

МНОГОСТАДИЙНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

© 2021 г. В. В. Бурдин^{a,b,*}, Ю. А. Константинов^a, Д. Клод^a, К. П. Латкин^{a,b},
М. Е. Белокрылов^a, А. И. Кривошеев^a, М. К. Цибиногина^a

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

^b Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский просп., 29

*e-mail: vlaburdi@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 23.04.2021 г.

Разработан комплекс методик и сконструированы установки для многостадийного контроля качества активных волоконных световодов. Комплекс включает в себя экспериментальный стенд для измерения гидроксильных групп в крупке кварцевого стекла по поглощению крупки в области обертона валентных колебаний О–Н-групп 1300–1450 нм; установку для измерения концентрации ионов эрбия в преформе (метод основан на измерении интенсивности люминесценции ионов эрбия в области длин волн 1.54–1.56 мкм); а также экспериментальный рефлектометр для контроля качества активных оптических волокон. Указанные экспериментальные методики вместе представляют собой гибкий инструмент мониторинга качества активных волокон на стадиях от подготовки сырья до тестирования готовых волокон.

DOI: 10.31857/S0032816221050037

ВВЕДЕНИЕ

Базовым элементом для производства оптических волокон является кварцевая опорная труба, внутри которой происходит осаждение стекло-массы. Впоследствии такая труба становится заготовкой оптического волокна, и ее оптические свойства будут влиять на качество световода на завершающей стадии производства. Одним из ключевых параметров кварцевой трубы является концентрация гидроксильных групп в сырье – кварцевой крупке. Эта нежелательная примесь приводит к значительному поглощению излучения в окрестности длины волны 1400 нм и, в том числе, в первом и втором окнах прозрачности кварцевого стекла. Поэтому на начальной стадии необходимо осуществлять контроль концентрации гидроксильных групп (ОН) в крупке чистого кварцевого стекла.

На следующем этапе из кварцевого стекла изготавливают заготовку длиной 30–50 см (преформу) с внешним радиусом 15–20 мм и диаметром сердцевины примерно 1.5 мм, в которую добавляются необходимые легирующие примеси. В случае активного волокна чаще всего в сердцевину добавляют эрбий, который ионизируется, растворяясь в стекле. На стадии заготовки (преформы) не-

обходимо осуществлять распределенный (во всех точках объекта) контроль концентрации ионов эрбия – важнейшего параметра для волоконных лазеров и усилителей, в которых эрбиевые оптические волокна играют роль активной среды.

Наконец, из преформы вытягиваются оптические волокна – конечный продукт. Для контроля качества готовых активных оптических волокон используется рефлектометрический метод – метод обратного рассеяния. Этот метод позволяет измерять суммарные потери из-за рассеяния и поглощения, а также выявлять области различных неоднородностей в сердцевине волокна.

Литературные данные о рефлектометрических измерениях протяженных активных волоконных световодов практически отсутствуют. Дело в том, что у обычных волокон, применяемых для передачи информации, поглощение на рабочей длине волны 1.55 мкм составляет порядка 0.2 дБ/км. Это позволяет уже при динамическом диапазоне 10 дБ измерять линии длиной до 50 км. В активных волокнах поглощение на рабочей длине волны в области 1.5 мкм составляет десятки и даже сотни децибел на километр. В этих условиях обычные рефлектометрические устройства неприменимы, поскольку на фоне огромного затухания из-за по-

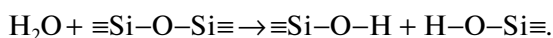
глошения потери, связанные с неоднородностями, просто не видны. Кроме того, возникает существенное ограничение на длину измеряемого отрезка волокна из-за конечного динамического диапазона.

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА КОНЦЕНТРАЦИИ ГИДРОКСИЛЬНЫХ ГРУПП В ОБРАЗЦАХ ИЗ ЧИСТОГО КВАРЦА В ОБЛАСТИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ 1400 нм

Для определения концентрации гидроксильных групп в веществе используют различные химические методы, например, дейтерий-обменные [1] и оптические, основанные на поглощении в основных полосах, обусловленных наличием ОН-групп [2].

В волоконной оптике основная длина волны, соответствующая окну прозрачности кварцевого стекла, равна 1.55 мкм. Для применений в волоконной оптике желательно проводить измерения вблизи данной спектральной области, поэтому была поставлена цель измерить концентрацию гидроксильных групп в области длины волны 1400 нм.

