

## **Исследование люминесцентных свойств активных сред на основе волоконных световодов в диапазоне температур 300...1300 К**

© Д.А. Дворецкий, С.Г. Сазонкин, Л.К. Денисов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Разработан измерительный стенд для исследования температурной зависимости спектров люминесценции активных волоконных световодов. Приведены структурная схема и технические пути, обеспечивающие достижение необходимых метрологических характеристик подобных систем при исследовании температурных зависимостей спектров люминесценции.*

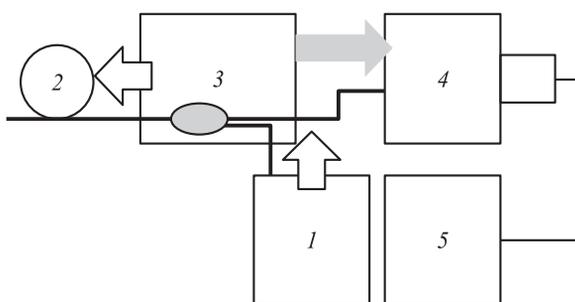
**Ключевые слова:** активные волоконные световоды, люминесценция, спектр люминесценции.

**Введение.** В последнее время при разработке новых волоконных источников излучения, генерирующих в ближней инфракрасной (ИК) области спектра, оценивается влияние технологических особенностей изготовления активных материалов на их оптические свойства [1–4], в частности путем проведения исследования температурных зависимостей оптических свойств активных волоконных световодов [1, 2, 4]. Такая задача потребовала разработки новых средств измерения, способных регистрировать оптические свойства активных волоконных световодов на основе плавленого кварца в максимально высоком температурном диапазоне — вплоть до температуры плавления кварцевого стекла [3]. В данной работе проведена разработка измерительного стенда для регистрации спектров люминесценции в широком диапазоне температур от 300 до 1 300 К.

**Методы исследования температурной зависимости спектров люминесценции волоконных световодов.** Температурная зависимость спектров люминесценции в световодах может быть измерена несколькими способами. В работе [1] спектры измеряли с помощью монохроматоров МДР-6У или МДР-12, синхронное детектирование осуществлялось в диапазоне длин волн 700...1 600 нм, в качестве детектора излучения использовался германиевый фотоприемник. При подобном методе регистрации температурной зависимости спектров люминесценции неизбежно возникает перепоглощение излучения источника по длине световода — реабсорбция, также значительная часть излучения источника может попадать на приемник излучения,

ограничивая возможности регистрации. Описанная методика позволяет измерять температурную зависимость спектров люминесценции в широком спектральном диапазоне, но значительное время регистрации спектров, обусловленная использованием нескольких монохроматоров, не обеспечивает удовлетворительную дискретность шага по температуре. В то же время применение матричного приемника излучения и полихроматора позволит регистрировать сигнал (потенциальная частота регистрации спектров до 10 кГц) с высокой дискретностью по температуре, не ограничивая при этом спектральный диапазон.

Использование высокочувствительных матричных приемников излучения в предложенной в работе [1] схеме регистрации невозможно вследствие наличия характерной засветки приемника излучением, идущим по сердцевине волокна от источника. Поэтому необходимо разработать схему регистрации люминесценции сбоку или с торца волокна для исключения этого явления, что также позволит устранить реабсорбцию. Регистрация люминесценции сбоку волокна вследствие специфики измерений температурных зависимостей невозможна, поскольку нет доступа приемника излучения к исследуемому волокну при его нагреве до высоких температур. В работе [5] показана принципиальная возможность регистрации спектров люминесценции с торца волоконных световодов с использованием оптического разветвителя. Структурная схема (рис. 1) состоит из источника излучения — лазерного диода на длине волны 808 нм с волоконным выводом излучения 1, исследуемого волоконного световода 2, волоконного оптического разветвителя 3, анализатора оптического спектра (АОС) с матричным приемником излучения 4 и управляющего компьютера (ЭВМ) 5.



