

УДК 681.7.068

**Г.Н. Вотинов, Я.Д. Токарева**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**ДАТЧИК ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР НА ОСНОВЕ  
ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК**

Представлены экспериментальные исследования поведения датчика температуры на основе волоконных брэгговских решеток в диапазоне от 300 до 450 °С по результатам показателей сдвига брэгговской длины волны. Используемая при этом методика является нечувствительной к механическому напряжению, поскольку один конец оптического волокна остается свободным и не деформируется. Предложена математическая модель расчета сдвига пика длины волны в зависимости от температуры.

**Ключевые слова:** волоконная брэгговская решетка, оптическое волокно, датчик температуры, защитно-упрочняющее покрытие, полиимид.

**G.N. Votinov, Ia.D. Tokareva**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**HIGH TEMPERATURE SENSOR BASED  
ON FIBER BRAGG GRATINGS**

The paper presents experimental studies of the temperature sensor behavior based on fiber-Bragg gratings in the range from 300 to 450 °C according to the results of the Bragg wavelength shift parameters. The used technique is insensitive to mechanical stress, since one end of the optical fiber remains free and does not deform. A mathematical model is proposed for calculating the shift of the wavelength peak depending on temperature.

**Keywords:** fiber Bragg grating, optical fiber, temperature sensor, protective-consolidating coverage, polyimide.

**Введение**

В настоящее время получили распространение датчики температур на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР). Данные датчики исследованы до температур, не превышающих 300 °С [1].

Возникает необходимость изучения поведения датчиков на основе ВБР при более высоких температурах, что актуально в устройствах, в которых невозможно установить электрические датчики температуры.

Возможные трудности: наиболее распространенные высокотемпературные защитно-упрочняющие покрытия (ЗУП) изготавливаются из полиимида, для которого верхняя температурная граница составляет 300 °С [2].

ЗУП, выдерживающие более высокие температуры, например покрытие из металла, сложны в производстве, нуждаются в специальном технологическом оборудовании и требуют дополнительного исследования, связанного с влиянием температуры на расширение материала. При этом небольшой объем выпускаемой продукции оказывается нерентабельным.

В данной работе предлагается конструкция датчика и исследуется принципиальная возможность работоспособности ВБР при высоких температурах.

## 1. Описание экспериментального исследования

В качестве исследуемых объектов были записаны четыре волоконных брэгговских решетки методом фазовой маски [3], покрытых полиимидным защитно-упрочняющим покрытием. Длина каждой ВБР составила 30 мм, центральные длины волн:  $\lambda_1 = 1516,98$  нм,  $\lambda_2 = 1529,12$  нм,  $\lambda_3 = 1538,11$  нм,  $\lambda_4 = 1579,08$  нм.

Определение смещения пика брэгговской длины волны производилось с использованием устройства опроса – спектроанализатора (СП) FiberSensing FS2200 Industrial BraggMETER – согласно схеме, представленной на рис. 1. Четыре ВБР, каждый конец которой был закреплен полиимидным скотчем, были помещены в капилляры, что обеспечивало равномерное нагревание всей поверхности ВБР. Один конец оптоволокна был оставлен свободным, т.е. было исключено механическое напряжение в ВБР, капилляры были помещены в температурную камеру МТХ-225НК с помощью жароустойчивого цилиндра. Длинные концы оптоволокна были сварены со сплавным разветвителем 50/50, который, в свою очередь, был подключен к самому спектроанализатору. Температура измерялась термометром сопротивления платиновым эталонным ПТСВ-3-3.

После помещения ВБР в камеру и подключения к СП были сняты начальные значения длины волны спектра при комнатной температуре. Дальнейшие испытания производились в термокамере с калибровкой по поверенной термопаре с шагом 10 °С от 300 до 450 °С с выдержкой 10 мин в каждой точке.

Особенность эксперимента состояла в высокой температуре нагрева, критичной для ЗУП ВБР.

Предполагаем, что при  $T > 300$  °С полиимидное ЗУП постепенно испарится с ВБР и при отсутствии механического напряжения в волокне ВБР будет продолжать работать, поскольку температура плавления чистого кварца превышает 1000 °С. Пик длины волны отражения будет смещаться [4, 5].

