

УДК 53.082.5, 681.7.068

КВАЗИРАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ОПТОВОЛОКОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

М. А. КСЕНОФОНТОВ¹⁾, А. В. ПОЛЯКОВ²⁾

¹⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) в качестве многофункционального оптического чувствительного элемента имеет ряд преимуществ, таких как нечувствительность к электромагнитному воздействию, высокая точность и малый объем, что обеспечивает широкий спектр ее применения. На основе разработанной математической модели исследована чувствительность ВБР с металлическим покрытием из никеля, алюминия и меди в интервале температур от –140 до +200 °C. Установлено, что температурная чувствительность ВБР не является постоянной. Это обстоятельство обусловлено нелинейной зависимостью эффективного показателя преломления волокна и коэффициента теплового расширения металла от температуры. Наибольший сдвиг центральной длины волн отраженного от ВБР излучения зафиксирован для ВБР с алюминиевым покрытием. Показано, что в диапазоне температур от –140 до 0 °C чувствительность металлизированных ВБР повышалась от 6 до 37 пм/°C, в диапазоне температур от 0 до +200 °C она увеличивалась от 37 до 59 пм/°C. У ВБР с металлическим покрытием чувствительность в 3,5–4,0 раза выше, чем у ВБР с полимерным покрытием. Выявлено, что для эффективного увеличения чувствительности датчика толщина металлического покрытия ВБР не должна превышать 200 мкм. Для формирования квазираспределенного волоконно-оптического датчика с использованием широкополосного оптического усилителя со спектральной полосой усиления 80 нм возможно на одном волоконном световоде интегрировать до шести металлизированных ВБР при условии, что спектральный интервал сдвига центральной длины волн отраженного от каждой ВБР излучения не будет накладываться в температурном интервале измерений. Способность датчика работать в большом диапазоне температур открывает широкие возможности для его применения в различных отраслях промышленности и решения прикладных задач, если электрические измерения нецелесообразны или небезопасны.

Ключевые слова: квазираспределенный датчик; волоконная брэгговская решетка; металлическое покрытие; температурная чувствительность.

Образец цитирования:

Ксенофонтов МА, Поляков АВ. Квазираспределенный оптоволоконный измеритель температуры на основе волоконных брэгговских решеток с металлическим покрытием. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2025; 3:14–23.

EDN: XREDMG

For citation:

Ksenofontov MA, Polyakov AV. Quasi-distributed fiber-optic temperature measurement device based on fiber Bragg gratings with metal coating. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2025;3:14–23. Russian.

EDN: XREDMG

Авторы:

Михаил Александрович Ксенофонтов – доктор физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией физикохимии полимерных материалов и природных органических соединений.

Александр Владимирович Поляков – доктор физико-математических наук, доцент; профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий факультета радиофизики и компьютерных технологий.

Authors:

Michael A. Ksenofontov, doctor of science (physics and mathematics), docent; head of the laboratory of physical chemistry of polymer materials and natural organic compounds.

lab_dozator@mail.ru

Alexandre V. Polyakov, doctor of science (physics and mathematics), docent; professor at the department of physics and aerospace technologies, faculty of radiophysics and computer technologies.

polyakov@bsu.by

QUASI-DISTRIBUTED FIBER-OPTIC TEMPERATURE MEASUREMENT DEVICE BASED ON FIBER BRAGG GRATINGS WITH METAL COATING

M. A. KSENOFONTOV^a, A. V. POLYAKOV^b

^aA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurchatava Street, Minsk 220045, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. V. Polyakov (polyakov@bsu.by)

Abstract. The fiber Bragg grating (FBG) as a multifunctional optical sensing element has a number of advantages, such as insensitivity to electromagnetic effects, high accuracy and small volume, which provides a wide range of applications. Based on the developed mathematical model, the sensitivity of FBG with metallic coating of nickel, aluminium and copper over a temperature range from -140 to $+200$ °C was studied. It was established that the temperature sensitivity of the FBG is not constant. This is due to the non-linear dependency of the effective refractive index of the fiber and the thermal expansion coefficient of the metal on temperature. The greatest shift in the central wavelength of radiation reflected from the FBG was recorded for the FBG with an aluminium coating. It was shown that in the temperature range from -140 to 0 °C, the sensitivity of metallised FBG increased from 6 to $37 \text{ pm}^{\circ}\text{C}$, and in the temperature range from 0 to $+200$ °C, it increased from 37 to $59 \text{ pm}^{\circ}\text{C}$. The sensitivity of FBG with metallic coating is 3.5–4.0 times higher than sensitivity of FBG with polymer coating. It was found that to effectively increase the sensor's sensitivity, the thickness of FBG metallic coating should not exceed $200 \mu\text{m}$. To form a quasi-distributed fiber-optic sensor using a broadband optical amplifier with an 80 nm spectral gain bandwidth, it is possible to integrate up to six metallised FBGs on one fiber-optic, provided that the spectral interval of the shift in the central wavelength of radiation reflected from each FBG do not overlap within the temperature measurement range. The sensor's ability to operate over a wide temperature range opens up wide possibilities for its application in various industries and the solving of practical problems, where electrical measurements are impractical or unsafe.

Keywords: quasi-distributed sensor; fiber Bragg grating; metal coating; temperature sensitivity.