Поглощение на длине волны 1400 нм (частоте $\nu \approx 7140 \text{ см}^{-1}$) обусловлено О–Н-группами силанол-центров $\equiv\text{Si}-\text{OH}$, присутствующих в волоконных световодах за счет попадания молекул воды. Силанол-центры образуются при взаимодействии молекулы с решеткой стекла [3]:



Полоса поглощения 1400 нм ($\nu \approx 7140 \text{ см}^{-1}$) является обертоном валентных колебаний О–Н-групп. В кварцевом стекле основная полоса поглощения соответствует длине волны 2730 нм ($\nu \approx 3660 \text{ см}^{-1}$). Она является сложной, поскольку представляет собой ряд линий гауссовой формы для различных состояний ОН-групп в стекле. Область частот в районе 3500 см^{-1} характерна исключительно для валентных колебаний связей R–H (R – некоторый радикал) в силу малой массы атома водорода. Данная область частот очень удобна для исследования содержания водородосодержащих молекул, а следовательно, для контроля крупки кварцевого стекла, где ОН-группы предположительно являются единственными водородосодержащими группами. Традиционно измерение поглощения ОН-групп и расчет концентрации осуществляются на длине волны в районе 2730 нм [4]. Как уже отмечалось выше, измерение на первом обертоне 1400 нм является весьма привлекательным, поскольку он расположен близко к окнам прозрачности волоконных кварцевых световодов: 1310, 1550 нм.

При разработке методики измерений возникли две существенные проблемы. Первая – подго-

товка образца. Исходное сырье представляло собой мелкозернистую крупку. При прохождении света через кювету с крупкой возникало очень сильное рассеяние, вследствие которого измерения становились практически невозможными при разумных мощностях широкополосного источника света. Эта проблема была решена следующим образом. В кювету с крупкой заливали прозрачную синтетическую иммерсионную жидкость (подойдет любая иммерсионная жидкость с показателем преломления, близким к показателю преломления кварцевого стекла). В результате образец становился однородным, рассеяние существенно уменьшалось. Отметим, что в спектре чистой иммерсионной жидкости в области 1.4 мкм полос поглощения обнаружено не было.

Вторая проблема – низкая интенсивность обертона, которая может быть на один-два порядка меньше интенсивности основной полосы. Как показали эксперименты, при концентрациях порядка 100 ppm и более точность измерений удовлетворительная (с учетом того, что на стадии сырья очень высокая точность не нужна, а требуется лишь качественная оценка концентрации гидроксильных групп). Но при меньших концентрациях, 1–10 ppm, точность измерений падает, поскольку линии поглощения гидроксильных групп имеют очень малую интенсивность, т.е. практически незаметны. Однако и в этом случае эксперименты имеют смысл. Они указывают на низкое содержание гидроксильных групп в крупке.

Для оценки эффективности предлагаемого метода измерения концентрации ОН-групп был проведен ряд экспериментов с широкополосным источником излучения. В качестве последнего использовалась галогенная лампа накаливания мощностью 50 Вт (750 лм), расположенная на расстоянии 35 мм от изучаемого образца, помещенного в кварцевую кювету с длиной оптического пути 3 мм.

Оптическое излучение, пройдя через кювету с образцом, фокусировалось при помощи сферической линзы в волоконный световод, подсоединенный к спектрометру OceanOptics NirQuest 512 (рис. 1).

Сравнивая измеренный спектр излучения источника (без кюветы) со спектром после прохождения через образец, можно получить суммарную спектральную картину оптических потерь, складывающуюся из общего падения мощности за счет рассеивания излучения (вследствие оптической неоднородности образца) и поглощения отдельных участков спектра химическими соединениями в образце, в частности гидроксильными группами.

Для оценки контрастности измерений стенда тем же методом была исследована кювета с водой. Результаты измерений представлены на рис. 2.

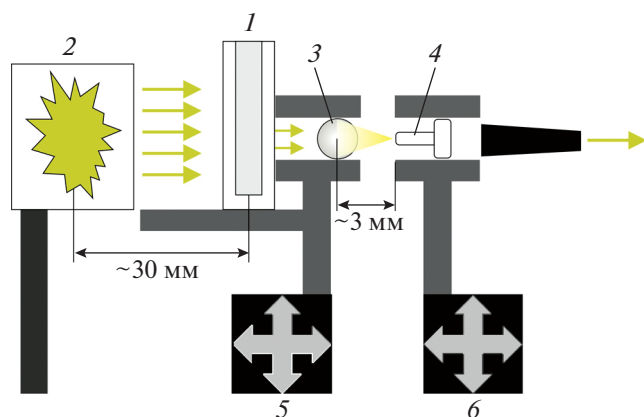


Рис. 1. Схема стенда для измерения концентрации ОН-групп в кварцевой крупке. 1 – кювета с образцом кварцевой крупки, помещенной в иммерсионную жидкость (длина оптического пути 3 мм, толщина стенок 2.5 мм); 2 – широкополосный источник света (галогенная лампа 50 Вт с охлаждением); 3 – сферическая линза для фокусировки излучения, $D = 3$ мм; 4 – разъем SMA 905 оптического кабеля спектрометра NIRQuest512; 5 – позиционер основного стола (кюветы и линзы) относительно источника излучения; 6 – позиционер фокусировки оптического кабеля прибора.

Как уже отмечалось выше, для обеспечения оптической однородности образца измеряемое вещество (кварцевая крупка) погружалось в иммерсионную жидкость, имеющую максимально близкий к образцу показатель преломления. В рамках эксперимента в кварцевую кювету помещали крупку в сухом виде, затем заливали ее иммерсионной жидкостью и перемешивали.

