ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 45–50

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 53.084535

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ АКТИВНЫХ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ[1]

© 2020 г. М. Е. Белокрылов[a,b,*], Ю. А. Константинов[a], К. П. Латкин[a,c], Д. Клод[a], Д. А. Селезнев[c,d], А. А. Степин[c], Ю. А. Конин[c,d], В. А. Щербакова[b], Р. Р. Кашина[d]

[a] *Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН*
Россия, 614990, Пермь, ул. Ленина, 13а

[b] *Пермский государственный национальный исследовательский университет*
Россия, 614990, Пермь, ул. Букирева, 15

[c] *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский проспект, 29

[d] *Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПНППК)*
Россия, 614990, Пермь, ул. 25 Октября, 106

**e-mail: belokrylovme@gmail.com*

Поступила в редакцию 03.03.2020 г.
После доработки 24.03.2020 г.
Принята к публикации 26.03.2020 г.

Сконструирован экспериментальный стенд на основе иттербиевого импульсного лазера с пассивным затвором на гольмиевом волокне, обеспечивающий рефлектометрическое исследование во временной области длины образцов активных волоконных световодов после вытяжки и на этапах складского хранения. Обсуждена возможность исследования неоднородностей в волокне и количественной оценки коэффициента затухания оптического сигнала на длине волны источника излучения. Полученные результаты свидетельствуют о возможности проведения исследований такого типа, а также потенциального создания рефлектометров для нужд лабораторий предприятий, серийно выпускающих активные волоконные световоды.

DOI: 10.31857/S0032816220050018

ВВЕДЕНИЕ

Волоконные световоды, легированные активными ионами, также иногда называемые активными оптическими волокнами, нашли широкое применение в современной фотонике [1]. Основная их роль – работа в составе волоконных лазеров и усилителей в приборах и устройствах различного назначения. Они используются в связи, сенсорных системах, навигации, медицине, биофотонике и других областях [2, 3].

Самое большое распространение получили волокна, легированные ионами эрбия, они люминесцируют на длине волны 1.5 мкм в окне прозрачности кварцевых оптических волокон. Обычно в эрбиевых волоконных лазерах и усилителях применяются контуры активных волокон порядка единиц или десятков метров.

Исследование оптических параметров на этапе производства световодов включает несколько стадий. Так, распределение активного редкоземельного металла в преформе (заготовке) активного волокна исследуют при помощи анализатора, осуществляющего пространственное сканирование диодом накачки на длине волны 980 нм [4], после вытяжки осуществляется разделение волокон на фрагменты, и каждый из них исследуется спектрально. Также изучаются другие оптико-геометрические параметры волокон.

Величина, которая не измеряется напрямую в промышленной лаборатории, – фактическая длина световода. Ориентирами при паспортизации данного параметра обычно являются счетчик метража приемного устройства башни вытяжки волокна и расчетные величины длины световода, полученные из параметров заготовки. Фактическое время запуска счетчика метража в условиях различного времени выхода процесса на режим в ряде случаев может определяться среди прочего и человеческим фактором, особенно, если речь

[1] Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020” (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

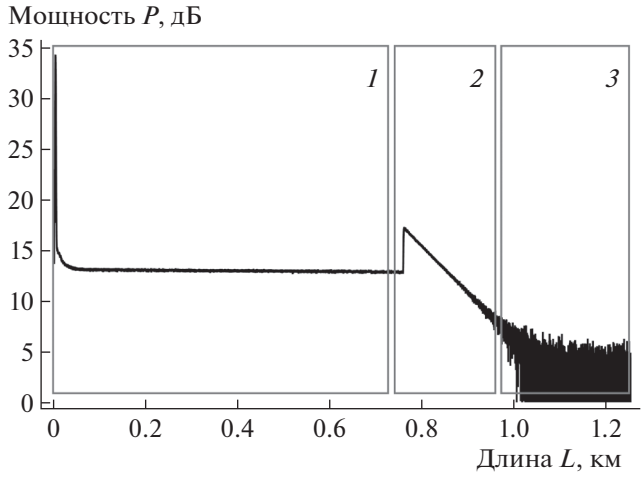

Рис. 1. Рефлектограмма, полученная в результате тестового измерения.