Введение

Развитие современных технологий обуславливает все возрастающую потребность в точных, надежных и устойчивых к внешним воздействиям системах измерения различных физических параметров. В настоящее время перспективным является использование волоконно-оптических технологий, которые позволяют создавать высокочувствительные и компактные датчики. Среди них особое внимание уделяется разработке волоконно-оптических датчиков температуры (ВОДТ), поскольку температурный контроль играет важную роль практически во всех отраслях науки, техники, промышленности, медицины и т. д. Такие датчики основаны на изменении оптических свойств светового сигнала, проходящего по волокну, в зависимости от изменения температуры окружающей среды. По сравнению с традиционными термометрами и термопарами ВОДТ имеют ряд преимуществ: они являются устойчивыми к воздействию электромагнитного излучения, используются на больших расстояниях, работают в агрессивных и взрывоопасных средах, формируют распределенные измерительные системы, охватывающие десятки километров, и обладают широким спектром применения (от мониторинга состояния энергетического оборудования до контроля температуры в медицинских и биотехнологических системах).

В настоящее время главной тенденцией в разработке и конструировании волоконно-оптических датчиков является использование волоконного световода как в качестве чувствительного элемента, так и в качестве канала передачи информации. На данном принципе базируются распределенные ВОДТ на основе вынужденного комбинационного рассеяния [1–4] и вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна [5–8], а также квазираспределенные ВОДТ на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) [9–12]. Датчики на основе вынужденного комбинационного рассеяния характеризуются малой величиной температурного коэффициента рамановского рассеяния, что требует применения длительного накопления сигнала и использования излучения накачки с мощностью более 0,8 Вт, при этом погрешность измерений составляет 1 °C. Основными недостатками волоконных распределенных датчиков Мандельштама – Бриллюэна являются относительно невысокая точность измерения (около 1 °C) и довольно большое время измерений (от десятков секунд до десятков минут). Погрешность измерений квазираспределенными волоконно-оптическими датчиками на основе ВБР ограничивается шириной спектральной

линии отраженного от ВБР излучения, чувствительностью спектроанализатора или прецизионностью перестройки лазерных источников излучения. Количество используемых ВБР определяется спектральной шириной источника излучения, чувствительностью ВБР и требуемым диапазоном температур.

Оптимальным вариантом по сочетанию метрологических характеристик, простоты и надежности являются измерительные системы на основе квазираспределенных ВОДТ, которые представляют собой массив точечных сенсорных элементов в виде ВБР, объединенных одним общим волоконным световодом. Благодаря своим свойствам ВОДТ на основе ВБР применяются в аэрокосмической отрасли [13; 14]. При вращении по орбите вокруг Земли освещенная Солнцем сторона аппарата и его затененная сторона испытывают значительные перепады температуры, что требует постоянного температурного мониторинга космического объекта при эксплуатации. В этой связи исследование температурной чувствительности ВБР прецизионных ВОДТ является актуальной задачей. В большинстве современных исследований, посвященных температурным характеристикам обычных ВБР, рассматриваются ограниченные температурные диапазоны. Цель настоящей работы – теоретическое изучение квазираспределенных ВОДТ на основе кварцевых ВБР с металлическим покрытием в широком диапазоне положительных и отрицательных температур. В рамках исследования с опорой на разработанную математическую модель проводилось численное моделирование характеристик измерителя температуры.

Структура квазираспределенной волоконно-оптической измерительной системы на дифракционных ВБР

ВБР представляет собой участок оптического волокна, на котором показатель преломления сердцевины периодически изменяется в направлении продольной оси. Модуляция показателя преломления связывает основную моду волоконного световода с модой, распространяющейся в обратном направлении. В результате излучение на определенной длине волны, распространяющееся по оптическому волокну, может быть отражено от ВБР. Коэффициент отражения излучения от ВБР зависит от глубины модуляции показателя преломления, а центральная длина волны отраженного от ВБР излучения задается условием Брэгга [12]

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}(T)\Lambda(T), \quad (1)$$

где λ_B – центральная брэгговская длина волны; n_{eff} – эффективный показатель преломления сердцевины волокна для центральной брэгговской длины волны; T – воздействующая температура; Λ – период ВБР.

Излучение на других длинах волн проходит через ВБР практически без потерь. Характеристики отражения зависят от параметров решетки. Принцип работы ВОДТ на основе ВБР базируется на зависимости изменения спектральных свойств отраженного излучения под воздействием температуры. При использовании ВБР с различными параметрами можно мультиплексировать большое число датчиков, проводя одновременные измерения в различных точках волокна на разных брэгговских длинах волн.

