

С. А. Бабин<sup>1</sup>, А. А. Власов<sup>1,2</sup>, С. И. Каблуков<sup>1</sup>, И. С. Шелемба<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматки и электрометрии СО РАН  
пр. Акад. Коптюга, 1, Новосибирск, 63090, Россия  
E-mail: shelemba@iae.nsk.su

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

## СЕНСОРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК

Реализована волоконно-оптическая сенсорная система на основе анализатора спектра. Погрешность определения температуры не превышает 0,5 °С. Разработано устройство опроса волоконных брэгговских сенсоров на основе узкополосного перестраиваемого эрбиевого лазера. Характеристики лазера позволяют опрашивать до 45 датчиков температуры в диапазоне 100 °С с погрешностью не более 1 °С.

*Ключевые слова:* волоконная оптика, перестраиваемый лазер, волоконно-оптическая брэгговская решетка, волоконно-оптический сенсор.

### Введение

Применение сенсоров на основе волоконно-оптических брэгговских решеток является одним из перспективных методов распределенного измерения температуры, давления и др. физических величин. Основными преимуществами таких сенсоров являются высокая чувствительность, малые размеры, способность работы без подвода электричества, нечувствительность к электромагнитным помехам и возможность объединения сенсоров в распределенные системы [1]. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) представляет собой участок волоконного световода, в сердцевине которого наведена структура показателя преломления с периодом  $\Lambda \sim 0,5$  мкм [2]. Наиболее важным свойством ВБР является отражение оптического излучения на брэгговской длине волны  $\lambda_o = 2\Lambda n$ , где  $n$  – показатель преломления сердцевины. Возмущение состояния решетки (растяжение, нагрев) вызывает изменение положения максимума в спектре отраженной волны (рис. 1). Это свойство ВБР положено в основу создания волоконно-оптических сенсоров.

Основной проблемой, определяющей практическое применение сенсоров на основе ВБР, является разработка методов и оборудования для измерения малых сдвигов брэгговских пиков с большой точнос-

тью [3]. Простейшее решение – использование широкополосного источника излучения и анализатора оптического спектра (рис. 2). Коммерчески доступные анализаторы обладают разрешением до 1 пм, что в диапазоне 1,5 мкм соответствует изменению температуры брэгговского сенсора на 0,1 °С или растяжению  $\sim 10^{-6}$ , однако практическое применение таких приборов ограничено в силу их высокой стоимости.

Перспективным методом сканирования спектра отражения является использование узкополосного перестраиваемого лазера и фотодетектора, на который поступает излучение, отраженное от ВБР (рис. 3). Изменяя длину волны излучения лазера, можно прописать спектр отражения сенсоров. В этом случае такие параметры системы, как количество сенсоров, разрешение и погрешность измерений, напрямую зависят от диапазона перестройки лазера, ширины линии, стабильности мощности и длины волны генерации. Основное преимущество данного метода – возможность обеспечить высокое разрешение измерений при потенциально низкой стоимости устройства.

Оптимальным в качестве перестраиваемого источника излучения видится использование эрбиевого лазера, обладающего такими преимуществами, как широкий диапазон перестройки, генерация в области

1,55 мкм, соответствующей минимуму потерь в оптоволокне, отсутствие юстировок и доступная диодная накачка. Известно множество способов перестройки длины волны излучения и различных схем резонаторов волоконных лазеров, поэтому важным является выбор оптимальной конфигурации лазера, обеспечивающей наилучшие выходные характеристики.

В данной работе реализована сенсорная система на основе анализатора оптического спектра. Также создан макет устройства опроса ВБР-сенсоров на основе перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера. Произведена оптимизация лазера для получения выходных параметров.

### Сенсорная система на основе анализатора оптического спектра

На рис. 2 представлена схема волоконно-оптической сенсорной системы. Оптическое излучение с широкополосного источника поступает на массив из 12-ти сенсоров, записанных в одном волоконном световоде. Отраженный сигнал сканируется анализатором спектра, данные с которого через интерфейс GPIB поступают в компьютер, где по положениям максимумов отражения вычисляется температура каждого сенсора.

В ходе тестирования системы проводились как точечные измерения отдельными сенсорами, так и измерения поля температур 12-ю сенсорами. Было показано, что возмущения одного датчика никак не влияют на соседние, а погрешность измерений в данной системе не превышает 0,5 °С.