В качестве образцов для пробных измерений использовались:

- образец № 1 – крупка необожженная, содержание ОН-групп по паспорту ~ 30000 ppm;
- образец № 2 – крупка обожженная, содержание ОН-групп ~ 40 ppm;
- образец № 3 – крупка с содержанием ОН-групп по паспорту 38 ± 5 ppm.

На рис. 3 представлен спектр образца № 1, а на рис. 4 для сравнения – спектры всех образцов.

При концентрации О–Н-групп 30000 ppm обертона воды для образца № 1 проявляется на спектре очень отчетливо. При концентрациях порядка 40 ppm обертон различим, однако количественные измерения при таких концентрациях можно сделать только с менее высокой точностью.

Оценим коэффициент поглощения молекул воды по спектральной полосе образца № 1. Концентрация 30000 ppm соответствует 0.03 доли О–Н-групп в крупке, т.е. $n_{\text{ОН}} = 0.03 n_{\text{кв}} = 0.03 \cdot 2.2 \cdot 10^{22} = 6.6 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, где $2.2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ – стандартная концентрация частиц кварцевого стекла. Длина оптического пути в образце $z \approx 3$ мм. Исходя из полученного спектра на рис. 4, начальная интенсивность излучения (соответствующая области 1300 нм) составила $I_0 \approx 56000$ у.е., интенсивность на выходе при 1400 нм – $I \approx 22000$ у.е. Тогда из закона Бугера–Ламберта–Бера коэффициент поглощения σ_2 молекул воды составит:

$$\sigma_2 = \frac{1}{n_{\text{в}} z} \ln \frac{I_0}{I} = 4.7 \cdot 10^{-21} \text{ см}^{-1}.$$

Полученное значение σ_2 находится в диапазоне $10^{-21} - 10^{-20} \text{ см}^2$, что выше, чем для чистой воды [5], но близко к коэффициенту для пара [6]. Данный коэффициент можно использовать как калибровочный для дальнейших измерений. Расчет поглощения с использованием этого коэффициента

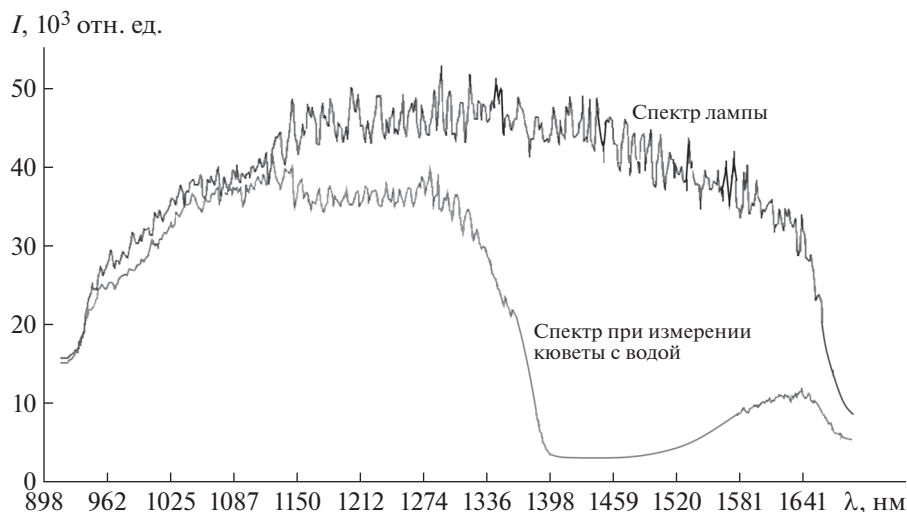


Рис. 2. Спектр, измеренный для кюветы с водой, и спектр лампы (без установленного образца).

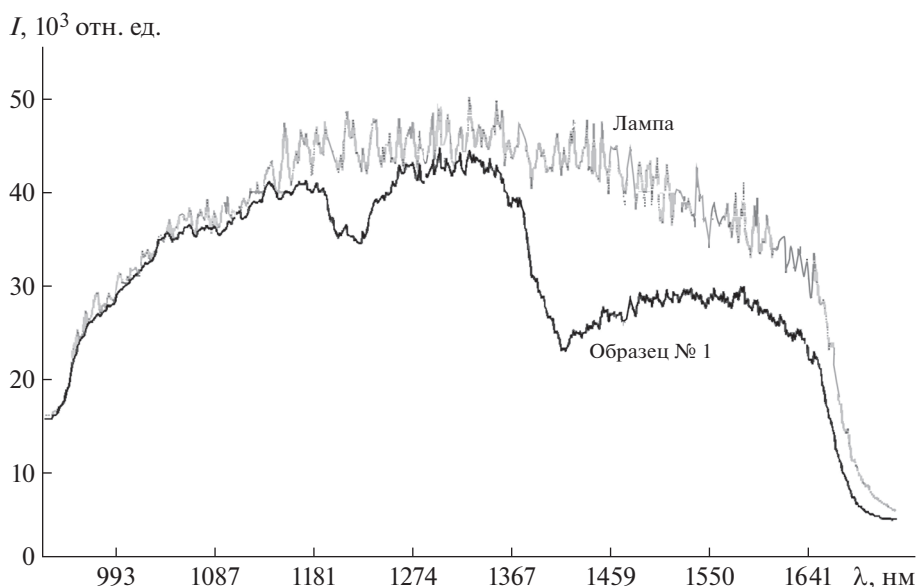


Рис. 3. Спектральные измерения образца № 1 без отжига и лампы. Падение интенсивности в области 1400 см^{-1} связано с поглощением ОН-групп.