Применяемая в качестве чувствительного элемента температурного датчика ВБР подвергается либо расширению, либо сжатию при изменении температуры, что приводит к изменению эффективного показателя преломления и периода решетки. В результате длина волны оптического сигнала, отражаемого от ВБР, изменяется согласно формуле (1). Измеряя спектральный сдвиг длины волны отраженного излучения, можно определить величину температурного воздействия на датчик. На рис. 1 представлена функциональная схема исследуемой квазираспределенной волоконно-оптической измерительной системы на основе ВБР с металлическим покрытием, увеличивающим ее чувствительность. Металлическое покрытие также защищает ВБР от внешних поперечных деформаций и изменения давления. В качестве широкополосного оптического излучателя (ШОИ) чаще всего используется светодиод с шириной спектра 50–100 нм в окрестности длины волны 1550 нм, где наблюдаются минимальные оптические потери, с максимальной мощностью излучения до 0,5 мВт. Низкая мощность излучения ограничивает длину волоконно-оптической линии. Обладающие таким же широким спектром излучения суперлюминесцентные светодиоды имеют мощность излучения, сравнимую с мощностью излучения полупроводниковых лазеров [15; 16], однако их недостатками являются высокая чувствительность к отраженному излучению и сильная зависимость мощностных, спектральных и поляризационных характеристик от температуры. Сигнал от источника проходит через ряд ВБР с различными центральными брэгговскими длинами волн. Отраженное от ВБР излучение усиливается эрбийевым волоконным оптическим усилителем (*erbium doped fiber amplifier*, EDFA), обеспечивающим увеличение длины волоконного световода (ВС), и регистрируется оптоэлектронным блоком (ОЭБ), состоящим из оптического спектроанализатора (ОСА) и фотоприемника (ФП). Величина смещения центральных брэгговских длин волн с помощью персонального компьютера (ПК) преобразовывается в изменение температуры ВБР по отношению к исходной температуре калибровки и отображается блоком отображения и регистрации (БО). Питание элементов установки осуществляется с помощью блока питания (БП). Для повышения чувствительности системы на ВБР наносится металлическое покрытие. Минимальное расстояние между пиками отражений излучений от ВБР по шкале длин волн определяется исходя из условия, заключающегося в отсутствии наложения этих пиков для заданного диапазона температур.

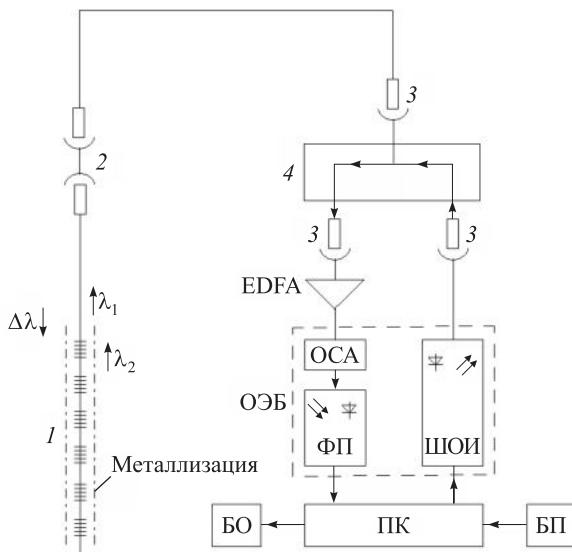


Рис. 1. Функциональная схема квазираспределенной волоконно-оптической измерительной системы на основе ВБР: 1 – дифракционные датчики; 2 – оптический разъем; 3 – волоконно-оптические соединители; 4 – разветвитель

Fig. 1. Functional diagram of a quasi-distributed fiber-optic measuring system based on fiber Bragg gratings: 1 – diffraction sensors; 2 – optical connector; 3 – fiber-optic connectors; 4 – splitter

В табл. 1 приведены технические характеристики некоторых спектроанализаторов, поскольку их разрешающая способность может ограничивать точность всей измерительной системы.

Таблица 1

Оптические спектроанализаторы и их характеристики

Table 1

Optical spectrum analysers and their characteristics

Модель оптического спектроанализатора	Производитель	Диапазон длин волн, нм	Динамический диапазон, дБм	Разрешающая способность, пм
FTB-5235	EXFO (Канада)	От 1250 до 1650	От -65 до +23	20
OSA20		От 1250 до 1700	От -80 до +25	20
FTBx-5245*, FTBx-5255*		От 1250 до 1650	От -80 до +18	10
FTB-5240S*, FTB-5240BP*		От 1250 до 1650	От -80 до +18	От 10 до 50
MS9710A	Anritsu (Япония)	От 600 до 1750	От -90 до +20	30
MS9740A		От 600 до 1750	От -90 до +23	70
AQ6370D	Yokogawa (Япония)	От 600 до 1700	От -90 до +20	20
BOSA-400	Aragon Photonics (Испания)	От 1265 до 1607	От -70 до +13	0,08
ID OSA	ID Photonics (Германия)	От 1528,5 до 1567,5	От -50 до +23	2,5
771A	Bristol Instruments (США)	От 375 до 1700	От 40	0,2

Примечание. Знаком * отмечены модули оптических спектроанализаторов.

Для определения величины спектрального сдвига центральной брэгговской длины волны в качестве спектроанализатора может применяться сканирующий фильтр Фабри – Перо [17], обладающий разрешающей способностью 2,5–10,0 пм в зависимости от конструкции. При сканировании оптическим фильтром с довольно узким пиком пропускания сигнала на фотоприемнике возникает каждый раз, когда длина волны пропускания фильтра совпадает с длиной волны отраженного от ВБР излучения. С использованием данных о времени сканирования находится длина волны пропускания фильтра в момент времени обнаружения. Затем определяются величина сдвига центральной брэгговской длины волны и соответствующее значение температуры.

