоит отметить, что на уровень сигнала в эрбиевом волокне, помимо числовой апертуры, могут влиять и другие факторы. Во-первых, это неоптимальность поляризации распространяющегося излучения. В волокнах, не поддерживающих линейную поляризацию, наблюдалась зависимость уровня сигнала (в том числе его неоднородность) от укладки волокна. Во-вторых, заметное влияние оказывает уровень потерь на сварном соединении между подводящим и эрбиевым волокнами. В частности, иногда на рефлектограмме в месте сварки наблюдался высокий пик отражения, что соответствует плохому качеству сварки.

Рис. 4. Зависимость уровня рассеяния Рэлея в образце...

Учитывая определенный наклон 2.6 и погрешность определения уровня сигнала около ± 1.5 дБ, мы делаем вывод, что оценка погрешности определения апертуры составляет примерно ± 0.6 дБ. Это соответствует ошибке в определении числовой апертуры примерно ± 0.03 .

Выбор нерезонансной длины волны рефлектометра по отношению к ионам эрбия позволяет анализировать достаточно длинные отрезки ЭВ даже с относительно большим уровнем легирования. Это принципиально отличает полученные результаты от работы по исследованию поглощения в ЭВ [11]. Хотя это не позволяет определить коэффициент

поглощения ионами эрбия, данная особенность открывает возможность для измерения температуры внутри лазерных схем на основе ЭВ по аналогии с работой [12].

Таким образом, полученные результаты позволяют заключить, что уровень рэлеевского рассеяния в любых волокнах, включая специальные, преимущественно определяется коэффициентом захвата рассеянного излучения, который, в свою очередь, квадратично зависит от числовой апертуры. Это означает, что метод OFDR может быть использован для измерения числовой апертуры оптических волокон.

В экспериментах с БСВ также наблюдалось изменение уровня сигнала рассеяния в зависимости от наличия или отсутствия внешнего акрилатного покрытия. Данное волокно имеет слабые волноводные свойства и используется, в частности, для уменьшения обратного отражения от неиспользуемых портов волоконных компонентов. Показатель преломления защитной акрилатной оболочки выше показателя преломления кварцевой оболочки, поэтому заметная доля излучения попадает из кварцевой оболочки в акрилатную, и волокно становится чувствительным к появлению загрязнений различной природы. Также наблюдалось, что при переходе излучения из БСВ с оболочкой в БСВ без оболочки происходит сильное отражение на границе сред оболочка–воздух. Это отражение может быть использовано в сенсорных задачах или при построении волоконных интерферометров. Отметим, что сигнал для БСВ с оболочкой примерно на 10 дБ выше, чем для БСВ без оболочки. Такое поведение можно объяснить дополнительным рассеянием света как в самом акрилате, так и на его поверхности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института автоматики и электрометрии СО РАН (тема №125022002714-2) с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Спектроскопия высокого разрешения газов и конденсированных сред” ИАиЭ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *MacDonald R.I.* Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 1840. <https://doi.org/10.1364/AO.20.001840>
2. *Ding Z., Wang C., Liu K. et al.* J. Sens. 2018. V. 18. № 4. P. 1072. <https://doi.org/10.3390/s18041072>
3. *Lu Z., Feng T., Li F., Yao X.S.* J. Sens. 2023. V. 23. № 12. P. 5748. <https://doi.org/10.3390/s23125748>
4. *Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E.* Opt. Express. 2005. V. 13. № 2. P. 666. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.000666>