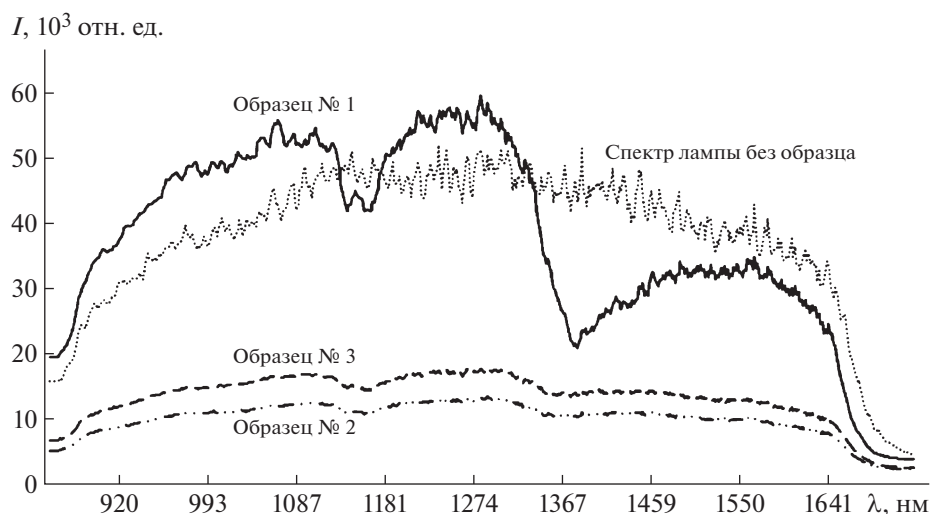


Рис. 4. Спектры различных образцов в сравнении со спектром лампы.

ента показывает, что можно проводить удовлетворительные оценочные измерения при концентрации ОН-групп до 100 ppm. При низких концентрациях, порядка 1–10 ppm, полоса поглощения 1400 нм будет практически незаметна.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИСАДКИ ЭРБИЯ В ПРЕФОРМЕ АКТИВНОГО ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА

Концентрации активных ионов в волокне и заготовке (преформе), из которой получают волок-

но, напрямую связаны. Поэтому важно измерить концентрацию активных ионов в заготовке еще до вытяжки волокна. Данные измерения позволят анализировать и контролировать процесс изготовления преформ активных волоконных световодов, прогнозировать концентрацию легирующего активного компонента и его однородность вдоль длины световода, полученного при вытяжке из исследованных преформ. В дальнейшем речь пойдет об ионах эрбия.

Метод измерения концентрации ионов эрбия основан на измерении интенсивности люминесценции активных ионов заготовки [7–10]. излу-

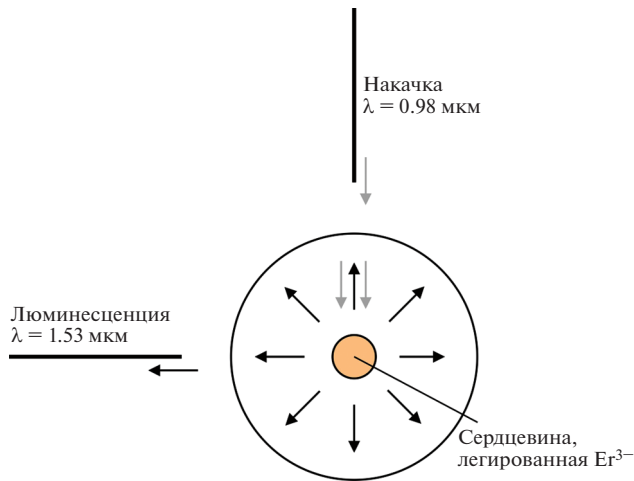


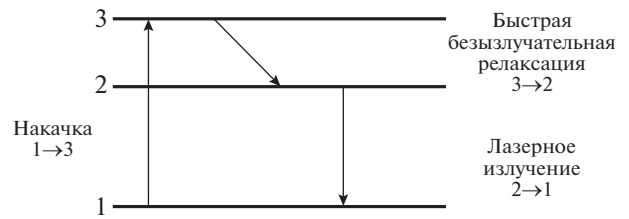
Рис. 5. Схема измерения концентрации ионов эрбия.