идет об экспериментальных конструкциях световодов.

Далее активный волоконный световод, длина которого возможно неточно зарегистрирована, поступает на производство волоконных лазеров или усилителей. В различных оптоэлектронных устройствах используется различная длина активного волокна и зачастую подбирается экспериментально, а значит, каждый раз отматывается с запасом. Регламентировать как сам такой запас, так и способ его фактического контроля для каждого исследователя достаточно сложно.

Это может привести к тому, что с учетом всех ранее упомянутых факторов информация о длине световода, хранящегося на складе, уже после 50–70 отмоток с нескольких километров волокна накапливает достаточно весомую ошибку в единицы, а иногда в десятки метров. Несложно оценить, что при рыночной стоимости активного эрбиевого волокна от 20 до 100 долларов США за 1 м описанные неточности приобретают и финансовую важность. Необходимо при этом оценивать и качество оставшегося волокна – имеет ли оно значительные девиации оптико-геометрических параметров по длине (особенно актуально, когда исследуется активное волокно типа “Панда”, процесс изготовления которого более сложен [5]).

Измерить длину волоконного световода довольно просто: достаточно подобрать длину волны источника излучения, на которой коэффициент затухания оптического сигнала в волокне не столь велик, разделить его оптическим делителем на два плеча, в одно из которых встроить исследуемый световод, а потом объединить вновь для совместной регистрации фотоприемником и записи временной развертки. Если показатель преломления сердцевины волокна, определяющий скорость света в образце, известен и однороден по длине, то точность определения протяженности световода будет определяться лишь параметрами аналого-цифрового преобразования сигнала (единицу или десятки сантиметров в пересчете на длину волокна). При этом, однако, информация об упомянутых неоднородностях в световоде будет потеряна. Для оценки подобных дефектов целесообразно применение методов оптической рефлектометрии.

Исследовать длину активного волокна и качественно оценить его однородность рефлектометрическим способом сразу после вытяжки не позволяют достаточно высокие потери сигнала оптического излучения на длинах волн, на которых работают типовые оптические рефлектометры. Наглядно данную невозможность, хоть и вполне очевидную, но все же требующую верификации, демонстрирует тестовое измерение, выполненное авторами ранее (рис. 1).

Для тестового замера использовался типовой рефлектометр для исследования оптических волокон и кабелей Yokogawa AQ7260 (Yokogawa, Япония), излучающий на длине волны 1310 нм (второе окно прозрачности кварцевого стекла выбрано для максимально возможного смещения из области поглощения эрбия). На рис. 1 область *1* соответствует балластной катушке одномодового кварцевого волокна SMF28e (Corning, США), которая необходима для вывода места стыковки с эрбиевым световодом из мертвой зоны рефлектометра и наглядности рефлектограммы. С ней сварен активный эрбиевый волоконный световод M12-980-125 (Thorlabs, США) – область *2*, имеющий выходной торец в области *3*.

Как и следовало ожидать, активный световод длиной около 300 м не только не может быть исследован на предмет оптических потерь (сигнал выходит за динамический диапазон и зашумлен), но и его выходной торец, обратное отражение от которого имело теоретические шансы на идентификацию, не локализуется. А именно этот сигнал и несет информацию о длине оптического волокна.