Численное моделирование характеристик измерителя температуры

Поскольку чувствительные элементы датчика, включающие волоконный световод и набор ВБР, подвергаются значительным температурным воздействиям при эксплуатации, необходимо провести исследования величины сдвига центральной брэгговской длины волны в диапазоне температур от -140 до $+200$ °C. Сдвиг центральной брэгговской длины волны в зависимости от изменения температуры задается выражением [18]

$$\Delta\lambda_B = (\alpha + \xi) \lambda_{B_0} (T - T_h), \quad (2)$$

где α – результирующий температурный коэффициент линейного расширения структуры металл – волоконный световод; ξ – термооптический коэффициент; λ_{B_0} – центральная брэгговская длина волны при начальной комнатной температуре ($\lambda_{B_0} = 1550$ нм); T_h – начальная температура калибровки ($T_h = 20$ °C). Термооптический коэффициент описывается формулой

$$\xi = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}. \quad (3)$$

Вблизи комнатной температуры значения результирующего температурного коэффициента линейного расширения структуры металл – волоконный световод и термооптического коэффициента являются постоянными, что обеспечивает линейную зависимость между центральной брэгговской длиной волны и температурой, а также предполагает постоянную температурную чувствительность ВБР. Однако для широкого диапазона температур необходимо учитывать нелинейную зависимость названных коэффициентов, т. е. чувствительность ВОДТ также является переменной.

Для положительных температур от 0 до 200 °C зависимость эффективного показателя преломления сердцевины волокна для центральной брэгговской длины волны от температуры описывается выражением [19]

$$n_{\text{eff}} = n_0 + a_n T + b_n T^2, \quad (4)$$

где n_0 – эффективный показатель преломления при температуре 0 °C; a_n и b_n – коэффициенты аппроксимации ($a_n = 1,090 \cdot 10^{-5}$ °C $^{-1}$; $b_n = 1,611 \cdot 10^{-9}$ °C $^{-2}$). Для отрицательных температур, вплоть до криогенных, данная зависимость аппроксимируется в виде [18]

$$n_{\text{eff}} = 0,001\,94 \exp\left(\frac{T}{205,885}\right) + 1,463\,96. \quad (5)$$

В формуле (5) текущую температуру необходимо подставлять в кельвинах.

Поскольку коэффициент линейного теплового расширения металла значительно превышает коэффициент линейного теплового расширения кварца, то результирующий коэффициент линейного расширения структуры металл – волоконный световод рассчитывается по следующей формуле [20]:

$$\alpha = \frac{\sum_i S_i E_i \alpha_i}{\sum_i S_i E_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (6)$$

где S_i – площади сечения; E_i – модули Юнга; α_i – коэффициенты линейного теплового расширения конструктивных элементов; индекс $i = 1$ соответствует сердцевине, индекс $i = 2$ – оболочке, индекс $i = 3$ – покрытию.

Зависимость коэффициента линейного расширения волоконного световода от температуры имеет следующий вид [19; 21]:

$$\alpha = \alpha_0 + c_\alpha T + d_\alpha T^2, \quad (7)$$

где α_0 – коэффициент линейного расширения волоконного световода при температуре 0 °C; c_α и d_α – коэффициенты аппроксимации. Согласно источникам [19; 21] для температурного диапазона от 0 до 900 °C значения коэффициентов составляют $\alpha_0 = 5,36 \cdot 10^{-7}$ °C $^{-1}$, $c_\alpha = 1,24 \cdot 10^{-10}$ °C $^{-2}$ и $d_\alpha = 0$ °C $^{-3}$, а для температурного диапазона от 196 до 0 °C величины коэффициентов равны $c_\alpha = 1,20 \cdot 10^{-9}$ °C $^{-2}$ и $d_\alpha = -1,95 \cdot 10^{-11}$ °C $^{-3}$.

Для температур от 0 до +200 °C зависимость коэффициента линейного расширения металлического покрытия от температуры имеет вид

$$\alpha_3 = a_0 + b_1 (T - T_h), \quad (8)$$

где a_0 и b_1 – коэффициенты аппроксимации, определенные из экспериментальных зависимостей [22]. Для температур от -140 до 0 °C эта зависимость описывается выражением

$$\alpha_3 = a_0 + b_0(T - T_{\text{H}}) - c_0(T - T_{\text{H}})^2, \quad (9)$$

где b_0 и c_0 – коэффициенты аппроксимации, определенные из экспериментальных зависимостей [22]. Данные для расчетов приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Значения коэффициента линейного расширения и модуля Юнга
кварцевых волокон, легированных различными оксидами**

Table 2

**Values of the linear expansion coefficient and Young's modulus
of quartz fibers doped with various oxides**

Состав	$E_{0(1,2)}$, ГПа	$\alpha_{0(1,2)}$, °C ⁻¹
SiO ₂	65	$5,50 \cdot 10^{-7}$
13,5 мол. % GeO ₂ , 86,5 мол. % SiO ₂	72	$25,86 \cdot 10^{-7}$
9,1 мол. % P ₂ O ₅ , 90,9 мол. % SiO ₂	75	$25,55 \cdot 10^{-7}$
13,3 мол. % B ₂ O ₃ , 86,7 мол. % SiO ₂	77	$18,10 \cdot 10^{-7}$

Примечание. Индекс 1 соответствует сердцевине, индекс 2 – оболочке.