чение, возбуждающее люминесценцию, имеет длину волны 980 нм, ширина пучка излучения накачки перекрывает всю сердцевину заготовки. Люминесценция наблюдается в спектральной области 1.50–1.55 мкм. Регистрация интенсивности люминесценции осуществляется с боковой поверхности преформы (рис. 5).

Пусть сердцевина активной заготовки из алюмосиликатного стекла с ионами эрбия облучается сбоку светом с длиной волны 980 нм и интенсивностью I . Если определять концентрацию эрбия в стекле по уровню люминесценции на длине волны 1540 нм, то необходимо найти связь между суммарной концентрацией n_0 ионов эрбия и концентрацией ионов n_2 в метастабильном состоянии, поскольку интенсивность люминесценции пропорциональна последней. Определим установившуюся концентрацию ионов эрбия в метастабильном состоянии.

Рассмотрим трехуровневую схему ионов эрбия (рис. 6). Накачка с длиной волны 980 нм переводит атомы эрбия на третий уровень. Далее происходит быстрая безызлучательная релаксация ионов эрбия на второй уровень, который является метастабильным. Время жизни второго уровня относительно перехода на первый уровень составляет $\tau_{21} = 0.012$ с [11]. Процесс $2 \rightarrow 1$ является лимитирующей стадией релаксации ионов эрбия в основное состояние 1, поскольку время τ_{21} значительно больше времени τ_{32} безызлучательной релаксации. Концентрацией ионов в состоянии 3 можно пренебречь.

Пренебрежем зависимостью интенсивности излучения и других параметров от координаты вдоль распространения излучения, поскольку диаметр сердцевины составляет малую величину, порядка 1.5 мм. В итоге скорость изменения концентрации ионов эрбия в метастабильном состо-

Рис. 6. Схема уровней иона Er^{3+} .

янии будет равна сумме скоростей двух процессов: возбуждения $1 \rightarrow 3$ и распада $2 \rightarrow 1$. Скорость процесса $1 \rightarrow 3$ пропорциональна как концентрации ионов n_1 в основном состоянии, так и интенсивности излучения I на длине волны 980 нм (интенсивности в сердцевине заготовки). Скорость спонтанного перехода $2 \rightarrow 1$ пропорциональна только концентрации ионов эрбия n_2 на метастабильном уровне.

В итоге получим:

$$\frac{dn_2}{dt} = k_1 I_{\text{серд}} n_1 - k_2 n_2, \quad (1)$$

а в установившемся режиме $dn_2/dt = 0$.

Тогда из (1) с учетом того, что сумма концентраций на первом и втором уровнях равна общей концентрации ионов эрбия, т.е. $n_1 + n_2 = n_0$, получим:

$$n_2 = \frac{\alpha n_0}{\alpha + 1}, \quad (2)$$

где коэффициент

$$\alpha = k_1 I_{\text{серд}} / k_2. \quad (3)$$

Из формулы (2) следует, что концентрация ионов эрбия в возбужденном состоянии прямо пропорциональна суммарной концентрации ионов эрбия. Степень насыщения метастабильного уровня 2 (величина коэффициента α) не зависит от концентрации ионов эрбия в том или ином сечении, а определяется только интенсивностью излучения. Таким образом, сравнивая интенсивности люминесценции в разных сечениях заготовки, пропорциональные n_2 , мы сравниваем суммарные концентрации ионов эрбия. В этом заключается суть метода измерения относительной концентрации ионов эрбия (имея калибровочную заготовку, можно измерить и абсолютную концентрацию). Учитывая, что диаметр заготовки на несколько порядков превышает диаметр волоконного световода, можно утверждать, что при мощностях накачки порядка 1 Вт коэффициент $\alpha \ll 1$, т.е. метастабильный уровень далек от насыщения.

При $\alpha \ll 1$ из (2) получаем:

$$n_2 = \alpha n_0. \quad (4)$$

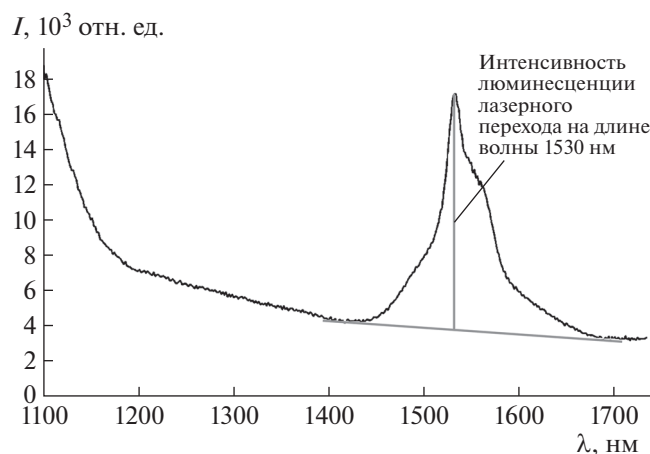


Рис. 7. Спектр люминесценции заготовки.

Таким образом, коэффициент α — это доля ионов эрбия в возбужденном метастабильном состоянии.

