

Распределенный волоконный датчик температуры со спектральной фильтрацией направленными волоконными ответвителями

А.Г.Кузнецов, С.А.Бабин, И.С.Шелемба

Создан полностью волоконный температурный датчик на основе комбинационного рассеяния света импульсного волоконного эрбиевого лазера. Датчик выполнен с использованием стандартного телекоммуникационного одномодового световода SMF-28, а в качестве спектральных фильтров использовалась серия направленных ответвителей. Было измерено распределение температуры вдоль волоконной линии длиной 7 км с погрешностью 2 °С и пространственным разрешением 10 м. При расчете температуры учитывалась разница поглощения в волокне различных спектральных компонент рассеянного света.

Ключевые слова: распределенный датчик температуры, комбинационное рассеяние света, направленный волоконный ответвитель, волоконный импульсный лазер.

1. Введение

В последние годы оптоволоконные сенсорные системы находят широкое научно-техническое применение (см., напр., [1, 2]). Это связано, прежде всего, с тем, что волоконные схемы позволяют измерять температуру, давление, деформации и другие параметры внешних воздействий без подключения датчиков к линиям электропередачи. Последнее особенно важно для отраслей, связанных с горючими и взрывоопасными материалами, например угле-, нефте- и газодобычи и пр. Кроме того, сенсоры на основе оптоволокна достаточно компактны, не требуют систематического обслуживания и очень устойчивы к химическому воздействию. Волоконные датчики температуры также могут применяться в системах пожарной сигнализации различных сооружений.

В данной работе исследуется распределенный температурный датчик, действие которого основано на комбинационном рассеянии (КР) света в волоконном световоде. Преобразование первичного светового потока при КР обычно сопровождается переходом рассеивающих молекул на другие колебательные и вращательные уровни энергии, причем частоты новых линий в спектре рассеяния являются комбинациями частот падающего света и частот колебательно-вращательных переходов рассеивающих молекул. Если молекула вещества перешла из основного состояния в возбужденное, в спектре КР проявляются линии, имеющие значительно большую длину волны по сравнению с источником света (стоксовы компоненты). Возможен также и обратный процесс, когда молекула в результате КР переходит из возбужденного в основное состояние и возникают антистоксовы

линии. Очевидно, что населенность возбужденного уровня напрямую зависит от температуры вещества, поэтому интенсивность антистоксовой компоненты тоже будет зависеть от температуры. Таким образом, регистрируя интенсивность антистоксовой компоненты КР, с помощью такого датчика можно измерять температуру на протяжении всего волокна.

Чувствительность и пространственное разрешение КР-датчика напрямую зависят от характеристик источника лазерного излучения, используемого для зондирования волоконной линии. Поэтому особую роль в сенсорной системе играют параметры импульсного лазера, осуществляющего опрос. Основная сложность, с которой сталкиваются разработчики температурных датчиков на основе КР, – это малая интенсивность рассеянного света. На рис. 1 приведен спектр излучения, измеренный в направлении, обратном направлению распространения импульса в оптоволокне. Центральная линия на длине волны $\lambda = 1529$ нм соответствует рэлеевскому рассеянию лазерного излучения, а две симметрично отстоящие компоненты на ~ 1430 и ~ 1630 нм – это антистоксова и стоксова компоненты соответственно. Поскольку стекло является аморфным веществом, спектральные макси-

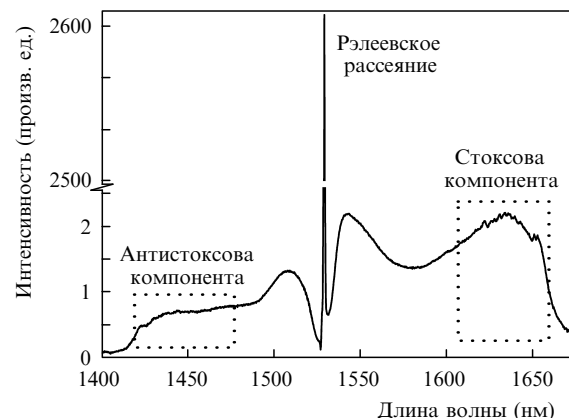


Рис. 1. Спектр КР в волоконном световоде SMF-28.

А.Г.Кузнецов, С.А.Бабин, И.С.Шелемба. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1, Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2;
e-mail: babin@iae.nsk.su, shelemba@iae.nsk.su

Поступила в редакцию 26 июня 2009 г.