5. *Hartog A.H.* An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Boca Raton: CRC Press, 2017. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
6. *Lobach I.A., Fotiadi A.A., Yatseev V.A. et al.* J. Sens. 2024. V. 24. № 16. P. 5432. <https://doi.org/10.3390/s24165432>
7. *Loranger S., Gagné M., Lambin-Iezzi V., Kashyap R.* Scien. Rep. 2015. V. 5. № 1. P. 11177. <https://doi.org/10.1038/srep11177>
8. *Du Y., Ye C.* Opt. Exp. 2023. V. 31. № 22. P. 35948. <https://doi.org/10.1364/OE.506039>
9. *Faustov A.V., Gusarov A.V., Mégret P., et al.* Res. Phys. 2016. V. 6. № C. P. 86. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.02.001>
10. *Perrot J., Morana A., Marin E. et al.* IEEE Sens. J. 2024. V. 24. № 13. P. 20688. () <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3401249>
11. *Wegmuller M., Oberson P., Guinnard O., B. Huttner, Guinnard L., Vinegoni C., Gisin N. J.* Lightwave Technol. 2000. V. 18. № 12. P. 2127. <https://doi.org/10.1109/50.908823> .
12. *Kamynin V.A., Wolf A.A., Skvortsov M.I., Filatova S.A., Kopyeva M.S., Vlasov A.A., Tsvetkov V.B., Babin S.A., J.* Lightwave Technol. 2021. V. 39. № 18. P. 5980. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3095396>
13. *Xu W., Shi J., Yang X. et al.* J. Sens. 2017. V. 17. № 10. P. 2240. <https://doi.org/10.3390/s17102240>
14. *Zhao Y., Zhao J., Zhao Q.* Sensors and Actuators A: Physical. 2020. V. 313. № 3. P. 112160 <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112160>
15. *Hu H., Song X., Han Q. et al.* IEEE Sens. J. 2019. V. 20. № 6. P. 2967. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2956559>
16. *Diggonet M.J.F.* Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. Boca Raton: CRC Press, 2001. <https://doi.org/10.1201/9780203904657>
17. *Lobach I.A., Kablukov S.I., Podivilov E.V., Babin S.A.* Las. Phys. Lett. 2014. V. 11. № 4. P. 045103 () <https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/4/045103>
18. *Krivosheina D.A. , Tkachenko A.Y. , Lobach I.A., Kablukov S.I.* 23rd IEEE EDM. 2022. P. 352. <https://doi.org/10.1109/EDM55285.2022.9855153>
19. *Смолянинов Н.Н., Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И.* ПТЭ. 2021. № 2. С. 76. <https://doi.org/10.31857/S0032816221020099>
[*Smolyaninov N.N., Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Kablukov S.I.* Instrum. Exp. Tech. 2021. V. 64. P. 241. <https://doi.org/10.1134/S0020441221020081>]
20. *Ткаченко А.Ю., Лобач И.А., Каблуков С.И.* Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 12. С. 1121. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41537725>

- [Tkachenko A.Y., Lobach I.A., Kablukov S.I. Quantum Electron. 2019. V. 49. P. 1121. <https://doi.org/10.1070/QEL17165>]
21. Спецификация оптического волокна Thorlabs FG125LA. thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG125LA (дата обращения: 07.07.2026).
 22. Спецификация оптического волокна Nufern PM-ESF-7/125. lenlasers.ru/product/volokno-nufern-pm-esf-7-125/ (дата обращения: 07.07.2026).
 23. Спецификация оптического волокна Coreactive ER35-7-PM www.coractive.com/wp-content/uploads/2020/08/er35-7-pm_r1.pdf (дата обращения: 07.07.2026).
 24. Спецификация оптического волокна nLIGHT ER80-8-125-PM. www.nlight.net/optical-fibers-products/liekki-er80-8/125-fdr3s (дата обращения: 07.07.2026).
 25. Спецификация оптического волокна IXblue IXF-EDF-HD-PM. shop.exail.com/photonics-products/128-ixf-edf-hd-pm.html (дата обращения: 07.07.2026).
 26. Спецификация оптического волокна Nufern PS-ESF-3/125. www.coherent.com/resources/datasheet/components-and-accessories/specialty-optical-fibers/ps_esf_3_125_spec_202011122120.pdf (дата обращения: 07.07.2026).
 27. Спецификация оптического волокна Nufern EDFC-980-HP. www.coherent.com/resources/datasheet/components-and-accessories/edfc-980-hp-ds.pdf (дата обращения: 07.07.2026).
 28. Fang Z., Chin K.K., Qu R., Cai H. Fundamentals of optical fiber sensors. John Wiley & Sons, Inc., 2012. <https://doi.org/10.1002/9781118381717>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема эксперимента. В пунктирном прямоугольнике показано две независимо исследуемые линии: А – линия подключения для БСВ, Б – линия подключения для активных эрбиевых волокон. На фото показан реальный вид когерентного рефлектометра COBRA