**Рис. 1.** Структурная схема с использованием оптического разветвителя

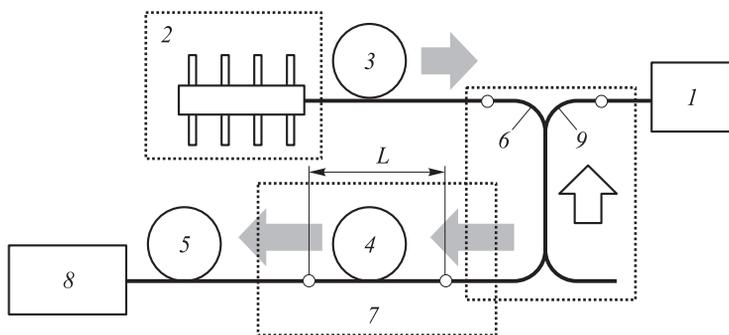
В такой схеме излучение люминесценции от источника сигнала в обратную сторону от накачки распространяется до матричного приемника излучения через полихроматор в составе оптического анализатора спектра. Схема имеет ряд недостатков, а именно, значительные потери в мощности сигнала в оптическом разветвителе при обратном

распространении сигнала по оболочке, а в случае распространения излучения по сердцевине волокна возникает сильная зависимость спектра пропускания оптического разветвителя от длины волны. Это обстоятельство исключает возможность регистрации спектров люминесценции в широком спектральном диапазоне 400...1 700 нм.

Для исключения подобных недостатков и повышения отношения сигнал/шум в данной работе предлагается использовать в качестве оптического разветвителя световод с многоэлементной первой оболочкой (МПО) — МПО-световод.

Такой световод представляет собой структуру, состоящую из сигнального волоконного световода, находящегося в оптическом контакте с одним (в данном случае) или более параллельными многомодовыми световодами на основе плавленого кварца. В разработанной схеме использован световод с диаметром сердцевины 100 мкм. При этом все световоды такой структуры окружены общей полимерной оболочкой с показателем преломления ниже показателя преломления плавленого кварца (отражающей).

**Измерительный стенд для исследования температурной зависимости спектров люминесценции волоконных световодов.** Схема измерения температурной зависимости люминесценции активных световодов представлена на рис. 2. Излучение накачки вводится в одномодовый германий-силикатный волоконный световод (световод GSF) с диаметром сердцевины 7 мкм через волоконный изолятор непосредственно с волоконного вывода источника. Световод GSF соединен сваркой с одномодовым световодом МПО-структуры, и излучение, минуя МПО-световод, попадает непосредственно в исследуемый волоконный световод (темные стрелки). Мощность выходного излучения после исследуемого световода контролируется с помощью измерителя мощности. В исследуемом световоде происходит поглощение излучения накачки и возникает люминесценция при определенной темпера-



**Рис. 2.** Структурная схема с использованием МПО-световода:

1 — ОАС; 2 — набор лазерных диодов; 3, 5 — GSF; 4 — исследуемый световод; 6 — световод МПО-структуры; 7 — термостат; 8 — измеритель мощности; 9 — световод SF;  $L$  — длина исследуемого световода

туре, которая задается нагревателем в изотермической зоне, часть излучения этой люминесценции, распространяется по оболочке световода в обратную сторону (см. рис. 2, серая стрелка).

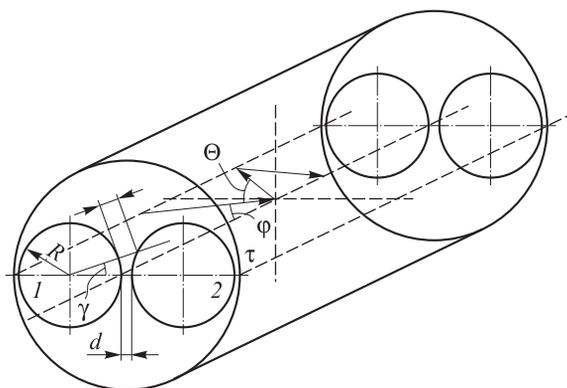
Далее за счет обмена энергией в МПО-структуре часть излучения попадает в световод без сердцевины также соединенный сваркой со световодом из кварцевого стекла, оболочка которого легирована фтором (световод SF с диаметром сердцевины 100 мкм). Световод SF направлен в анализатор оптического спектра (блок регистрации), где происходит регистрация излучения люминесценции. В качестве анализатора оптического спектра использована установка, разработанная авторами [6]. При проектировании измерительного стенда необходимо рассчитать коэффициент  $K_{\text{отн}}$  эффективности передачи излучения между световодами в МПО-структуре.

Для описания эффективности передачи излучения в МПО-световоде используют коэффициент связи или длину связи. Под длиной связи понимают такую длину МПО-структуры, на которой интенсивности в оболочках сигнального (1) и пассивного (2) световодов выравниваются ( $K_{\text{отн}} = 0,5$ ), т. е.

$$K_{\text{отн}} = \frac{P_2(\varphi, z)}{P_1(\varphi, z) + P_2(\varphi, z)} = \frac{P_2(\varphi, z)}{P_{\text{sum}}(\varphi, z)}, \quad (1)$$

где  $P_1(\varphi, z)$ ,  $P_2(\varphi, z)$  — мощности распространяющегося излучения под углом к азимуту  $\varphi$  и на длине  $z$  световодов 1 и 2 соответственно;  $P_{\text{sum}}(\varphi, z)$  — суммарная мощность излучения.