мумы, соответствующие колебательным возбуждениям, уширены и перекрываются между собой. Как видно из спектра, интенсивность антистоксовой компоненты рассеянного назад света, содержащей информацию о температуре волокна, на 30 дБ меньше интенсивности рэлеевского рассеяния.

Максимальный уровень мощности зондирующего излучения ограничен такими нелинейными эффектами, как вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) и вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) света. В этих условиях для достижения высокой точности измерения температуры требуется выбрать оптимальный метод фильтрации и разделения полезного сигнала с минимальными потерями информации. Обычно в качестве фильтров используются волоконные брэгговские решетки, выделяющие узкополосные сигналы стоксовой и антистоксовой компонент [3], которые затем направляются по разным каналам регистрации. Однако этот метод предъявляет большие требования к качеству решеток: к спектральной ширине (которая должна быть как можно больше), коэффициенту отражения, потерям и т. д. К сожалению, даже в оптимальных условиях значительная часть полезного сигнала теряется при фильтрации. Для увеличения интенсивности рассеянного полезного сигнала часто используют многомодовое чувствительное волокно [4], что позволяет повысить пороги возникновения ВКР и ВРМБ, а значит, дает возможность существенно увеличить мощность источника излучения. Однако датчики на основе многомодового волокна требуют нестандартных и дорогостоящих компонентов.

Целью настоящей работы было создание полностью волоконного температурного датчика с одномодовым волокном в качестве чувствительного элемента и со спектральным фильтром на основе направленных ответвителей, что позволило увеличить интенсивность полезного сигнала за счёт большой спектральной ширины фильтра, существенно упростить методику фильтрации и в целом удешевить температурный датчик.

2. Модель

При КР происходит неупругое рассеяние светового фотона с поглощением или испусканием кванта колебательного возбуждения. Если в световод входит лазерный импульс с несущей частотой ν_0 , то в спектре обратно рассеянного света будет наблюдаться центральный пик на частоте ν_0 и два дополнительных пика, смещенных на частоту ν : стоксов на частоте $\nu_s = \nu_0 - \nu$ и антистоксов на $\nu_{as} = \nu_0 + \nu$. Известно, что в волокне на основе плавленого кварца компоненты КР отстоят от центральной компоненты приблизительно на 440 см^{-1} . Для исключения нетемпературных эффектов, приводящих к изменениям интенсивности антистоксовой компоненты (таких как изгибные потери или потери на точках сварки), её следует нормировать на интенсивность стоксовой компоненты. В этом случае будем иметь известную формулу для температурной зависимости интенсивностей обеих компонент [5]:

$$\frac{I_{as}(T)}{I_s(T)} = \left(\frac{\nu_{as}}{\nu_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{h\nu}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где k_B – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; T – абсолютная температура.

В (1) не учитывается различие коэффициентов затухания обеих компонент. Это различие существенно при большой длине волны зондирующего излучения, когда стоксова и антистоксова компоненты сильно разнесены друг от друга. В общем случае интенсивность обратно рассеянного излучения будет экспоненциально зависеть от продольной координаты с соответствующими коэффициентами затухания [6]:

$$I'_s(z, T) = I_s(T)f(z) \exp(-\alpha_s z) + A, \quad (2)$$

$$I'_{as}(z, T) = I_{as}(T)f(z) \exp(-\alpha_{as} z) + B,$$

где A, B – константы (темновой шум); α_s и α_{as} – коэффициенты затухания стоксовой и антистоксовой компонент КР; $f(z)$ описывает различные процессы в волокне, не связанные с изменением температуры (потери на изгибах, местах сварки, натяжениях и других деформациях волокна). На самом деле, каждый из коэффициентов α имеет небольшую зависимость от температуры, для учёта которой требуется более сложный подход к корректировке регистрируемого сигнала. Далее предполагается, что коэффициенты затухания α не зависят от температуры и различны для стоксовой и антистоксовой компонент.