Таблица 3

Параметры металлических покрытий

Table 3

Parameters of metal coatings

Покрытие	a_0 , °C ⁻¹	b_1 , °C ⁻²	b_0 , °C ⁻²	c_0 , °C ⁻³	E_3 , ГПа
Никелевое	$13,4 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	204
Алюминиевое	$22,90 \cdot 10^{-6}$	$8,90 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-10}$	69
Медное	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$7,70 \cdot 10^{-9}$	$9,70 \cdot 10^{-9}$	$1,37 \cdot 10^{-10}$	110

Согласно стандартам ITU-T для типичного волокна эллиптичность сердцевины не превышает 5 %, некруглость оболочки составляет <2 %, поэтому можно моделировать волоконный световод как совокупность концентрических окружностей. Для одномодового световода диаметр сердцевины (D_1) равен 9 мкм, диаметр оболочки (D_2) составляет 125 мкм. Следовательно,

$$S_1 = \pi \frac{D_1^2}{4}, S_2 = \pi(D_1 + h_2)h_2, S_3 = \pi(D_2 + h_3)h_3, h_2 = \frac{D_2 - D_1}{2}. \quad (10)$$

Зависимость модуля Юнга от температуры для сердцевины волокна имеет следующий вид [23]:

$$E_1 = E_0 + B_1(T - T_{\text{H}}) - B_2(T - T_{\text{H}})^2, \quad (11)$$

где E_0 – модуль Юнга при начальной температуре калибровки, Па; B_1 и B_2 – параметры аппроксимации экспериментальных зависимостей, индивидуальные для каждого типа волокна. Для расчетов были взяты значения $B_1 = 1,59 \cdot 10^7$ Па/°C⁻¹ и $B_2 = 9,97 \cdot 10^3$ Па/°C⁻².

Предложенные аналитические выражения (2)–(11) позволяют установить зависимость сдвига центральной брэгговской длины волны от температуры для ВБР с различными типами металлического покрытия.

Поскольку ВОДТ на основе ВБР могут использоваться в космических аппаратах, важным фактором являются массогабаритные параметры. На рис. 2 представлена зависимость сдвига центральной брэгговской длины волны от толщины алюминиевого покрытия для нескольких значений температуры. Из полученных графиков следует, что толщина металлического покрытия не должна превышать 200 мкм, поскольку дальнейшее увеличение толщины не приводит к значительному повышению чувствительности датчика, но способствует росту его массы.

Проведены расчеты температурного сдвига центральной длины волны излучения, отраженного от ВБР, которые сформированы в кварцевых волоконных световодах с германосиликатной сердцевиной,

силикатной оболочкой и покрытием из никеля, алюминия, меди и полимеров (акрилата или полиимида). На рис. 3 и 4 точками отмечены значения сдвига центральной брэгговской длины волны для волоконных световодов с полимерным покрытием, полученные по данным работы [21].

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования смещения центральной брэгговской длины волны в диапазоне температур от 0 до +200 °C для ВБР с различным покрытием. Из данных графиков следует, что наибольшей чувствительностью обладают ВБР с алюминиевым покрытием. Зависимость сдвига центральной брэгговской длины волны от температуры носит нелинейный характер. Чувствительность ВБР с алюминиевым покрытием составляет 37 пм/°C в диапазоне температур от 0 до 100 °C, что в 4,1 раза превосходит чувствительность ВБР с полимерным покрытием (9 пм/°C), и 59 пм/°C в диапазоне температур от +120 до +200 °C, что в 3,4 раза превосходит чувствительность ВБР с полимерным покрытием.

Результаты численного моделирования смещения центральной брэгговской длины волны в диапазоне температур от -140 до 0 °C для ВБР с различным покрытием отражены на рис. 4. В этом случае чувствительность также демонстрирует нелинейный характер. Она существенно уменьшается в области, близкой к криогенным температурам. Например, в диапазоне температур от +25 до -40 °C чувствительность ВБР с алюминиевым покрытием составляет от 37 пм/°C, в диапазоне температур от -120 до -140 °C она достигает 6 пм/°C.

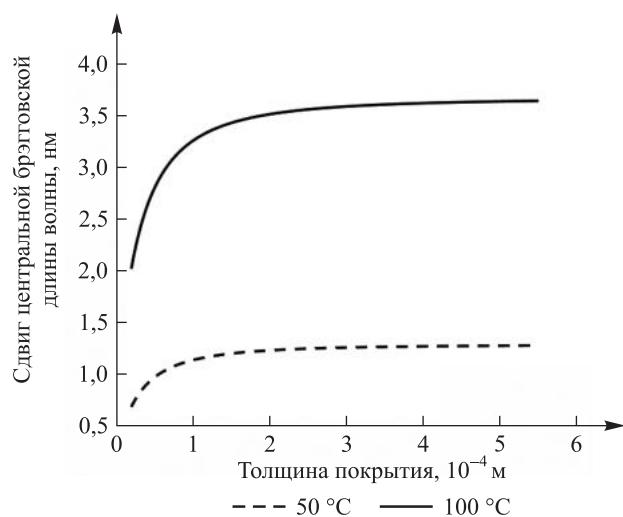


Рис. 2. Зависимость сдвига центральной брэгговской длины волны от толщины алюминиевого покрытия