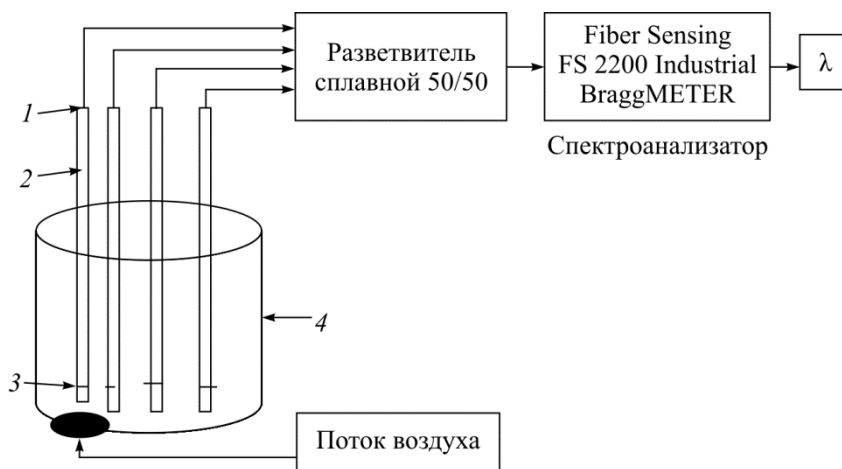


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – полиимидный скотч; 2 – капилляр; 3 – ВБР; 4 – цилиндр

## 2. Результаты исследования и их обсуждение

Зависимость длины волны отражения от температуры и ее смещение от исходных значений представлены в таблице.

Влияние температуры на длину волны ВБР

$T, ^\circ\text{C}$	Длина волны, нм				Изменение длины волны, нм			
25	1516,9	1529,1	1538,08	1579,08	1516,899	1529,1	1538,08	1579,08
300	1520,07	1532,35	1541,28	1582,32	3,1711	3,2507	3,2009	3,2362
310	1520,2	1532,47	1541,4	1582,42	3,2968	3,369	3,3188	3,3419
320	1520,33	1532,58	1541,53	1582,55	3,4266	3,4836	3,448	3,4703
330	1520,45	1532,72	1541,66	1582,69	3,5555	3,6172	3,5811	3,6057
340	1520,59	1532,85	1541,8	1582,83	3,6875	3,7499	3,7156	3,7475
350	1520,72	1532,99	1541,93	1582,98	3,8164	3,8853	3,8505	3,8965
360	1520,85	1533,13	1542,07	1583,13	3,9488	4,0288	3,9907	4,0445
370	1520,98	1533,27	1542,22	1583,27	4,0826	4,1704	4,1396	4,1864
380	1521,12	1533,4	1542,36	1583,41	4,2191	4,3038	4,2759	4,3295
390	1521,26	1533,55	1542,5	1583,55	4,3591	4,4458	4,4168	4,471

Окончание таблицы

$T, ^\circ\text{C}$	Длина волны, нм				Изменение длины волны, нм			
	400	1521,4	1533,68	1542,63	1583,69	4,498	4,5839	4,5506
410	1521,53	1533,82	1542,77	1583,83	4,6341	4,7237	4,6907	4,7522
420	1521,67	1533,97	1542,92	1583,98	4,7736	4,8652	4,8356	4,8944
430	1521,81	1534,1	1543,06	1584,12	4,9118	5,0036	4,9768	5,0379
440	1521,95	1534,24	1543,21	1584,26	5,0512	5,1435	5,1279	5,1825
450	1522,09	1534,39	1543,35	1584,4	5,1881	5,2851	5,2663	5,3221

На графиках (рис. 2) представлены результаты температурной зависимости смещения центральной длины волны для всех четырех образцов ВБР. Добавлены линии аппроксимации, рассчитанные методом наименьших квадратов.

