

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 53.08, 681.2.089

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
МНОГОКРАТНЫХ ИСПЫТАНИЙ¹

© 2026 г. Н. С. Созонов^{a,b,*}, А. А. Оглеzneв^a, Е. Р. Виндокурова^a,
И. Н. Шардаков^b

^a ООО “Инверсия-Сенсор”

Российская Федерация, 614007, Пермь, ул. 25 Октября, 106

^b Институт механики сплошных сред

Уральского отделения Российской академии наук

Российская Федерация, 614068, Пермь, ул. Академика Королева, 1

* E-mail: sozonov@i-sensor.ru

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 29.05.2026

Принята к публикации 05.06.2026

Рассмотрена методика определения коэффициента оптической тензочувствительности волоконной брэгговской решетки (ВБР) при помощи растяжения с фиксацией в двух точках. Коэффициент определен при многократных испытаниях на базе 900 циклов, проведенных в 30 сериях по 30 испытаний. Подход позволил повысить точность определения математического ожидания коэффициента тензочувствительности с доверительным интервалом (0.7983 ± 0.0029). Полученный коэффициент верифицирован в испытании на четырехточечный изгиб на приклеенных ВБР. Установлено, что погрешность измерения деформации не превышает 1% в диапазоне от -5000 до $+5000$ мкм/м.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, погрешность, коэффициент чувствительности, деформация.

1. ВВЕДЕНИЕ

Волоконная брэгговская решетка (ВБР) [1] является одним из наиболее универсальных чувствительных элементов в волоконно-оптических датчиках [2]. Она представляет собой модифицированный участок оптического волокна с периодически измененным показателем

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

преломления. При прохождении оптического сигнала через ВБР отражается узкий участок спектра вблизи резонансной (также центральной или брэгговской) длины волны λ_B , а остальная часть оптического сигнала беспрепятственно распространяется далее по волокну. При удлинении волокна или воздействии температуры резонансная длина волны смещается в соответствии [3] с уравнением

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B_0}} = k\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T,$$

где $\Delta\lambda_B$ – изменение длины волны ВБР, λ_{B_0} – начальное (опорное) значение длины волны ВБР, k – коэффициент оптической тензочувствительности, α – коэффициент линейного температурного расширения оптического волокна и ξ – термооптический коэффициент.

Коэффициент оптической тензочувствительности k находится в диапазоне от 0.77 до 0.81 [4] и может различаться в зависимости от типа волокна. В публикациях зачастую приводится значение коэффициента, равное $k = 0.78$, на основании справочных данных по коэффициенту фотоупругости чистого кварцевого стекла. Но такая оценка является грубой для материала сердцевины оптического волокна с брэгговской решеткой, так как фотоупругий коэффициент зависит от многих факторов, сопровождающих производство волокна. В частности, такими факторами являются различные легирующие добавки в составе кварцевого стекла, технологические напряжения и т.п. Для измерения деформации с высокой точностью и достижения приведенной погрешности менее 1% двух значащих цифр коэффициента k недостаточно. В настоящей работе предложена методика определения коэффициента оптической тензочувствительности с высокой точностью для конкретной партии волокна с брэгговскими решетками. Это достигается за счет предложенных прямых высокоточных деформационных экспериментов и статистической обработки результатов измерений.

2. МЕТОДИКА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, РЕЗУЛЬТАТЫ

В экспериментальном исследовании участвовали ВБР, записанные методом фазовой маски на волокне производства ПАО ПНППК, Россия. Опрос показаний проводился при помощи анализатора сигналов волоконно-оптических датчиков ASTRO A313 (АСВОД, интерогатор) с абсолютной погрешностью определения длины волны в пределах ± 2 пм.

Для реализации одноосного деформирования ВБР на заданный уровень использовался стенд, структурная схема которого представлены на рис. 1. На сотовой столешнице размещены два нанопозиционера NewPort 2 с пневматическими зажимами 1. В пневмозажимы помещается оптическое волокно с ВБР 3 с небольшим предварительным натяжением (нулевая длина волны 1559.9 нм, изменение длины волны ВБР от преднатяжения – от 0.1 до 0.3 нм). Еще одна ВБР 4 для температурной компенсации, аналогично первой, натянута и приклеена

на неподвижные части нанопозиционеров. База измерения деформации (расстояние между пневмозажимами) составляет 1200 мм. Деформация волокна задается с помощью перемещения позиционеров на соответствующую величину ΔL . Высокая точность задаваемой деформации на ВБР достигается за счет прецизионного задания перемещения при помощи позиционеров и большой длины деформируемого участка волокна с ВБР.