В первых экспериментах в качестве приемника излучения использовался спектрометр Ocean Optics NIRQuest512, излучение накачки создавалось полупроводниковым лазером с длиной волны 976 нм, попадающей в линию поглощения ионов эрбия. На рис. 7 представлен полученный спектр люминесценции некоторого участка заготовки (образца № 1), сердцевина которой легирована эрбием, а на рис. 8 — измеренное распределение интенсивности люминесценции вдоль длины образца № 1.

Распределения, представленные на рис. 8, по сути, соответствуют относительному распределению концентрации ионов эрбия вдоль заготовки. Для разных длин волн эти распределения подобны, т.е. отличаются только интенсивностью (в соответствии со спектром люминесценции). Величины относительных концентраций ионов эрбия, измеренные на разных длинах волн, совпадают с точностью до десятых долей процента.

Далее, учитывая полученные выше результаты, мы заменили спектроанализатор на фотоприемник с областью спектральной чувствительности 1.0–1.6 мкм (измеряющий интегральное значение мощности люминесценции). Множество замеров (10–50) люминесценции выполнено в окрестности длины волны 1.55 мкм. Автоматизация процесса позволила настраивать элементы системы точно на сердцевину. Измерение каждого сечения посредством шагового двигателя дало возможность для каждой точки вдоль длины заготовки получить мощность люминесценции.

При мощности диода порядка 3 Вт и диаметре заготовки порядка 1 см, как показали расчеты, отсутствует режим генерации, а время установления стационарного режима спонтанного излуче-

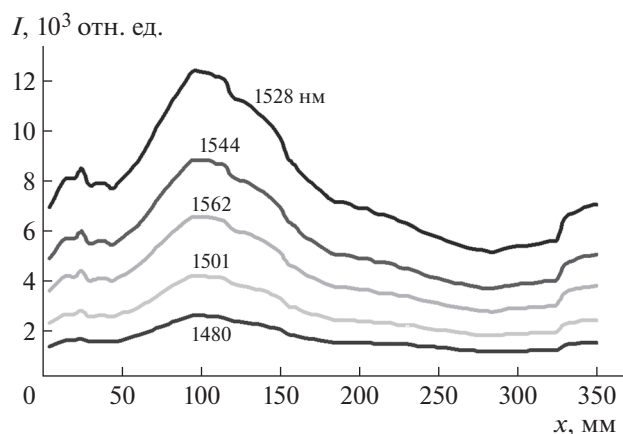


Рис. 8. Распределение интенсивности люминесценции вдоль заготовки на разных длинах волн (цифры у кривых).

ния составляет 0.01 с. Можно говорить о том, что стационарное значение мощности люминесценции устанавливается за короткий промежуток времени (значительно меньше времени замера ~0.5 с).

Однако в процессе эксплуатации выявилась проблема изменения модового состава (мощности, длины волны и поляризации) полупроводникового диода на выходе в течение одного замера. Вариации по длине волны достигали 600 пм, что в значительной степени меняло картину, так как сечение поглощения изменялось в соответствии с линией поглощения накачки. Даже в условиях термостабилизации диода флуктуации мощности оказались неприемлемыми.

Окончательным решением проблемы контроля мощности диода послужил рэлеевский ответвитель (рис. 9), в котором поляризация не влияет на рассеяние. В качестве рассеивателя использовался стеклянный цилиндр с двумя полированными концами (модифицированная некондиционная заготовка без активной присадки). В результате удалось получить стабильный коэффициент ответвления, равный 1%, что позволило компенсировать мощность люминесценции расчетами.

На рис. 10 представлено распределение интенсивности (кривая I) люминесценции вдоль образца № 2, в котором в середине заготовки в сечениях с координатами 250–300 мм была намеренно создана повышенная концентрация эрбия. Интересно отметить, что интенсивность люминесценции (концентрация эрбия) определенно коррелирует с показателем преломления сердцевины, распределение которого представлено здесь же (кривая 2).

В дальнейшем образец был разделен на дисковые фрагменты. Методом сканирующей электронной микроскопии исследовано содержание эрбия в сечении каждого полученного фрагмента

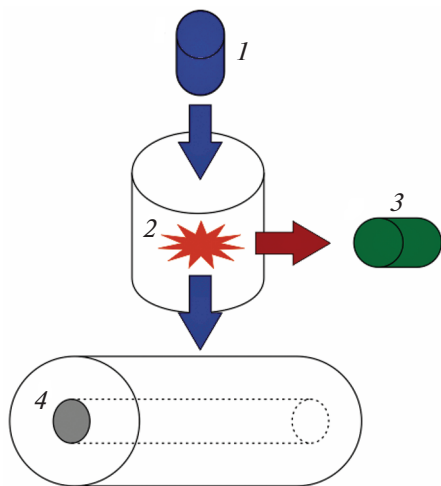


Рис. 9. Схема рэлеевского ответвителя. 1 — полупроводниковый лазер накачки; 2 — стеклянный цилиндр с полированными торцами, внутри которого происходит рэлеевское рассеяние; 3 — фотоприемник; 4 — измеряемая заготовка.