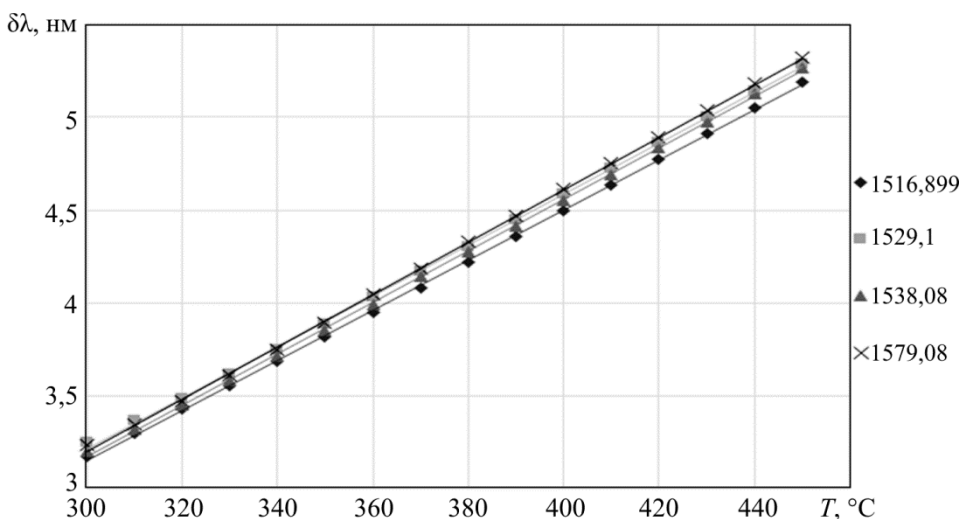


Рис. 2. Отклонение длины волны от исходной (при  $25^\circ\text{C}$ )

Анализ зависимости (см. рис. 2) показал, что все ВБР ведут себя однотипно и в интересующем нас интервале температур могут быть легко интерполированы линейно:

$$\lambda_i(T) = \lambda_i(300) + k(T - 300), \quad i = 1 \dots 4, \quad (1)$$

где  $k$  можно рассчитать по данным таблицы:

$$k = 0,01367 \pm 0,00023 \text{ нм}/^\circ\text{C}.$$

При этом  $\lambda_i(300)$  также может быть рассчитана добавлением к исходной длине волны отклонения, которое оказывается практически одинаковым для всех изготовленных решеток:

$$\lambda_i(300) = \lambda_i(T_k) + k_0(300 - T_k), \quad i = 1 \dots 4, \quad (2)$$

где  $T_k$  – комнатная температура, а  $k_0$  также можно рассчитать по данным таблицы:

$$k_0 = 0,01169 \pm 0,00014 \text{ нм/}^\circ\text{С}.$$

Максимальный разброс значений составляет 0,08 нм, что по порядку величины совпадает с точностью записи ВБР.

Таким образом, зависимость длины волны от температуры в интервале от 300 до 450 °С может быть (с погрешностью около 3 °С) интерполирована следующим соотношением:

$$\lambda_i(T) = \lambda_i(T_k) + k_0(300 - T_k) + k(T - 300), \quad i = 1 \dots 4. \quad (3)$$

Для повышения точности до 1 °С вычисления длины волны в зависимости от температуры (или температуры от длины волны – в датчиках) нужно пользоваться соотношением (1), где  $\lambda_i(300)$  должна быть определена экспериментально.

Таким образом, зависимость длины волны отражения от ВБР при температурах, превышающих 300 °С, можно моделировать (рис. 3) линейно с помощью соотношений (1), (3). Данная модель позволяет определять с высокой точностью пик длины волны отражения в зависимости от температуры в отсутствие защитно-упрочняющего покрытия.