3. Эксперимент

Схема лазера приведена на рис.2. Использовалась кольцевая схема резонатора с активным эрбиевым волокном длиной ~ 2 м. Модулятором добротности резонатора служил электрооптический модулятор Маха – Цендера (ЭОМ) JDSU OC-192. Накачка лазера осуществлялась лазерным диодом с длиной волны ~ 980 нм и мощностью ~ 80 мВт, излучение которого заводилось в резонатор с помощью направленного ответвителя (WDM). Ширина спектра лазера контролировалась волоконной брэгговской решеткой, записанной на $\lambda = 1529$ нм с шириной спектра отражения на полувысоте 0.5 нм. Для извлечения 70 % мощности излучения из резонатора ла-

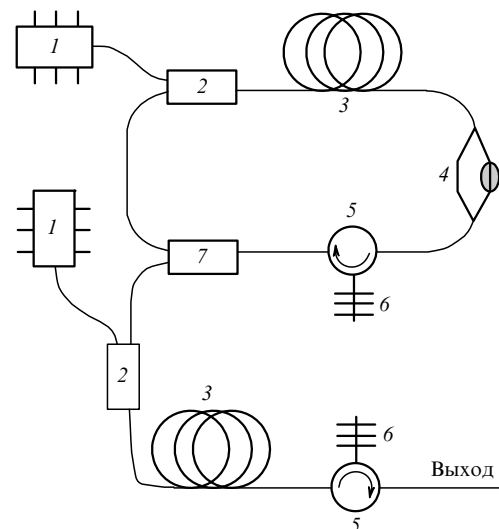


Рис.2. Схема импульсного волоконного лазера: 1 – диодный лазер накачки на длине волны 980 нм; 2 – направленный ответвитель; 3 – активное эрбиевое волокно; 4 – электрооптический модулятор добротности; 5 – циркулятор; 6 – брэгговская решетка; 7 – волоконный ответвитель.

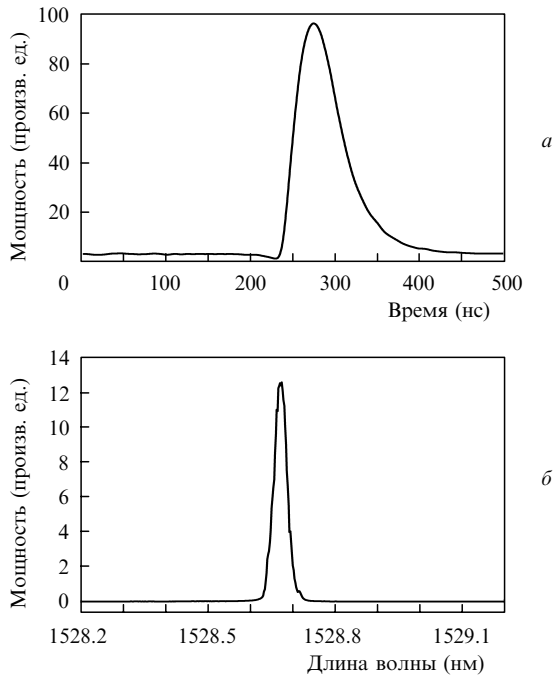


Рис.3. Форма (а) и спектр излучения (б) импульса волоконного лазера.

зера использовался волоконный ответвитель 30 : 70. На рис.3 показан выходной импульс лазера длительностью ~ 60 нс и его спектр. Выходное излучение лазера дополнительно усиливалось волоконным эрбиевым усилителем с коэффициентом усиления 18 дБ, пиковая мощность на выходе усилителя превышала 5 Вт.

На рис.4 приведена схема регистрации КР. Лазерные импульсы с частотой 1.2 кГц заводились в волоконную линию длиной 7 км (Corning SMF-28), состоящую из двух катушек по 3.5 км. Часть волокна длиной 250 м, находящаяся между двумя катушками, нагревалась до $\sim 100^\circ\text{C}$. Сигнал КР в обратном направлении, проходя через спектральный фильтр, разделялся на стоксову и антистоксову компоненты и направлялся на два фотодиода с полосой 10 МГц. Аналоговый сигнал с фотодиодов поступал на АЦП и далее на компьютер, где эти сигналы обрабатывались и вычислялась температура по формуле (1) с учетом предварительно измеренных поправок, входящих в (2).