По информации авторов, существует лишь одна научная группа, которая в ряде своих работ рассмотрела рефлектометрию активных волоконных световодов [6]. Они использовали технику OFDR (оптическую рефлектометрию частотной области) и добились существенного прогресса в повышении разрешения исследования непротяженных оптических волокон. Однако для поставленной задачи эта методика представляется неприемлемой. Во-первых, спектры пропускания активных волокон имеют резкие перепады в десятки децибел, поэтому сканирование в частотной области может дать неравномерный отклик на разных длинах волн, что усложнит интерпретацию данных. Во-вторых, протяженность исследуемых световодов в данном случае будет в числе

прочих факторов определяться и длиной когерентности источника излучения, что усложнит и сделает более затратным сам метод.

Практический интерес представляет также оценка возможности получения количественной оценки коэффициента затухания оптического сигнала вследствие поглощения на некоторых длинах волн, а также качественная оценка пространственной равномерности волокон больших длин. Научных работ, где данные задачи были решены для активных эрбиевых волоконных световодов, по информации авторов, на момент написания публикации нет.

Таким образом, ставится задача разработки метода измерения длины активного эрбиевого волоконного световода. Характерный диапазон протяженности образцов составит от 500 до 5000 м.

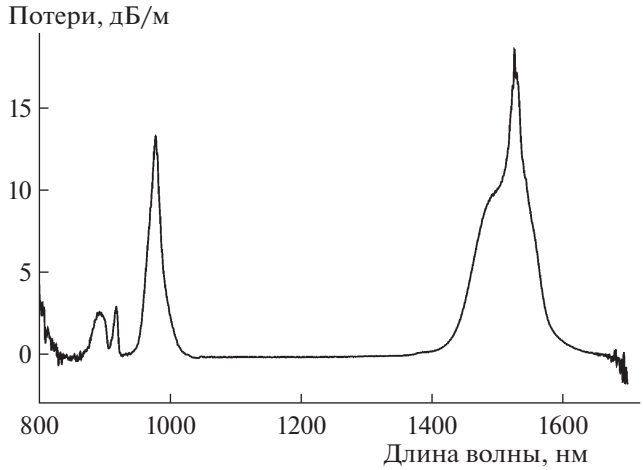

Рис. 2. Спектр поглощения активного волоконного световода, легированного ионами эрбия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПАРАМЕТРЫ ЕЕ УЗЛОВ

Для создания установки необходимо определиться с длиной волны излучения рефлектометрической системы. Спектр поглощения активного эрбиевого световода представлен на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что на плато 1050–1350 нм в сравнении с областями поглощения редкоземельных элементов световод имеет значительно меньшие потери оптической мощности. На практике они могут быть меньше в 10^3–10^4 раз и составлять единицы децибел на километр световода. Практический опыт (рис. 1) показывает, что область 1310 нм слабо пригодна для поставленной задачи. Стоит, однако, заметить, что плато имеет некоторый спад в сторону коротковолновой области (имеющаяся у авторов аппаратура не позволила оценить насколько он велик), что дает шанс на успех регистрации на длинах волн около 1050–1100 нм.

В указанной области хорошо зарекомендовали себя иттербиевые лазеры [7]. Модуляцию излучения таких источников можно осуществить различными способами. К примеру, воспользоваться интегрально-оптическим модулятором Маха–Цендера или акустооптическим модулятором. Однако применение первого сопряжено с рядом трудностей: отслеживание и компенсация ухода рабочей точки, невозможность работы с требуемыми оптическими мощностями. Вариант с акустооптическим модулятором затруднен ввиду его немалой стоимости и необходимости включения в экспериментальный стенд генератора частот.

Разумным и не самым ресурсозатратным выходом может быть применение импульсного волоконного источника с пассивным затвором [8, 9]. Применение полностью волоконного рефлектометра (за исключением регистрирующих устройств) позволяет создать достаточно простое устройство без использования большого числа внешних электронных устройств (драйверов, генераторов, согласующих схем). Устройство такого лазера в составе рефлектометра временной области представлено на рис. 3.