Также необходимо отметить, что количество сенсоров ограничено только рабочими диапазонами широкополосного источника и анализатора спектра и при помощи коммерчески доступных приборов может быть расширено до нескольких десятков.

### Сенсорная система на основе перестраиваемого волоконного лазера

В качестве элемента, селекционирующего длину волны излучения лазера была выбрана перестраиваемая ВБР с коэффициентом отражения ~0,9 и шириной спектра отражения на полувысоте ~0,3 нм. Перестройка осуществлялась за счет ее аксиального сжатия внутри узкой феррулы. Использование оригинальной схемы сжимающего устройства, управляемого шаговым двигателем, поз-

волило обеспечить диапазон перестройки 1 537–1 582 нм с шагом 4 пм (рис. 4).

В ходе данной работы были исследованы характеристики более 10-ти конфигураций

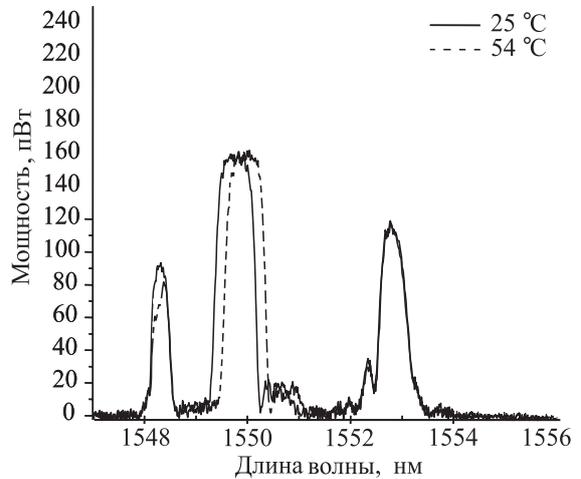


Рис. 1. Спектры отражения трех волоконных брэгговских решеток при температуре окружающей среды 25 °С и при нагревании одной из решеток до температуры 54 °С

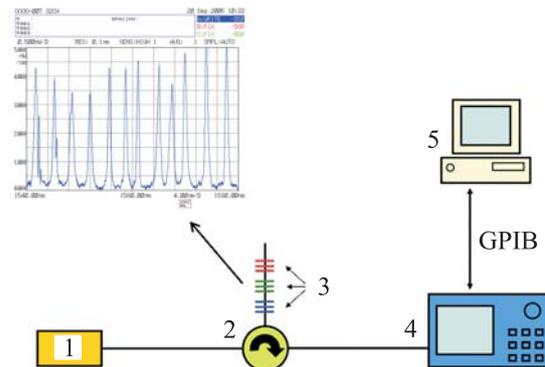


Рис. 2. Сенсорная система на основе анализатора оптического спектра: 1 – широкополосный источник излучения; 2 – циркулятор; 3 – массив брэгговских сенсоров; 4 – анализатор оптического спектра; 5 – компьютер

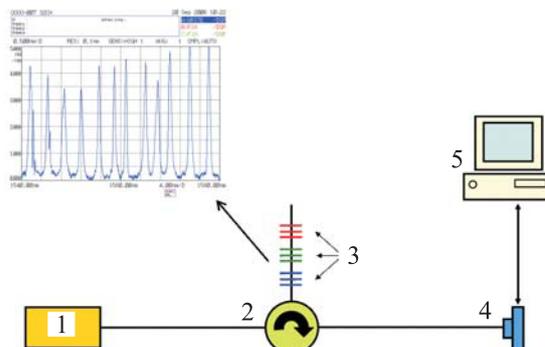


Рис. 3. Сенсорная система на основе узкополосного перестраиваемого лазера: 1 – узкополосный перестраиваемый лазер; 2 – циркулятор; 3 – массив брэгговских сенсоров; 4 – фотодетектор; 5 – компьютер

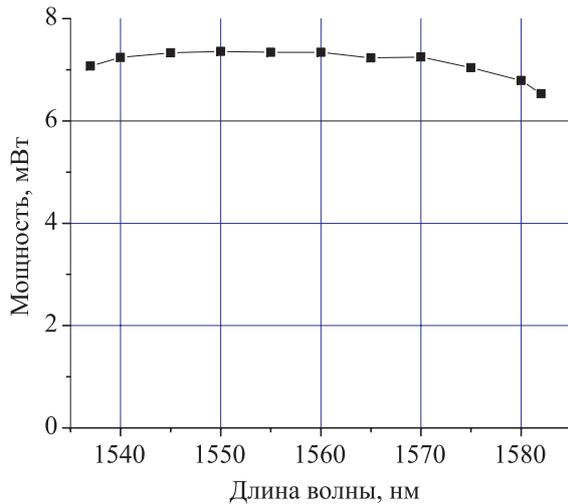


Рис. 4. Зависимость мощности от длины волны излучения волоконного эрбиевого лазера с перестраиваемой брэгговской решеткой. Мощность накачки 30 мВт