На рис. 3 приведена схема передачи излучения в двухэлементном МПО-световоде для меридиональных лучей.



**Рис. 3.** Схема передачи излучения в двухэлементном МПО-световоде (стрелками обозначен ход меридиональных лучей):

1, 2 — пассивный и сигнальный световоды;  $l$  — длина световода;  $d$  — расстояние между сердцевинами световодов;  $R$  — радиус сердцевины;  $\gamma$ ,  $\tau$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$  — углы, по которым распространяются меридиональные лучи

Для описания передачи излучения между близко лежащими волокнами использован волновой анализ мод связанных волноводов. Передача энергии в МПО-световоде рассматривалась только для меридиональных лучей. Исходя из этого, взаимная передача излучения между световодами 1 и 2 в двухэлементном МПО-световоде может быть описана системой дифференциальных уравнений для мощностей  $P_1(\varphi, z)$  и  $P_2(\varphi, z)$  меридиональных лучей, распространяющихся под углом  $\varphi$  к оси, в каждом из этих световодов:

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(\varphi, z)}{dz} &= k(\varphi)P_2(\varphi, z) - k(\varphi)P_1(\varphi, z); \\ \frac{dP_2(\varphi, z)}{dz} &= k(\varphi)P_1(\varphi, z) - k(\varphi)P_2(\varphi, z), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k(\varphi)$  — коэффициент связи, характеризующий передачу мощности между лучами, идущими под углом  $\varphi$  к оси в световодах 1 и 2,

$$k(\varphi) = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{4\pi R} \int_{\gamma} T(\varphi, \gamma) d\gamma. \quad (3)$$

В формуле (3)  $T(\varphi, \gamma)$  — коэффициент прохождения луча с углом распространения  $\varphi$  в зависимости от угла  $\gamma$ . При определении  $T(\varphi, \gamma)$  используются соотношения для коэффициента прохождения  $T$  волны с  $TE$ -поляризацией (вектор  $E$  перпендикулярен плоскости падения луча) и с  $TM$ -поляризацией, которые имеют вид

$$\begin{aligned} T_{TE} &= \frac{4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)}{(1 - n_1^2)^2 \operatorname{sh}^2 u + 4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)}; \\ T_{TM} &= \frac{4n_1^4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)}{(1 - n_1^2)^2 (\sin^2 \theta - n_1^2 \cos^2 \theta)^2 \operatorname{sh}^2 u + 4n_1^4 \cos^2 \theta (\sin^2 \theta - n_1^2)}, \end{aligned} \quad (4)$$

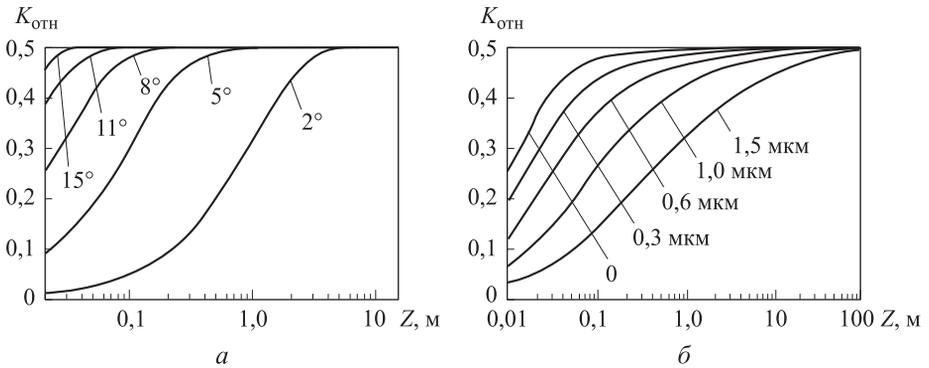
где

$$u = \frac{2\pi h}{n_1 \lambda} \sqrt{\sin^2 \theta - n_1^2}.$$

Здесь  $\theta$  — угол падения ( $\varphi = 90^\circ - \theta$ );  $n_1$  — отношение показателей преломления сред с меньшим и с большим показателями преломления;  $\lambda$  — длина волны;  $h$  — толщина слоя с низким показателем преломления.