Были использованы диод накачки с центральной длиной волны излучения 976 нм мощностью 50 Вт с внешним активным охлаждением K976AA5RN-50.00 (BWT, КНР) и двухэлементное волокно, легированное активными ионами иттербия, длиной 25 м. Поглощение на длине волны накачки (976 нм) составляет 0.4 дБ/м из оболочки и 80 дБ/м из сердцевины. В качестве пассивного затвора использовано гольмиевое волокно производства ПАО “ПНППК” (Пермь) длиной 12 м, потери поглощения на длине волны 1125 нм составляют 16.14 дБ/м, на длине волны 1151 нм – 35.7 дБ/м. Также в схеме пассивного затвора использованы три волоконные брэгговские решетки с коэффициентом отражения 100%: две из них на длину волны 2050 нм.

Лазерный резонатор состоит из двух решеток на 1081 нм: HR, имеющая высокий коэффициент отражения и широкий спектр с центром в 1079 нм, и 30%-ная решетка с пиковым отражением на длине волны 1081 нм, шириной спектра ~2 нм. Оптический поляризационно-нечувствительный трехплечевой циркулятор производителя LightComm (КНР) использовался для перенаправления излучения в исследуемый образец волокна (*ИОВ*) – волоконный световод, легированный эрбием.

В качестве регистратора использовался фотоприемник HCA-S-200M-IN (Femto, Германия) с частотой регистрации сигнала 200 МГц (Детектор 1). Второй детектор (Детектор 2) PDA10D-EC (Thorlabs, США) с частотой регистрации сигнала 150 МГц использовался для получения синхронизирующего сигнала. В качестве аналого-цифрового преобразователя и визуализатора процесса был применен цифровой осциллограф (*ЦО*) GWInstek MDO-72072EX с разрядностью 8 бит и частотой дискре-

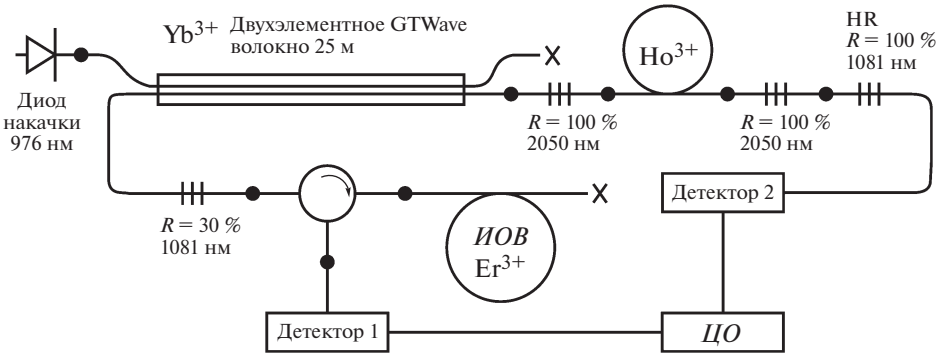

Рис. 3. Макет рефлектометра временной области на основе импульсного иттербиевого лазера с пассивным затвором. *ЦО* – цифровой осциллограф, *ИОВ* – исследуемый образец волокна.

тизации 1 ГГц производства GWInstek (Тайвань). Параметры исследуемого образца производства ПАО "ПНППК": диаметр световедущей сердцевины 6 мкм; длина волны отсечки 0.92 мкм; максимальное поглощение оптического излучения на длине волны 980 нм – 13.9 дБ/м, на длине волны 1530 нм – 19.3 дБ/м; коэффициент затухания оптического излучения на длине волны 1200 нм – 7.93 дБ/км; длина ±620 м.

Спектр источника излучения, снятый с разрешением 0.1 нм при 10000 усреднений, выполненных лабораторным анализатором спектра AQ6370D (Yokogawa, Япония), представлен на рис. 4. Центральная длина волны приходится на 1081 нм. Ширина спектра составляет несколько нанометров.