Спектральный фильтр выполнен на основе соединенных последовательно направленных волоконных ответвителей. Для максимального подавления интенсивной рэлеевской компоненты потребовалось несколько на-

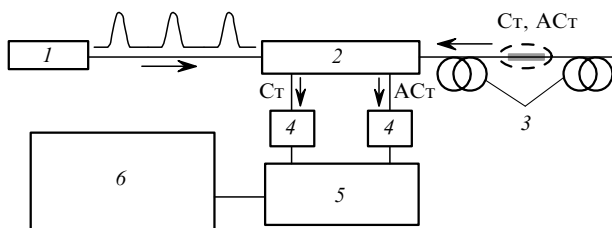


Рис.4. Схема регистрации КР:

1 – импульсный волоконный лазер; 2 – система фильтрации оптического сигнала; 3 – чувствительное волокно длиной 7 км; 4 – фотодиоды, регистрирующие соответствующие компоненты рассеяния; 5 – АЦП; 6 – устройство обработки сигнала и расчета температуры (компьютер); Ст, АСт – стоксова и антистоксова компоненты.

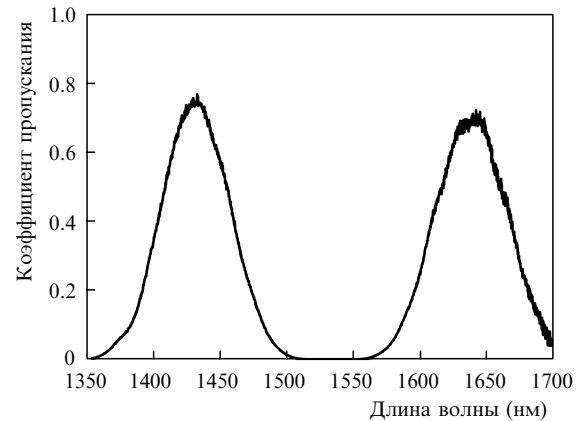


Рис.5. Спектр пропускания фильтра.

правленных спектрально селективных ответвителей, они отсекали центральную область спектра на $\lambda = 1529$ нм и пропускали антистоксову и стоксову линии КР на 1430 и 1630 нм соответственно в полосе шириной 30–50 нм в зависимости от количества направленных ответвителей (рис.5). Для дополнительного подавления центральной рэлеевской линии использовались волоконные брэгговские решетки с шириной спектра отражения ~ 0.5 нм, что позволяло без существенного уменьшения пропускаемой интегральной интенсивности КР минимизировать шум, вносимые рэлеевским рассеянием. После фильтрации сигналов компонент КР они разделялись направленными ответвителями с соответствующими длинами волн и регистрировались рpн-фотодиодами.

Таким образом, использование направленных ответвителей в качестве фильтра КР позволило подавить центральную область, содержащую интенсивную линию рэлеевского рассеяния, и обеспечить пропускание КР в широком спектральном диапазоне, что сделало возможным регистрацию КР без использования высокочувствительных лавинных фотодиодов.

4. Результаты и обсуждение

На рис.6,а,б показаны временные зависимости интенсивностей стоксовой и антистоксовой компонент, являющиеся результатом 100-кратного усреднения для минимизации шумов. На графике отчетливо видно увеличение интенсивности антистоксовой компоненты в месте нагрева волокна.

Из этих данных при использовании формулы (1) с учетом калибровки (2) было рассчитано распределение температуры волокна вдоль продольной координаты (рис.6,в). Разрешение по температуре составляет 2°C (среднеквадратичное отклонение), а пространственное разрешение определяется длительностью импульса и быстрым действием регистрирующих фотодиодов (10 МГц) и составляет ~ 10 м. Для определения зависимости отклика волоконного датчика от реальной температуры температура тестового волокна изменялась от 7°C до 100°C . Контроль температуры осуществлялся термопарой. На рис.7 показана зависимость измеренной волоконным датчиком температуры от реальной температуры (термопара) при 500-кратном усреднении. Как и следовало ожидать, отклик датчика на изменение температуры является линейной функцией, а отклонения соответствующей оцениваемой погрешности измерений.