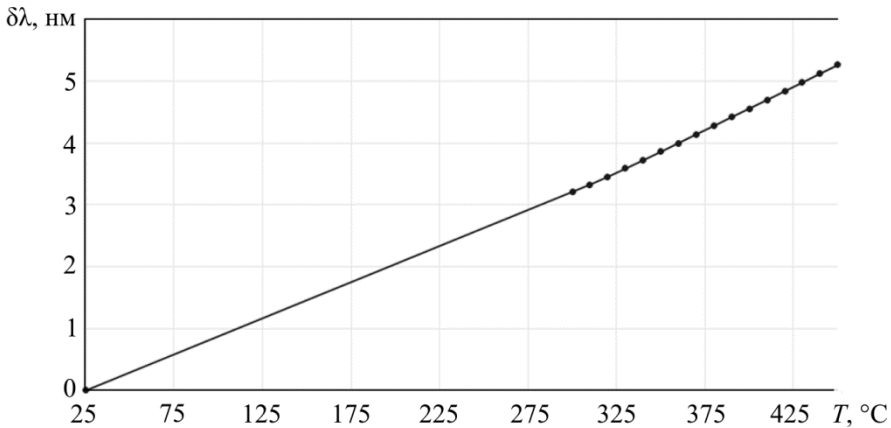


Рис. 3. Модель поведения ВБР

За время эксперимента (двое суток) наблюдалась повторяемость результата для различных волоконных брэгговских решеток в диапазоне температур от 300 до 450 °С.

При температуре 350 °С полиимидное защитно-упрочняющее покрытие испаряется, однако это не влияет на работу датчика. Повторные измерения, проведенные в этом интервале температур, подтверждают это. По достижении 450 °С собранный датчик температуры подавал сигнал с неизменной точностью. Таким образом, предельная температура работоспособности решетки не была достигнута.

### Выводы

Проведенное исследование поведения датчиков температуры на основе ВБР при температурах, превышающих 300 °С, свидетельствует о принципиальной возможности их использования при высоких температурах.

Зависимость длины волны отражения от ВБР в датчиках температуры в отсутствие защитно-упрочняющего покрытия в диапазоне от 300 до 450 °С можно моделировать линейно с помощью соотношений (1), (3) с точностью до 1 °С.

### Список литературы

1. Высокотемпературный датчик [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.i-sensor.ru/index.php/production/tochechnye-datchiki/sensors/90-produktsiya/tochechnye-voikonno-opticheskie-datchiki/147-astro-a514> (дата обращения: 31.08.2017).
2. Biswas D.R. Opt. Eng. – 1991. – № 30 (6).
3. Результаты записи волоконных брэгговских решеток на кварцевых градиентных многомодовых оптических волокнах разных поколений / А.В. Бурдин, А.А. Васильцев, В.А. Бурдин [и др.] // Инфокоммуникационные технологии. – 2016. – Т. 14, № 2. – С. 129–137.
4. Моделирование волоконно-оптических сенсоров температуры на основе брэгговской решетки / W. Waldemar, К.Х. Жунисов, Н.К. Смайлов [и др.] // Велес. – 2016. – № 4-2 (34). – С. 71–76.
5. Управление резонансной длиной волны волоконных брэгговских решеток с использованием резистивного покрытия на основе однослойных углеродных нанотрубок / Ю.Г. Гладуш, О.И. Медведков, С.А. Васильев [и др.] // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 10. – С. 919–923.

## References

1. High Temperature sensor, available at: <http://www.i-sensor.ru/index.php/production/tochechnye-datchiki/sensors/90-produktsiya/tochechnye-volokonno-opticheskie-datchiki/147-astro-a514> (accessed 31 August 2017).
2. Biswas D.R. *Opt. Eng.*, 1991, no. 30 (6), 772 p.
3. Burdin A.V., Vasil'tsev A.A., Burdin V.A. etc. The results of recording of fiber Bragg gratings on silica graded multimode optical fibers of different generations. *Information and communication technology*, 2016, vol. 14, no. 2, pp. 129-137.
4. Waldemar W., Zhunisov K.Kh., Smailov N.K. et al. Modeling of fiber-optic temperature sensors based on the bragg grating. *Veles*, 2016, no. 4-2 (34), pp. 71-76.
5. Gladush Yu.G., Medvedkov O.I., Vasilev S.A. et al. Control over the resonance wavelength of fibre Bragg gratings using resistive coatings based on single-wall carbon nanotubes. *Quantum electronics*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 919-923.

Получено 29.09.2017