Важнейшими характеристиками источника излучения для оптической рефлектометрии временной области являются также длительность и скважность импульса. Длительность импульса определяет как пространственное разрешение, так и динамический диапазон измерительной системы. Минимально возможная скважность определяется временем двукратного прохождения света полной длины волокна. Характерные длительности импульсов, пригодных для зондирования в ходе решения описываемой задачи, определяются десятками и сотнями наносекунд, характерные скважности – микросекундами. На рис. 5 представлена временная развертка импульсов (при вводе излучения в образец).

Скважность импульсов в незначительной степени варьируется (в пределах десятков наносекунд), что не является важным фактором при корректно настроенной синхронизации. Отмечено также, что мощность импульсов в одной записи может отличаться до 30% от усредненной. Однако сама важная для измерения усредненная мощность в пакете из 1024 импульсов используемой в эксперименте техникой уже регистрируется как постоянная.

Достаточно гладкий и крутой фронт импульса (см. рис. 6) позволяет однозначно локализовать временную координату его начала в реальном

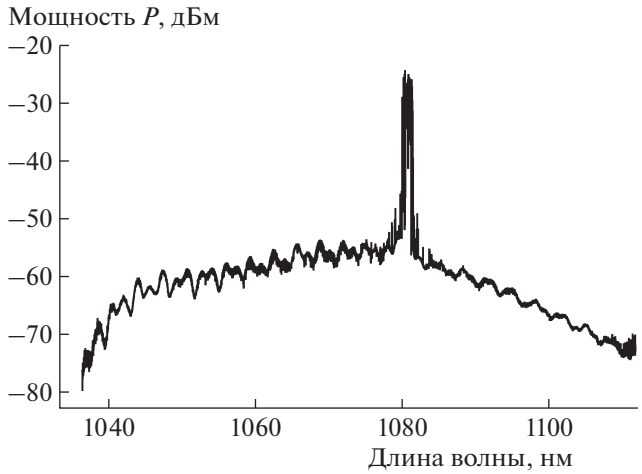

Рис. 4. Спектр импульсного иттербиевого лазера.

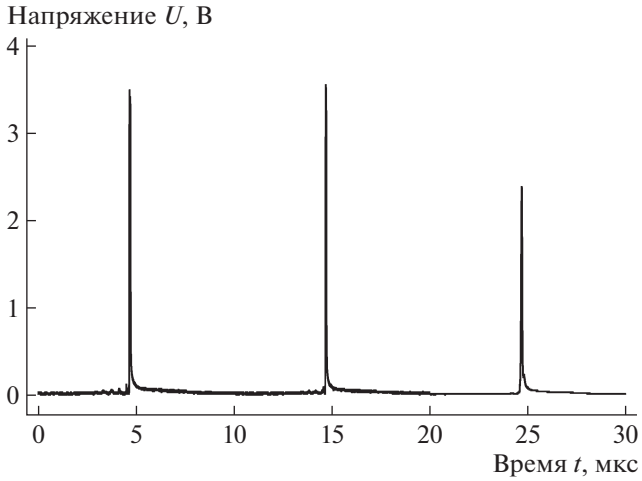

Рис. 5. Импульсный режим работы иттербиевого лазера.

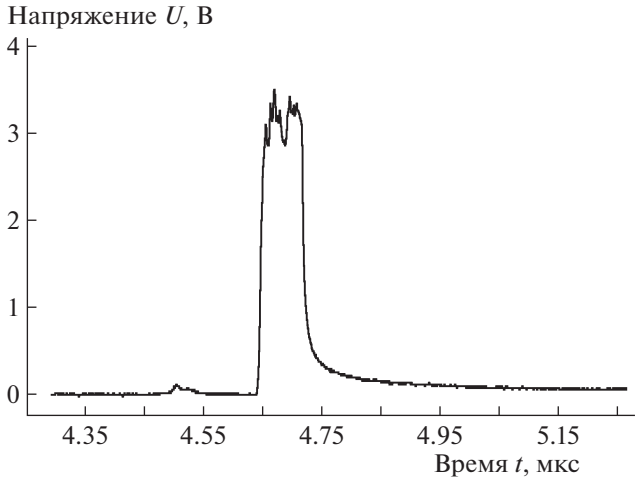

Рис. 6. Одиночный импульс разработанного иттербиевого источника излучения.