Дополнив систему уравнений (2) начальными условиями, можно получить ее решение в виде зависимости мощности излучения, распространяющегося под определенным углом  $\varphi$  к оси в световодах 1 и 2, а также от расстояния  $d$  между световодами и от координаты  $z$

(длины световода). Зависимость коэффициента  $K_{отн}$  от указанных параметров представлена на рис. 4.



**Рис. 4.** Зависимости коэффициента  $K_{отн}$  ( $P_2/P_{sum}$ ) от длины  $z$  МПО-световода:  $a - \varphi = 2^\circ \dots 15^\circ$ ;  $b - d = 0 \dots 1,5$  мкм

Расчетная длина равна 3 м, при этой длине половина излучения, идущая по оболочке сигнального световода, переходит в световод без сердцевины. Такой длины МПО-световод использован в схеме измерения температурной зависимости спектров люминесценции волоконных световодов. Основные метрологические характеристики разработанного измерительного стенда приведены ниже:

Диапазон регистрации температуры, °С.....	30...1 000
Максимальная дискретность регистрации, °С.....	5
Погрешность $\delta T$ регистрации по температуре, °С.....	$\pm 0,5$
Спектральный диапазон регистрации, нм.....	300...1 600
Максимальное разрешение по спектральному диапазону, нм, в диапазоне длин волн:	
300...900 нм.....	Менее 5
900...1600 нм.....	Менее 10

**Заключение.** На основании исследований температурных зависимостей спектров люминесценции разработан измерительный стенд для исследования температурной зависимости спектров люминесценции активных волоконных световодов. Измерительный стенд обладает повышенными точностными характеристиками и скоростью регистрации спектров люминесценции в широком диапазоне регистрации как по длине волны, так и по температуре.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Булатов Л.И. *Абсорбционные и люминесцентные свойства висмутовых центров в алюмо- и фосфоросиликатных волоконных световодах.* Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2009, 158 с.
- [2] Дворецкий Д.А., Буфетов И.А., Вельмискин В.В., Зленко А.С., Хопин В.Ф., Семенов С.Л., Гурьянов А.Н., Денисов Л.К., Дианов Е.М. Оптические

- свойства волоконных световодов на основе плавленного кварца, легированного висмутом, в диапазоне температур 300–1500 К. *Квантовая электроника*, 2012, № 42, с. 762–769.
- [3] Дворецкий Д.А., Денисов Л.К. Оптические потери в волоконных световодах на основе кварцевого стекла в температурном диапазоне 300–1500 К. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. [Электронный ресурс]*, 2013, № 5. URL: (дата обращения 03.07.2013).
- [4] Abramov N., Yashkov M.V., Balabanov S.S., Drobotenko V.V., Gur'yunov A.N., Melkumov M.A., Dvoretzky D.A., Kachenyuk M.N., Torsunov M., Manenkov A.A., Dianov E.M. Fabrication and optical parameters of silica based optical fibers with core doped with chromium and alumina of high concentration. *11th International Conference on the Structure of Non-Crystalline Materials*. NCM11 Book of abstracts. Paris, France, 2010, p. 185.
- [5] Tetsuya Haruna, Motoki Kakui, Toshiaki Taru, Shinji Ishikawa, Masashi Onishi. Silica-based bismuth doped fiber for ultra broad band light-source and optical amplification around 1.1  $\mu\text{m}$ . *Optical amplifiers and their applications topical meeting*. Budapest, August 7–10, 2005.
- [6] Алехнович В.И., Сазонкин С.Г., Дворецкий Д.А., Денисов Л.К. Волоконный спектрофлуориметр для измерения характеристик оптических сред. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2012, № 9, с. 108–113.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Дворецкий Д.А., Сазонкин С.Г., Денисов Л.К. Исследование люминесцентных свойств активных сред на основе волоконных световодов в диапазоне температур 300...1300 К. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/928.html>

**Дворецкий Дмитрий Алексеевич** родился в 1986 г. Младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области волоконно-оптических приборов и лазерной физики. e-mail: [ddvoretzkiy@gmail.com](mailto:ddvoretzkiy@gmail.com)

**Сазонкин Станислав Григорьевич** родился в 1989 г. Инженер НОЦ «Фотоника и ИК-техника» (лаборатория фотонно-кристаллических волокон) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 3 статей в области волоконных усилителей и волоконных датчиков. e-mail: [sazstas@gmail.com](mailto:sazstas@gmail.com)

**Денисов Лев Константинович** родился в 1942 г., окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова в 1970 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 опубликованных работ в области лазерной спектроскопии и лазерной техники. e-mail: [ldenisov@bmstu.ru](mailto:ldenisov@bmstu.ru)