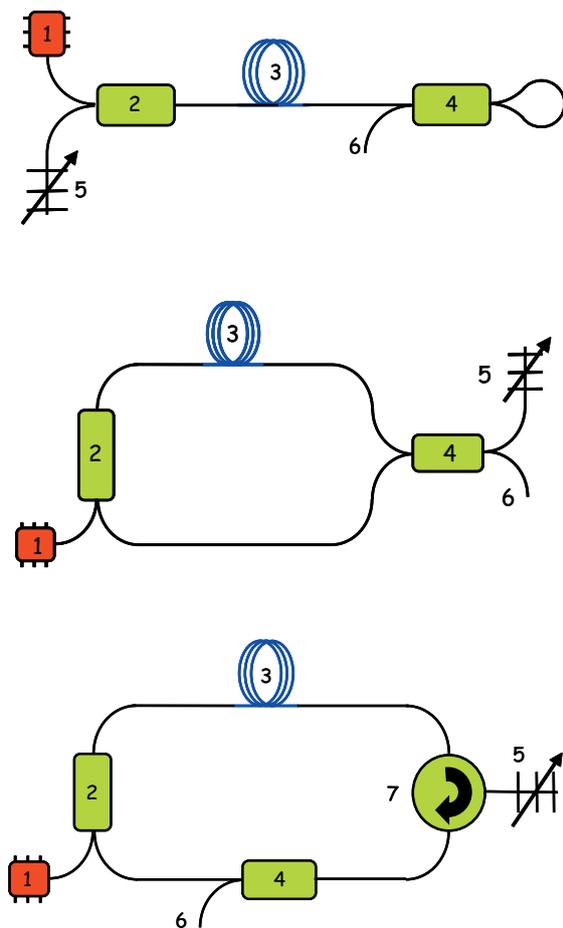


Рис. 5. Схема перестраиваемого эрбиевого лазера с линейным резонатором (а), с кольцевым резонатором (б), с кольцевым резонатором и циркулятором (в): 1 – диодный лазер накачки, 2 – волоконный мультиплексор, 3 – эрбиевое волокно, 4 – ответвитель, 5 – перестраиваемая брэгговская решетка, 6 – выход, 7 – циркулятор

резонатора [4]. Три из них, обеспечивающие наилучшие выходные характеристики, описаны ниже (рис. 5). Активной средой лазера с линейным резонатором (рис. 5, а) является волокно длиной 3,5 м, допированное ионами  $\text{Er}^{3+}$ . Накачка осуществлялась диодным лазером на длине волны 980 нм. Резонатор, общая длина которого составила  $\sim 7$  м, образован широкополосным зеркалом (коэффициент отражения  $\sim 0,5$ ), роль которого играет волоконный ответвитель, и перестраиваемой волоконной брэгговской решеткой. С помощью анализатора спектра Ando AQ-6317 измерялись следующие параметры: длина волны, мощность (рис. 6), ширина линии излучения, флуктуации мощности и длины волны генерации. Получены следующие значения ширины линии излучения  $\Delta\lambda$ , флуктуаций длины волны  $\langle\delta\lambda\rangle$  и флуктуаций мощности  $\langle\delta P\rangle/P$  для различных конфигураций лазера:

Вид лазера	$\Delta\lambda$ , nm	$\langle\delta\lambda\rangle$ , nm	$\langle\delta P\rangle/P$
С линейным резонатором	0,014	0,024	0,052
С кольцевым резонатором	0,022	0,002	0,022
С кольцевым резонатором и циркулятором	0,014	0,001	0,005

В схеме с линейным резонатором достигнута наибольшая мощность, однако флуктуации мощности и длины волны генерации оказались неудовлетворительными.