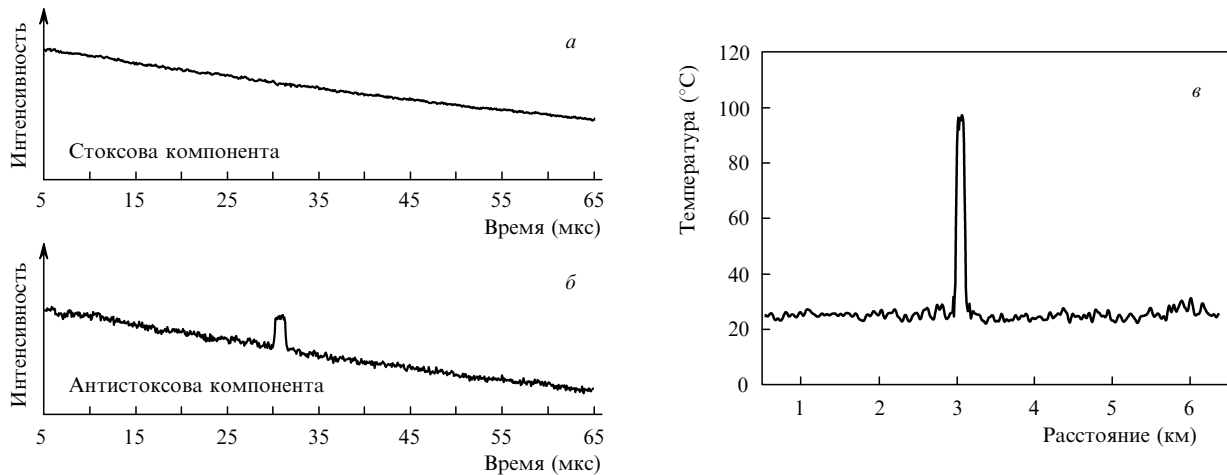


Рис.6. Временные зависимости интенсивностей рассеяния стоксовой (а) и антистоксовой (б) компонент и рассчитанное распределение температуры вдоль волокна (в).

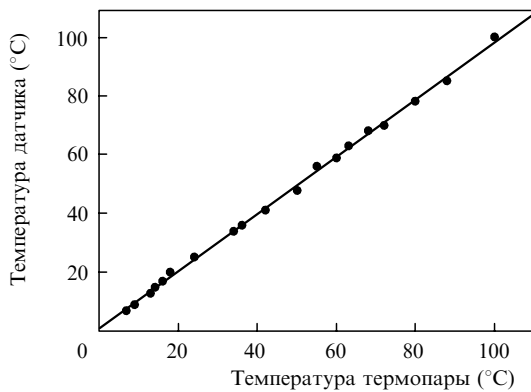


Рис.7. Зависимость показания волоконного датчика от показаний реперной термопары.

5. Заключение

В работе продемонстрировано измерение температуры с помощью волоконного сенсора на основе КР в одномодовом волокне. Отличительной особенностью такого датчика является полностью волоконная схема, включающая зондирующий эрбиевый лазер с модуляцией добротности, усилитель и спектральный фильтр на основе волоконных направленных ответвителей (WDM). Благодаря широкому спектральному интервалу пропускания компонент КР удалось, используя стандартные рп-фотодиоды, зарегистрировать пространственное распределение интенсивности антистоксовой компоненты КР вдоль волокна длиной 7 км.

Достигнутое пространственное разрешение такого сенсора составило 10 м и ограничивается быстродей-

ствием регистрирующих фотодиодов. Температурное же разрешение составило 2°C и может быть улучшено использованием лавинных фотодиодов с большим коэффициентом усиления (уменьшение шумов при одном и том же времени накопления), а также подбором более оптимальной конфигурации фильтра КР с целью минимизации шумов, вносимых рэлеевским рассеянием. Для демонстрации соответствия измеряемых температур была снята зависимость показания датчика от реальной температуры тестового волокна. Полученный линейный отклик на изменение температуры совпадает с абсолютным значением температуры с точностью 2°C , что говорит о перспективности применения оптоволоконного температурного датчика для контроля протяженных объектов.

Авторы выражают благодарность М.А.Никулину за изготовление волоконных ответвителей и А.А.Власову за изготовление брэгговских решеток.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН и гранта Министерства образования и науки РФ.

1. Кульчин Ю.Н. *Распределенные волоконно-оптические измерительные системы* (М.: Физматлит, 2004).
2. Francis T.S.Yu., Shizhuo Yin (Eds). *Fiber optic sensors* (New York: Marcel Dekker, 2002).
3. Курков А.С., Парамонов В.М. *Труды Российского семинара по волоконным лазерам* (Новосибирск, 2007, с. 73).
4. Stierlin R., Ricka J., Zysset B., Battig R., Weber Heinz P., Binkert T., Borer W.J. *Appl. Opt.*, **26** (8), 1368 (1987).
5. Stoddart P.R., Cadusch P.J., Pearce J.B., Vukovic D., Nagarajah C.R., Booth D.J. *Meas. Sci. Technol.*, **16**, 1299 (2005).
6. Long D.A. *Raman Spectroscopy* (New York: McGraw-Hill, 1977).