Рис. 2. Измеренные рефлектограммы для БСВ при двух способах ввода зондирующего излучения: **а** – через сторону с защитной оболочкой, **б** – через сторону без оболочки, **в** – обе рефлектограммы: черная линия – рефлектограмма **а**, красная линия – рефлектограмма **б**, развернутая и смещенная по оси длин

Рис. 3. Рефлектограммы активных эрбиевых волокон от разных производителей: **а** – Nufern (PS-ESF-3/125), **б** – Coreactive (ER35-7-PM), **в** – IXblue (IXF-EDF-HD-PM), **г**) ПНППК, **д** – Nufern (PM-ESF-7/125), **е** – nLIGHT (ER80-8-125-PM), **ж** – Nufern (EDFC-980-HP); **з** – все рефлектограммы, цветом указаны разные производители

Рис. 4. Зависимость уровня рассеяния Рэлея в образце от $10 \lg(\text{NA})$ (черные точки), линейная аппроксимация (серая линия), значение уровня рассеяния Рэлея для PM 1550-XP (красная точка)

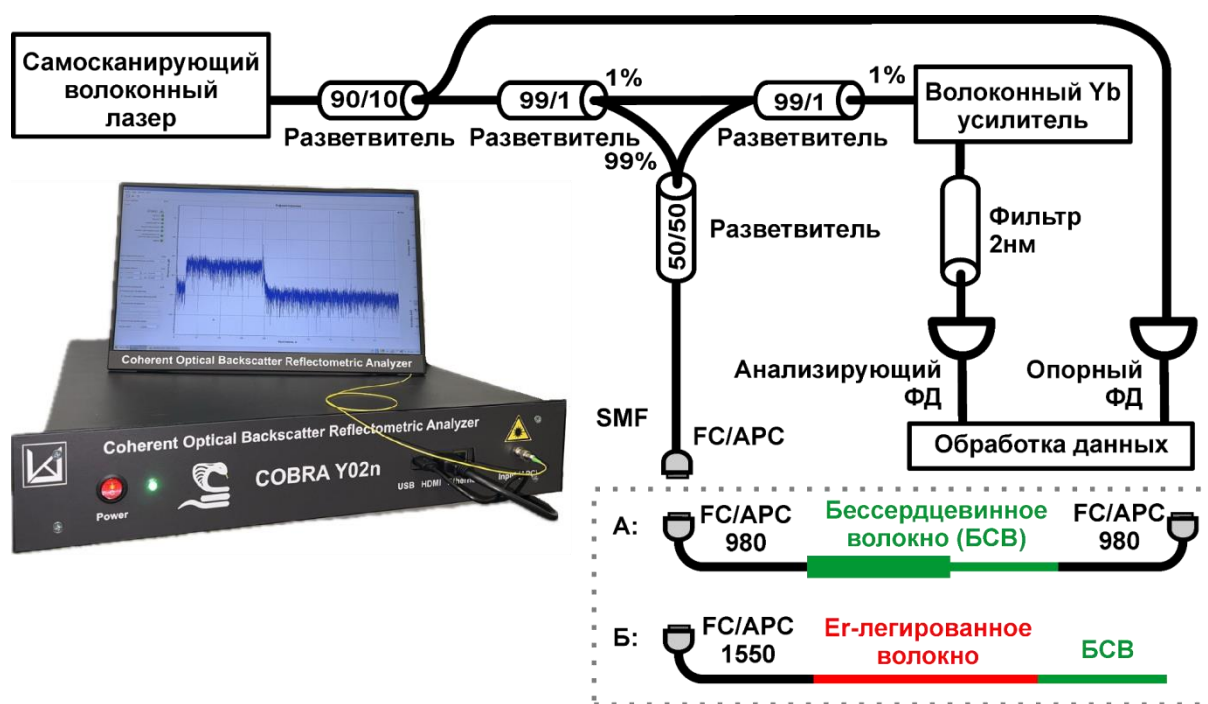


Рис. 1

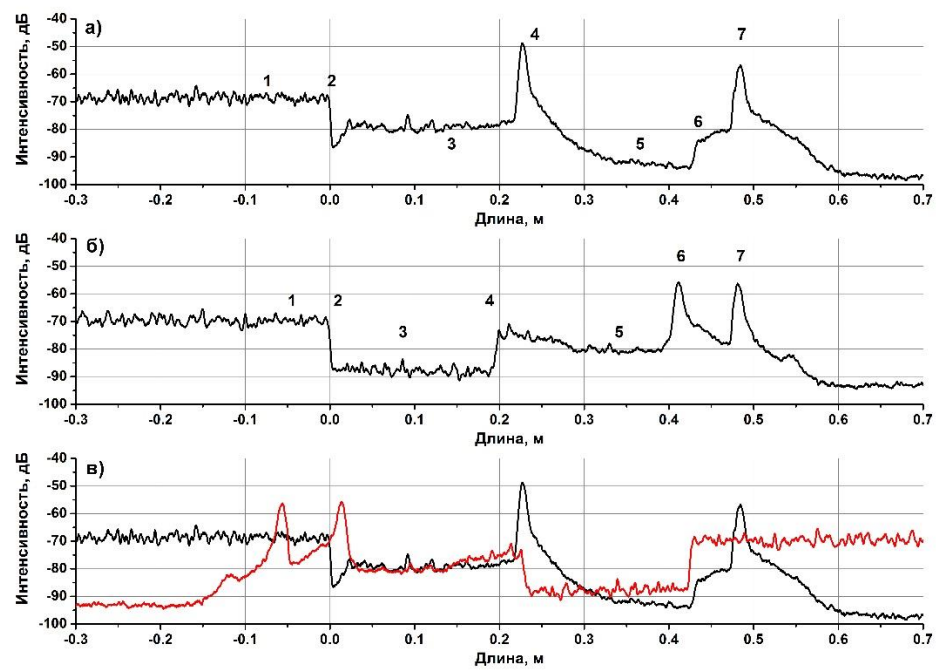


Рис. 2

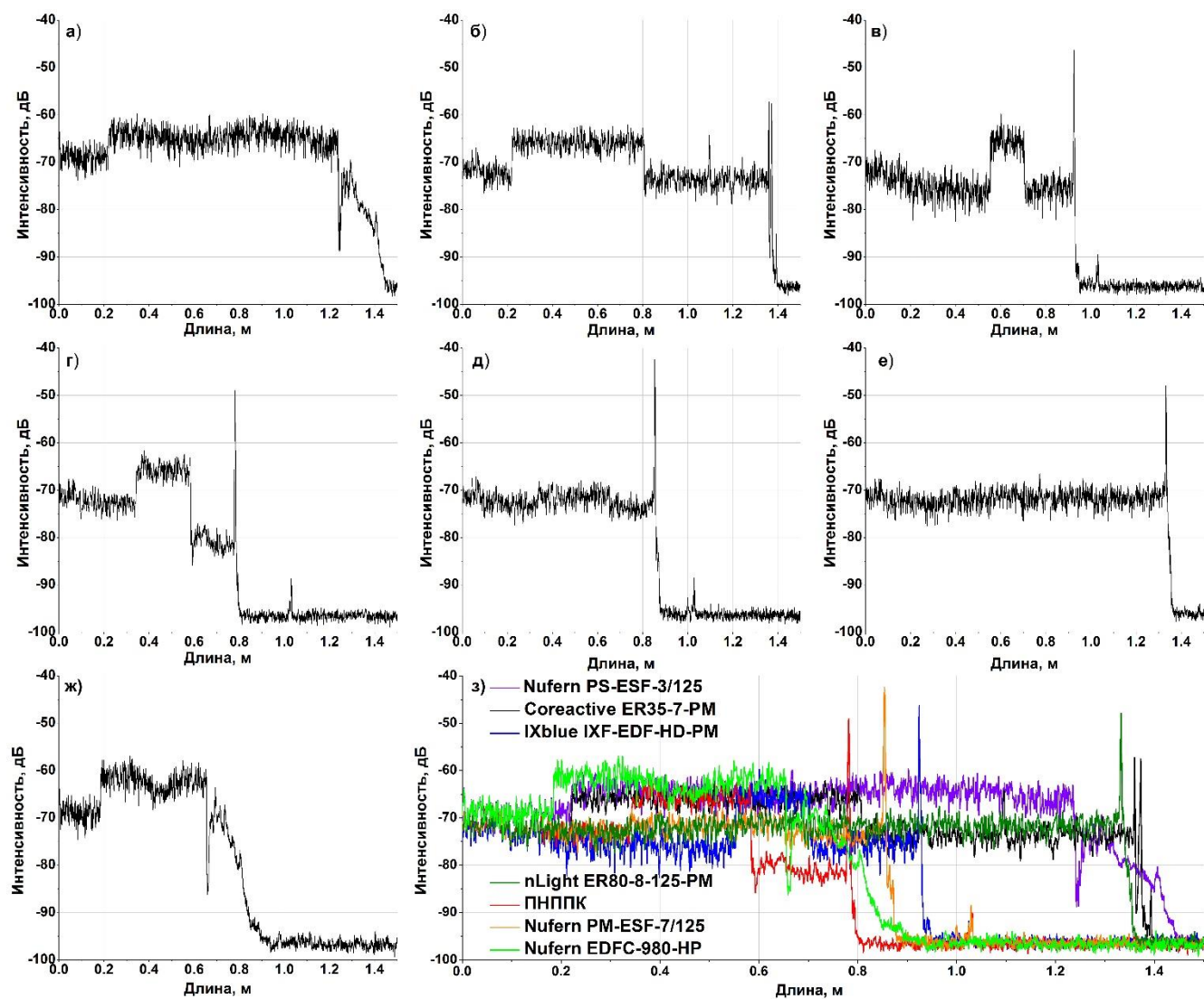


Рис. 3

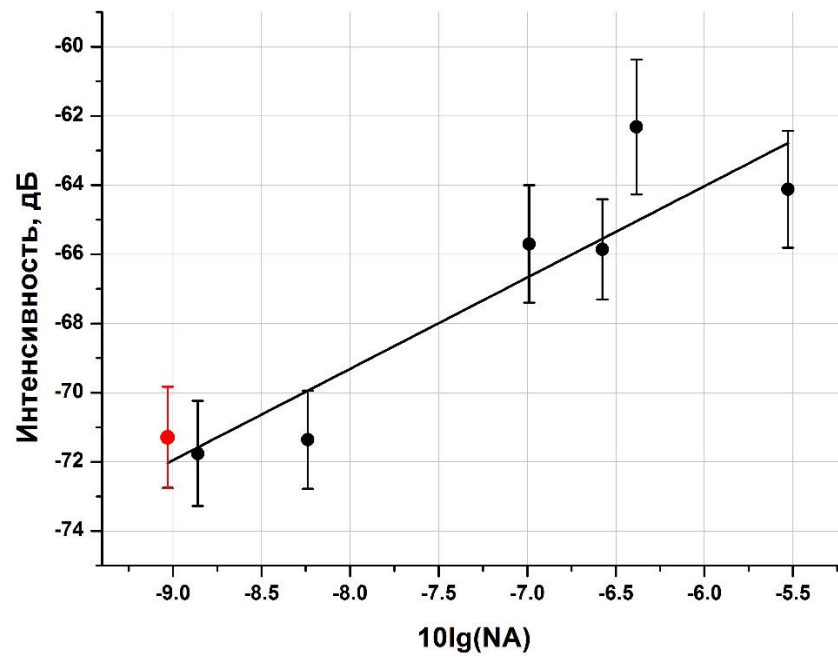


Рис. 4