Fig. 2. Dependence of the shift in the central Bragg wavelength on the thickness of the aluminium coating

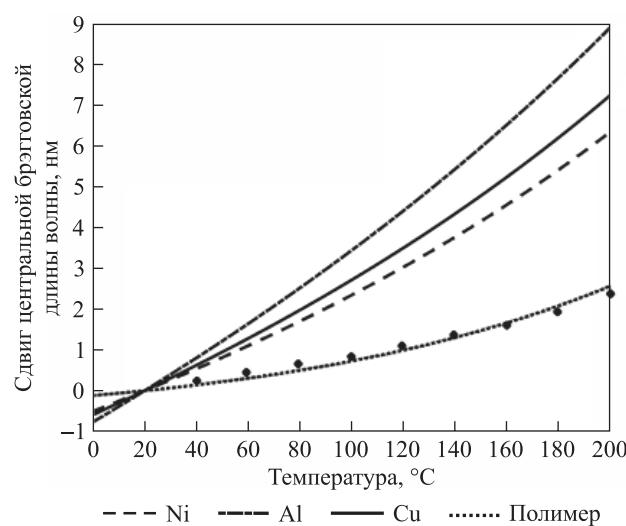


Рис. 3. Зависимость сдвига центральной брэгговской длины волны от изменения температуры в диапазоне от 0 до +200 °C для ВБР с различным покрытием

Fig. 3. Dependence of the shift in the central Bragg wavelength temperature changes in the range from 0 to +200 °C for FBG with different coating

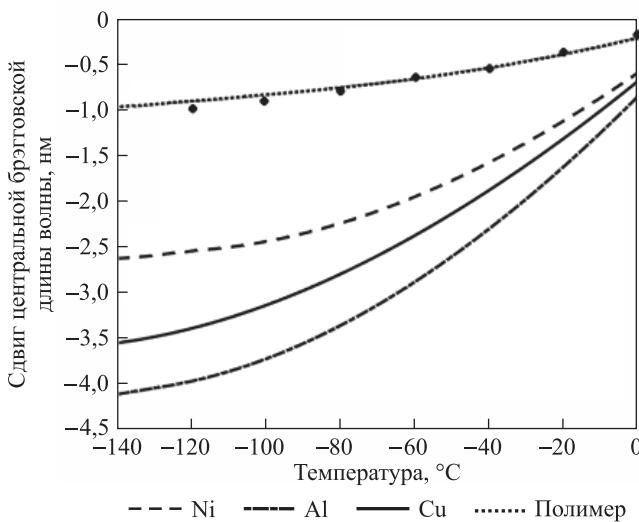


Рис. 4. Зависимость сдвига центральной брэгговской длины волны от изменения температуры в диапазоне от -140 до 0 $^{\circ}\text{C}$ для ВБР с различным покрытием

Fig. 4. Dependence of the shift in the central Bragg wavelength temperature changes in the range from -140 to 0 $^{\circ}\text{C}$ for FBG with different coating

Как было отмечено выше, погрешность измерений посредством ВОДТ зависит от ширины спектра отражения излучения от ВБР. Чтобы погрешность измерений не превышала 1 $^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от 0 до $+100$ $^{\circ}\text{C}$, сдвиг центральной брэгговской длины волны для ВБР с полимерным покрытием должен составлять 9 $\text{пм}/\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 3). Такое же разрешение должно быть и у спектроанализатора (см. табл. 1). Согласно результатам моделирования для достижения данной погрешности измерения температуры к спектральным характеристикам ВБР и спектроанализаторов предъявляются довольно жесткие условия. Металлизация ВБР приводит к увеличению чувствительности ВОДТ, что снижает требования к ширине спектра отражения излучения от ВБР и к разрешающей способности спектроанализаторов для погрешности 1 $^{\circ}\text{C}$, а при сохранении параметров ВБР достигается уменьшение погрешности в $3,5$ – $4,0$ раза (до температуры $0,30$ – $0,25$ $^{\circ}\text{C}$). Расширение диапазона сдвига центральной брэгговской длины волны отраженного от каждой ВБР излучения требует выполнения условия, заключающегося в отсутствии наложения спектров соседних ВБР при их смещении во всем измеряемом интервале температур. Для сохранения количества ВБР в квазираспределенном датчике был использован широкополосный оптический усилитель с активной средой в виде комбинации высоколегированного эрбиевого волокна с добавлением двуокиси циркония и эрбиевого волокна, результирующая ширина спектра усиления которого соответствует ширине генерации светодиода (рис. 5) [24]. Коэффициент усиления достигал 35 дБ , а шум-фактор не превышал 11 дБ . В дальнейшем оптимизация конструкции таких усилителей позволила уменьшить шум-фактор до $3,1$ – $5,2$ дБ для всей полосы усиления 80 нм , при этом коэффициент усиления снизился до $19,8$ дБ [25]. Суммарный сдвиг центральной брэгговской длины волны для одной ВБР с алюминиевым покрытием в исследуемом температурном интервале составил $13,1$ нм . В этом случае количество ВБР, которые можно интегрировать на одном волоконном световоде в полосе усиления оптического усилителя 80 нм , равняется шести.