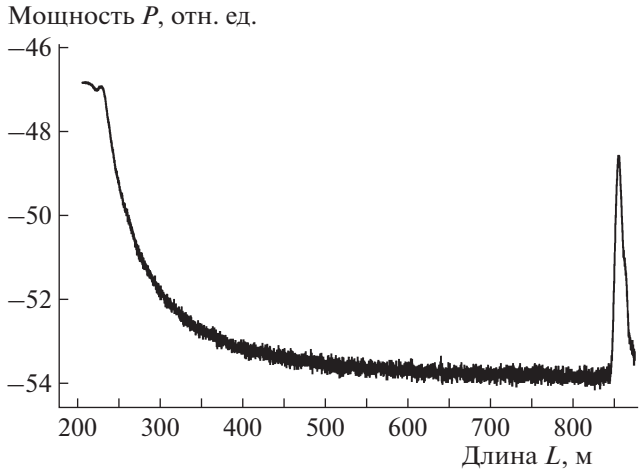

Рис. 7. Рефлектограмма активного эрбиевого волоконного световода.

времени, что использовалось для синхронизации. Длительность импульса составила 100 нс. В отличие от фронта импульса, его спад все же визуально затянут. Предполагается, что это не скажется драматическим образом на локализации координаты дальнего торца волокна. Экстинкция (контрастность) импульса по разным оценкам составила от 10 до 30 дБ, что также не является затруднительным моментом для реализации поставленной задачи.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанная установка была применена для исследования активного эрбиевого волоконного световода, параметры которого были даны выше. Излучение на длине волны 1081 нм в импульсном режиме с параметрами: длительность импульса 100 нс, скважность (не менее) 10 мкс, средняя мощность от 0.2 Вт, вводилось в исследуемый световод; параллельно регистрировалась запись обратнорассеянной мощности во времени. Полученная рефлектограмма представлена на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что длина удовлетворительно совпадает с паспортной. При правильно заданном показателе преломления сердцевины данный параметр определяется корректно. Известно, что главным лимитирующим фактором в данном случае является длительность импульса. Немаловажным также является режим оцифровки – известны работы, в которых исследователям удавалось получать разрешение, более точное, чем теоретически позволяет определенная длительность импульса [10].

В данной же работе был проведен простой эксперимент, в ходе которого исследуемое волокно последовательно укорачивалось на известную величину, и каждая такая рефлектограмма сохранялась для дальнейшей обработки. Результат эксперимента представлен на рис. 8.

Было установлено, что при заданных временных параметрах импульса и частоты дискретизации максимальное абсолютное отклонение при определении длины составило 1.82 м, что является вполне приемлемой величиной на фоне отсутствия каких-либо коммерческих инструментальных способов определения действительной длины активного эрбиевого волоконного световода. Проведение серии замеров и набор статистики позволят детализировать абсолютную ошибку измерения длины.

Для обсуждения вопроса о возможности оценки пространственной однородности волокна и коэффициента поглощения на длине волны 1081 нм необходимо вернуться к рис. 7. Видно, что коэффициент затухания, полученный по рефлектограмме, достаточно реалистичен – около 7 дБ/км (потери на близкой длине волны 1200 нм состав-