Использование кольцевого резонатора (рис. 5, б) снизило по сравнению с прошлой схемой мощность, но позволило обеспечить меньшие флуктуации мощности и длины волны излучения. Наилучшая стабильность за счет однонаправленного режима генерации и отсечения брэгговской решеткой усиленного спонтанного излучения достигается в схеме с кольцевым резонатором и циркулятором (рис. 5, в). Выходная мощность данного лазера оказалась наименьшей из сравниваемых (см. рис. 6), что объясняется наличием дополнительных потерь  $\sim 1$  дБ, вносимых циркулятором. Поскольку стабильность длины волны и мощности излучения лазера наиболее сильно влияют на погрешность сенсорной системы, предпочтение отдано последней схеме.

В качестве примера, при помощи данного лазера в автоматическом режиме был прописан спектр отражения массива из 12-ти брэгговских сенсоров (рис. 7).

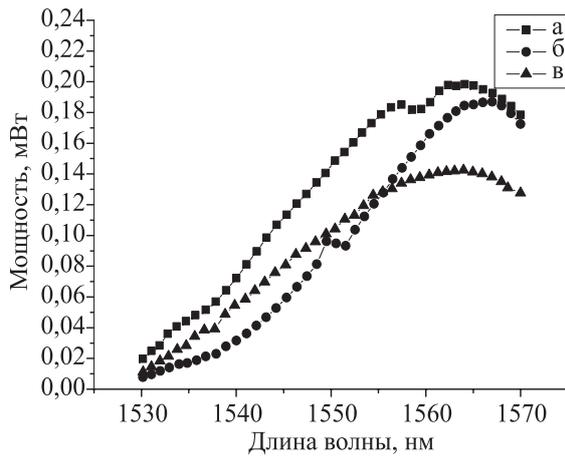


Рис. 6. Зависимость мощности от длины волны излучения лазеров с линейным резонатором (а), кольцевым резонатором (б) и кольцевым резонатором и циркулятором (в)

### Заключение

В данной работе реализована сенсорная система на основе анализатора оптического спектра. Продемонстрирована точность измерения температуры не хуже, чем  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , однако его практическое применение ограничено в силу высокой стоимости анализатора.

Разработан макет устройства опроса ВБР-сенсоров на основе узкополосного перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера. Волоконная брэгговская решетка, играющая роль селективирующего элемента, обеспечила перестройку длины волны генерации лазера в диапазоне более 45 нм с шагом 4 пм, что позволяет опрашивать до 45-ти сенсоров температуры в диапазоне  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  разрешением  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Проведено исследование зависимости выходных характеристик лазера от конфигурации резонатора. Наилучшая стабильность мощности ( $\langle\delta P\rangle/P = 0,005$ ) и длины волны генерации ( $\langle\delta\lambda\rangle = 0,001\text{ нм}$ ) достигается в схеме с кольцевым резонатором, использующей циркулятор. Ширина линии

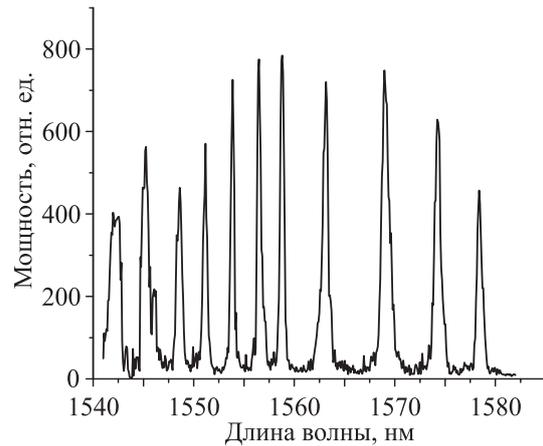


Рис. 7. Спектр отражения массива из 12-ти брэгговских сенсоров, прописанный при помощи перестраиваемого волоконного эрбиевого лазера

составила  $0,014\text{ нм}$ . Данные параметры позволяют обеспечить погрешность измерений температуры на уровне  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Список литературы

1. Kersey A. N. et al. Fiber Grating Sensors // Journal of Lightwave Technology. 1997. Vol. 15 (8).
2. Васильев С. А., Медведков О. И., Королев И. Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квант. электроника. 2005. Т. 35 (12). С. 1085–1103.
3. Кульчин Ю. Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2004.
4. Бабин С. А., Исмагулов А. Е., Каблуков С. И. и др. Перестраиваемый волоконный эрбиевый лазер для сенсорных применений // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Тр. междунар. конф. 2006. Т. 2. С. 134–136.

Материал поступил в редколлегию 31.05.2007