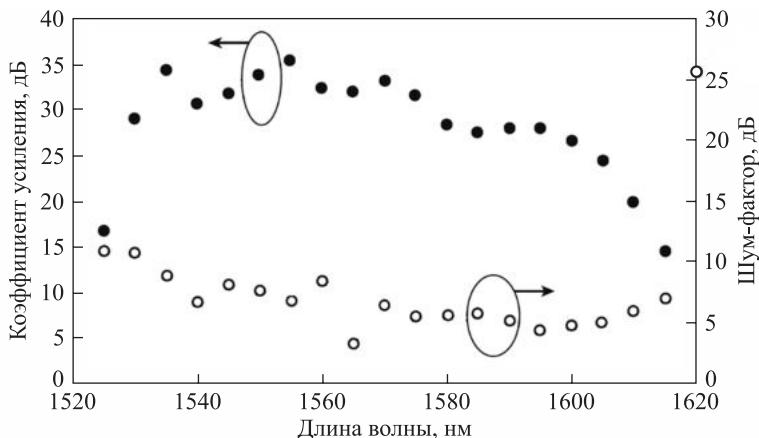


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления и шум-фактора от длины волны в широкополосном оптическом усилителе

Fig. 5. Dependence of gain and noise factor on wavelength in a broadband optical amplifier

Поскольку коэффициент линейного теплового расширения для металла значительно больше, чем для кварцевого стекла, при возрастании температуры возможно разрушение волоконного световода за счет продольных деформаций. В исследовании [26] установлено, что при стационарных однократных нагреваниях максимально измеряемая температура равняется 500 °C, в то время как при динамических изменениях температуры максимальные значения не превышали 315 °C при сроке службы до 10 лет.

Заключение

Численное моделирование характеристик измерителя температуры с использованием математической модели показало, что в интервале температур от –140 до +200 °C чувствительность металлизированных ВБР, применяемых в качестве чувствительных элементов в квазираспределенных ВОДТ, в 3,5–4,0 раза выше, чем чувствительность ВБР с полимерным покрытием. В результате сравнения ВБР с покрытиями из никеля, алюминия и меди было выявлено, что наибольшую чувствительность демонстрируют ВБР с алюминиевым покрытием, при этом определено, что для уменьшения погрешности измерений эффективно увеличивать толщину покрытия до 200 мкм. Установлено, что температурная чувствительность ВБР не является постоянной. Данное обстоятельство обусловлено нелинейной зависимостью эффективного показателя преломления волокна и коэффициента теплового расширения металла от температуры, что необходимо учитывать при проектировании и калибровке датчиков. Увеличение спектрального сдвига центральной брэгговской длины волн при изменении температуры на 1 °C приводит к уменьшению количества ВБР, которые можно мультиплексировать в спектральной полосе усиления оптического усилителя при условии, что спектры отдельных ВБР не будут накладываться в температурном интервале измерений и что для спектральной полосы усиления 80 нм возможно на одном волоконном световоде интегрировать до шести металлизированных ВБР.

Библиографические ссылки

1. Silva LCB, Segatto MEV, Castellani CES. Raman scattering-based distributed temperature sensors: a comprehensive literature review over the past 37 years and towards new avenues. *Optical Fiber Technology*. 2022;74:103091. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103091.
2. Li J, Zhang M. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing. *Light: Science & Applications*. 2022;11:128. DOI: 10.1038/s41377-022-00811-x.
3. Lu L, Wang Y, Liang C, Fan J, Su X, Huang M. A novel distributed optical fiber temperature sensor based on Raman anti-Stokes scattering light. *Applied Sciences*. 2023;13(20):11214. DOI: 10.3390/app132011214.
4. Yao C-K, Lin T-C, Chen H-M, Hsu W-Y, Manie YC, Peng P-C. Inclination measurement adopting Raman distributed temperature sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2023;23(19):22543–22555. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3306069.
5. Sheng D, Han Z, Qiao Z, Dong T, Wang C, Tian H. Distributed multi-parameter sensor based on Brillouin scattering in an etched few-mode multi-core fiber. *Optics Communications*. 2024;552:130085. DOI: 10.1016/j.optcom.2023.130085.
6. Zaghloul MA, Wang M, Milione G, Li M-J, Li S, Huang Y-K, et al. Discrimination of temperature and strain in Brillouin optical time-domain analysis using a multicore optical fiber. *Sensors*. 2018;18(4):1176. DOI: 10.3390/s18041176.
7. Bao X, Zhou Z, Wang Y. Review: distributed time-domain sensors based on Brillouin scattering and FWM enhanced SBS for temperature, strain and acoustic wave detection. *PhotoniX*. 2021;2:14. DOI: 10.1186/s43074-021-00038-w.
8. Hu L, Sheng L, Yan J, Li L, Yuan M, Sun F, et al. Simultaneous measurement of distributed temperature and strain through Brillouin frequency shift using a common communication optical fiber. *International Journal of Optics*. 2021;2021:1–6. DOI: 10.1155/2021/6610674.
9. Caloud J, Tomesova E, Balner V, Bogár O, Corre Y, Dejarnac R, et al. Conceptual design of fiber Bragg grating temperature sensors for heat load measurements in COMPASS-U plasma-facing components. *Fusion Engineering and Design*. 2023;193:113608. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2023.113608.
10. Волошина АЛ, Коробкова УР, Коннов ДА, Варжель СВ, Карпов ЕЕ. Разработка волоконно-оптического датчика температуры на базе чирпированных решеток Брэгга, основанного на модуляции интенсивности оптического излучения. *Оптический журнал*. 2024;91(12):84–90. DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-12-84-90.
11. Mehmood Khan RY, Ullah R, Faisal M. Fiber Bragg grating temperature sensor and its interrogation techniques. *Brilliant Engineering*. 2023;4(3):4840. DOI: 10.36937/ben.2023.4840.
12. Samiappan D, Praveen N, Sampita R, Paras R, Rajamanickam N, Ramamoorthy K, et al. Fiber Bragg grating sensor-based temperature monitoring of solar photovoltaic panels using machine learning algorithms. *Optical Fiber Technology*. 2022;69:102831. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.102831.
13. Fernández-Medina A, Frövel M, López Heredero R, Belenguer T, de la Torre A, Moravec C, et al. Embedded fiber Bragg grating sensors for monitoring temperature and thermo-elastic deformations in a carbon fiber optical bench. *Sensors*. 2023;23(14):6499. DOI: 10.3390/s23146499.
14. Liao T, Pei Y, Xu J, Lin H, Ning T. Fiber Bragg grating temperature sensors applied in harsh environment of aerospace. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers. *Asia Communications and Photonics Conference; 2018 October 26–29; Hangzhou, China*. Hangzhou: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2018. p. 1–3. DOI: 10.1109/ACP.2018.8595842.
15. Yamatoya T, Sekiguchi S, Koyama F, Iga K. High-power CW operation of GaInAsP/InP superluminescent light-emitting diode with tapered active region. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2001;40(7a):L678–L680. DOI: 10.1143/JJAP.40.L678.
16. Wu B-R, Lin C-F, Laih L-W, Shih T-T. Extremely broadband InGaAsP/InP superluminescent diodes. *Electronics Letters*. 2000;36(25):2093–2095. DOI: 10.1049/el:20001440.