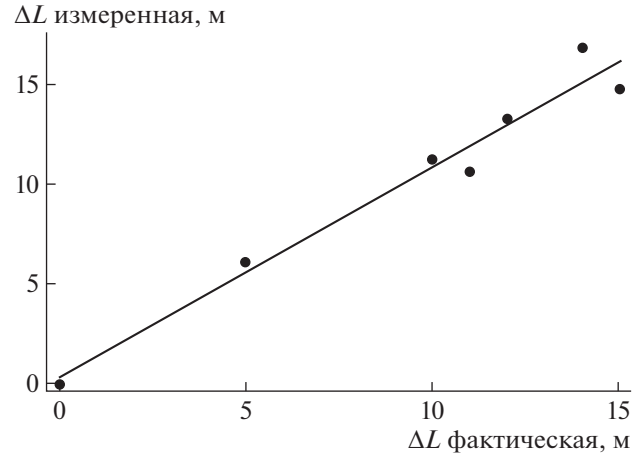

Рис. 8. Сопоставление фактического и измеренного укорочения длины волокна.

ляют согласно паспорту 7.93 дБ/км), однако сама рефлектограмма имеет довольно нехарактерный для типовых оптических потерь, отображаемых в логарифмических единицах, плавный изгиб.

Убедиться, что он является свойством самого процесса измерения, а не характеристикой среды распространения, несложно – достаточно скоммутировать исследуемый световод с рефлектометром другим торцом; изгиб при этом остается без существенных изменений. Более того, он визуализируется и на других исследуемых образцах. Возможно, данная особенность полученных данных является следствием работы созданного устройства на границах динамического диапазона и/или насыщением поглощения.

Следует также отметить, что если плавный изгиб рефлектограммы действительно определен только особенностями эксперимента, наблюдение и пространственная локализация неоднородностей по-прежнему теоретически возможны. Для подтверждения данной гипотезы авторам необходимо лишь изучить достаточное количество эрбиевых волоконных световодов, потенциально имеющих локальные неоднородности.

Таким образом, описанное явление также требует набора статистики и дальнейшего изучения, в то время как основную задачу настоящего исследования – рефлектометрического измерения длины активных эрбиевых волоконных световодов при помощи полностью волоконной схемы можно считать выполненной на уровне макетного образца нестандартного средства измерения, применяющегося в заводской лаборатории.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят И.А. Лобача (Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск), В.В. Бурдина (Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН и Пермский национальный исследовательский политехнический университет) и И.И. Крюкова (Научно-образовательный центр ПАО “ПНППК”) за плодотворные дискуссии, а ПАО “ПНППК” – за предоставленные компоненты и образцы для изготовления макетной установки и испытаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Peng G., Luo Y., Zhang J., Wen J., Yan B., Canning J.* // 2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP). Melaka. 2013. P. 5. https://doi.org/10.1109/ICP.2013.6687053
2. *Tandirovic Gursel A.* // IntechOpen: London, UK. 2018 V. 1. https://doi.org/10.5772/intechopen.76610
3. *Ter-Mikirtychev V.* // Springer Series in Optical Sciences, 2014. V. 181. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02338-0_11
4. *Konstantinov Yu.A., Latkin K.P., Barkov F.L., Smirnov A.S., Poskrebyshev M.M., Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Konin Yu.A., Garanin A.I., Burdin V.V.* // Scientific Visualization. 2017. V. 9. Issue 4. P. 94.
5. *Von der Weid, Jean Pierre, Passy R., Gisin N.* // Photonics Technology Lett. IEEE. 1997. V. 9. 1253. https://doi.org/10.1109/68.618495
6. *Андреев В.А., Бурдин В.А., Дашков М.В.* // Электросвязь. 2010. № 2. С. 28.
7. *Liu P., Yan F., Wang L., Li J., Gong T., Tao P.* // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2008. 7134. https://doi.org/10.1117/12.803821
8. *Zervas M.N., Codemard C.A.* // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. 2014. V. 20. № 5. P. 219. Art no. 0904123. https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2321279
9. *Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I.* // Laser Phys. Lett. 2009. № 6. P. 135.
10. *Курков А.С., Шолохов Е.М.* // 3-й Российский семинар по волоконным лазерам: Сборник трудов. 31 марта–2 апреля 2009. Уфа, Россия. 2009. С. 54.