(на рис. 10 отмечены вертикальными пунктирными линиями). Были рассчитаны отношения концентраций эрбия в указанных сечениях. Они с точностью, лучшей 5%, совпали с данными, полученными при измерении интенсивности люминесценции.

РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

Было поставлено две задачи — собрать полностью волоконный рефлектометр для исследования активных оптических волокон, а для тестирования установки измерить длину активного волокна. Попутно отметим, что измерение длины активного волокна — сама по себе актуальная задача, поскольку этот параметр не измеряется напрямую в промышленной лаборатории. Измерить длину активного волокна и качественно оценить его однородность при помощи стандартных серийных рефлектометров невозможно из-за огромных потерь сигнала на длинах волн, на которых работают рефлектометры.

Для рефлектометрических исследований активных волокон проблематично использовать и технику OFDR (оптическую рефлектометрию частотной области). Большие потери в десятки децибел могут дать неравномерный отклик на разных длинах волн, что усложнит интерпретацию данных. Кроме того, в данном случае протяженность исследуемых световодов будет определяться и длиной когерентности источника излучения, что усложнит и сделает более затратным сам метод.

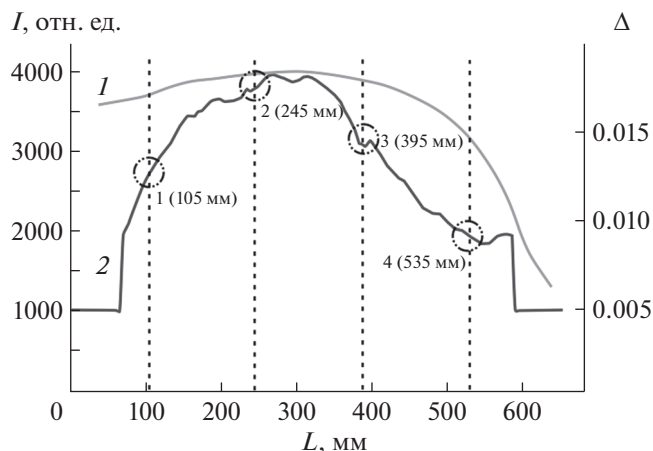


Рис. 10. Распределения интенсивности люминесценции образца № 2 (1) и показателя преломления сердцевины (2).

Ранее авторами был создан рефлектометр временной области, в котором в качестве источника излучения использован импульсный иттербиевый лазер с пассивным затвором [12, 13] с длиной волны излучения 1081 нм и шириной спектра ~2 нм. На данной длине волны эрбиевые волокна имеют значительно меньшие потери мощности, которые, тем не менее, главным образом определяются концентрацией активных ионов эрбия.

Особо отметим, что рефлектометр целиком волоконный (за исключением регистрирующих устройств), что позволяет исключить использование большого числа внешних электронных устройств (драйверов, генераторов, согласующих схем.)

Типичная рефлектограмма эрбиевого волоконного световода представлена на рис. 11. Параметры образца и режимы зондирования подробно описаны в [14].

Длина активного волоконного световода по результатам измерений совпала с фактической. Общие потери мощности на длине 600 м составили примерно 7 дБ, что соответствует коэффициенту потерь примерно 12 дБ/км. Учитывая возможные достижимые динамические диапазоны современных рефлектометров, этот показатель является вполне удовлетворительным для исследований достаточно длинных отрезков активных волокон на длине волны иттербиевого источника 1081 нм.

Особо отметим нелинейный характер рефлектограммы. По нашему мнению, подобные рефлектограммы — признак активных оптических волокон и результат проявления нелинейных оптических эффектов. Касательная к начальному участку рефлектограммы дает коэффициент по-

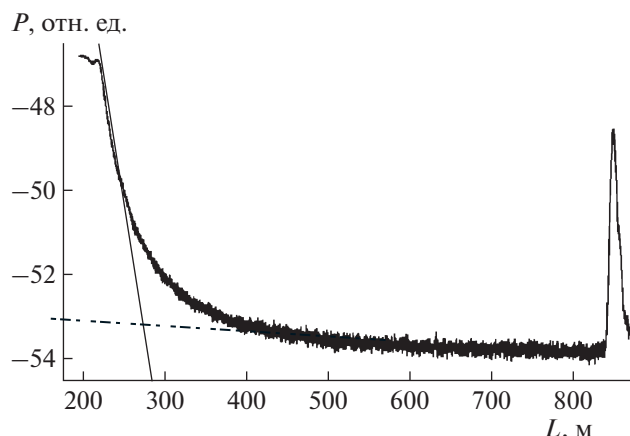


Рис. 11. Рефлектограмма активного эрбиевого волоконного световода.

терь 150 дБ/км (сплошная прямая). Затем коэффициент потерь падает, и наклон рефлектограммы на конечном участке волокна соответствует потерям, не превышающим 2 дБ/км (штрихпунктирная линия). Такое явление может быть вызвано проведением эксперимента на границе динамического диапазона макета. Дальнейшие исследования требуют набора статистики для детального изучения характера рефлектограмм, а также для возможности наблюдения и пространственной локализации неоднородностей.