17. Wang G, Pran K, Sagvolden G, Havsgard GB, Jensen EA, Johnson GA, et al. Ship hull structure monitoring using fibre optic sensors. *Smart Materials and Structures*. 2001;10(3):472–478. DOI: 10.1088/0964-1726/10/3/308.
18. Li Y, Yang K, Li X. Temperature sensing characteristics of metal coated FBG during dynamic cooling process. *Optical Fiber Technology*. 2018;45(9):368–375. DOI: 10.1016/j.yofte.2018.08.013.
19. Gao H, Jiang Y, Cui Y, Zhang L, Jia J, Jiang L. Investigation on the thermo-optic coefficient of silica fiber within a wide temperature range. *Journal of Lightwave Technology*. 2018;36(24):5881–5886. DOI: 10.1109/JLT.2018.2875941.
20. Поляков АВ, Прокопенкова ТД. Квазииспределенная волоконно-оптическая система измерения температуры рециркуляционного типа на основе технологии спектрального мультиплексирования. *Приборы и методы измерений*. 2017;8(2):131–141. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-131-141.
21. Ren N, Li H, Huo N, Guo S, Li J. Research on temperature sensing characteristics of fiber Bragg grating in wide temperature range. *Optics and Photonics*. 2024;8(2):162–169. DOI: 10.3807/COPP.2024.8.2.162.
22. Lupi C, Felli F, Ippoliti L, Caponero M, Fabbri F, Paolozzi A. Lead coating to improve fiber Bragg grating sensitivity at cryogenic temperatures. In: Voet M, Willsch R, Ecke W, Jones J, Culshaw B, editors. *Proceedings of the 17th International conference on optical fiber sensors; 2005 May 23–27; Bruges, Belgium*. Bruges: SPIE – The International Society for Optical Engineering; 2005. p. 811–815 (Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering; volume 5855). DOI: 10.1117/12.624224.
23. Лунин БС, Торбин СН. О температурной зависимости модуля Юнга чистых кварцевых стекол. *Вестник Московского университета. Серия 2, Химия*. 2000;41(3):172–173. EDN: ESDBID.
24. Hamida BA, Cheng XS, Harun SW, Naji AW, Arof H, al-Khateeb W, et al. Wideband and flat-gain amplifier based on high concentration erbium-doped fibres in parallel double-pass configuration. *Quantum Electronics*. 2012;42(3):241–243. DOI: 10.1070/QE2012v04n03ABEH014696.
25. al-Azzawi AA, Azooz SM, Almukhtar AA, Mezaal YaS, al-Hilali A, Hmood JaK, et al. A 95 × 40 Gb/s DWDM transmission system using broadband and flat gain amplification of promoted parallel EDFA. *Optical and Quantum Electronics*. 2022;54(12):870. DOI: 10.1007/s11082-022-04201-w.
26. Поляков АВ. Влияние динамических напряжений на долговечность кварцевых волоконных световодов в оптоэлектронных измерительных устройствах. *Контроль. Диагностика*. 2019;9:28–36. DOI: 10.14489/td.2019.09.pp.028-036.

Получена 31.07.2025 / исправлена 26.08.2025 / принята 26.08.2025.
Received 31.07.2025 / revised 26.08.2025 / accepted 26.08.2025.