Кроме того, по нашему мнению, рефлектометрические исследования активных волокон в перспективе могут быть использованы даже для оценки концентрации активных ионов в волокне, поскольку большие потери мощности за счет поглощения и рассеяния в широком диапазоне длин волн, 1–1.5 мкм, линейно (или, возможно, фактически прямо пропорционально) зависят от концентрации активных ионов.

ВЫВОДЫ

Разработан комплекс методов контроля состава активных волоконных световодов и их сырья на различных этапах производства.

Выявлена принципиальная возможность измерения концентрации О–Н-групп по обертоном 1400 нм при концентрациях порядка 100 ppm и выше.

Разработан метод и создана установка для измерения относительной концентрации ионов эрбия. Проведены эксперименты на опытных образцах, получены удовлетворительные результаты. Данные на различных длинах волн очень хорошо коррелируют друг с другом, что позволяет принципиально упростить установку, заменив спектрометр фотоприемником, измеряющим интегральную интенсивность люминесценции.

Результаты измерений позволяют анализировать и контролировать процесс изготовления преформ активных волоконных световодов, прогнозировать концентрацию легирующего активного компонента и его однородность вдоль длины световода.

Сконструирован экспериментальный стенд на основе иттербиевого импульсного лазера с длиной волны 1081 нм с пассивным затвором на гольмиевом волокне. Стенд обеспечивает рефлектометрическое исследование во временной области образцов активных волоконных световодов после их вытяжки и на этапах складского хранения. Таким образом, создан полностью волоконный рефлектометр временной области. Разработана методика определения длин отрезков активного волокна.

Все установки собраны в лаборатории ПФИЦ УРО РАН и в перспективе могут широко применяться в лабораториях промышленных предприятий, серийно выпускающих активные оптические волокна.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания № АААА-А19-119042590085-2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhuravlev L. T. // *Langmuir*. 1987. V. 3. P. 316. <https://doi.org/10.1021/la00075a004>
2. Анфилов В. Н., Быков В. Н., Игуменцева М. А., Белковский А. И., Насыров Р. Ш., Кабанова Л. Я., Ардышев П. А., Штенберг М. В. // В кн. *Проблемы Минерального сырья России*. М.: издание ГЦ РАН, 2012, С. 173. <https://onznnews.wdcb.ru/ebooks/mineragency/front-matter.pdf>
3. Plotnichenko V. G., Sokolov V. O., Dianov E. M. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2000. V. 261. P. 186. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(99\)00654-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(99)00654-7)
4. Bert S. // *Vibrational Spectroscopy*. 2008. V. 48. P. 158. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2008.01.004>
5. Elliott C. R., News G. R. // *Appl. Spectrosc.* 1971. V. 25. P. 378.
6. Кузьмичев А. С., Надеждинский А. И., Понуровский Я. Я. // *Квантовая электроника*. 2011. Т. 41. № 7. С. 650. <https://doi.org/10.1070/QE2011v041n07ABEH014449>
7. Смирнов А. С., Латкин К. П., Бурдин В. В. // *Прикладная фотоника*. 2014. № 2. С. 62. <http://applied.photonics.pstu.ru/archives/10.15593/2411-4367/2014.2.04>
8. Латкин К. П., Смирнов А. С., Константинов Ю. А., Бурдин В. В. // *Вестник Пермского научного центра*. 2015. № 3. С. 4. <https://doi.org/10.7242/1998-2097/2018.4.3>
9. Бурдин В. В., Клод Д., Константинов Ю. А., Смирнов А. С., Первачук В. П. // *Прикладная фотоника*. 2018. Т. 5.

- № 4. С. 420.
<http://applied Photonics.pstu.ru/archives/10.15593/2411-4367/2018.4.09>
10. Константинов Ю.А., Латкин К.П., Барков Ф.Л., Смирнов А.С., Поскребышев М.М., Первадчук В.П., Владимирова Д.Б., Конин Ю.А., Гаранин А.И., Бурдин В.В. // Научная визуализация [Электронный журнал]. 2017. Т. 9. № 4. С. 47.
<https://doi.org/10.26583/sv.9.4.05>
11. Курков А.С., Дианов Е.М. // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 2. С. 881.
<https://doi.org/10.1070/QE2004v034n10ABEH002739>
12. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I. // Laser Phys. Letters. 2009. V. 6. P. 135.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1002/lapl.200810109>
13. Курков А.С., Шолохов Е.М. // 3-й Российский семинар по волоконным лазерам: Сборник трудов. 31 марта—2 апреля 2009. Уфа: УГАТУ, 2009. С. 54.
14. Белокрылов М.Е., Константинов Ю.А., Латкин К.П., Клод Д., Селезнев Д.А., Степин А.А., Конин Ю.А., Щербакова В.А., Кашина Р.Р. // ПТЭ. 2020. № 4. С. 45.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220050018>