Испытание проводилось при нормальных климатических условиях в температурном диапазоне от 17 до 27 °С. Вся экспериментальная установка вместе с двумя ВБР закрыта чехлом и находится в состоянии термодинамического равновесия. В рамках описанной методики изменение длины волны деформационной ВБР, вызванное изменением температуры, исключается за счет вычета из показаний деформационной ВБР показаний компенсационной ВБР. При этом на компенсационную ВБР оказывает деформационное воздействие только температурное поле, которое одинаковым образом воздействует на деформационную ВБР. Такая схема температурной компенсации с учетом идентичных теплофизических свойств ВБР исключает влияние любой температурной нестабильности на показания измерений деформационной ВБР от заданного механического деформационного воздействия.

Рис. 1. Схема установки по определению коэффициента оптической тензочувствительности

Перед основным испытанием осуществляются три цикла тренировочной нагрузки до деформации 3300 мкм/м. Затем проводятся измерительные циклы, в которых деформация волокна задается ступенчато от 0 до 3000 мкм/м и обратно с шагом 500 мкм/м. Выдержка на каждой ступени составляет 60 с. Значения длин волн ВБР на каждой ступени нагрузки усреднялись по последним 40 с. По полученным значениям длин волн для каждого цикла методом наименьших квадратов определялся коэффициент оптической тензочувствительности.

После проведения 30 циклов нагрузки ВБР снималась и повторно устанавливалась в пневмозажимы, после чего продолжались измерительные циклы до достижения суммарного количества 900 циклов. Таким образом, совокупность получаемых значений коэффициентов k обеспечила возможность определения математического ожидания этой величины $k = (0.7983 \pm 0.0029)$ с доверительным интервалом.

Такой результат был обеспечен большим объемом выборки измерений на одной ВБР. Статистическое распределение плотности значений коэффициента k представлено на рис. 2.

Рис. 2. Плотность распределения значений коэффициента k

3. ВЕРИФИКАЦИЯ ПОЛУЧЕННОГО КОЭФФИЦИЕНТА МЕТОДОМ ЧЕТЫРЕХТОЧЕЧНОГО ИЗГИБА

Верификация полученного коэффициента тензочувствительности была осуществлена по результатам испытаний на четырехточечный изгиб (рис. 3). ВБР по всей длине приклеивались на металлическую балку из сплава В95. Балка с датчиками 1 помещалась в установку четырехточечного изгиба. Деформация балки 1 задавалась перемещением нижних опор 2, верхние опоры 3 оставались неподвижными. Прогиб балки определялся измерителем линейных перемещений ЛИР-14 4, установленным в опорную скобу 5. Соответствие деформации ε на поверхности и прогиба балки f вычислялось по формуле

$$\varepsilon = \frac{f \cdot L^2}{4h},$$

где ε – деформация на поверхности балки, f – прогиб балки, L – расстояние между опорами скобы, h – толщина балки. В рассмотренном эксперименте $h = 7.772$ мм, $L = 179.6$ мм. Абсолютная погрешность измерения измерителя линейных перемещений находится в пределах ± 0.5 мкм, что обеспечивает необходимую точность определения деформации на поверхности.

Рис. 3. Концептуальная схема установки на четырехточечный изгиб

Вначале проводилось тренировочное нагружение до деформации 5100 мкм/м, затем устанавливалась предварительная деформация величиной 100 мкм/м. Это значение принималось как начальное. Измерительный цикл состоял из ступенчатой нагрузки до деформации 5000 мкм/м с шагом 500 мкм/м и выдержкой в течение 10 с на каждом этапе нагружения. Для испытания как при положительной, так и при отрицательной деформации балка переворачивалась.

Результаты измерения деформации с помощью ВБР сравнивались с деформацией, задаваемой на поверхности балки. Полученная на основании испытаний более чем 50 ВБР приведенная погрешность не превышает 1% в диапазоне от –5000 до +5000 мкм/м.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокая точность определения коэффициента оптической тензочувствительности может быть обеспечена за счет высокоточного экспериментального оборудования и возможности формирования большой статистической выборки экспериментальных данных, обеспечивающих достоверность полученных значений определяемого коэффициента. Простота проведения эксперимента позволяет проводить контроль каждой партии оптического волокна при необходимости.

Достоинства предлагаемого подхода:

- непосредственное деформирование оптического волокна с ВБР с большой точностью за счет использования нанопозиционеров и большого отрезка деформируемого волокна с ВБР; отсутствует необходимость приклеивания ВБР на деформируемую поверхность;
- возможность автоматизации циклического режима деформирования ВБР при помощи программирования контролера нанопозиционеров; это обеспечило автоматизацию формирования большой базы статистической совокупности экспериментальных данных, обеспечивающих достоверность и точность коэффициента оптической тензочувствительности.

Следует отметить, что альтернативой предлагаемому подходу определения коэффициента оптической тензочувствительности ВБР является метод четырехточечного изгиба, приведенный в стандарте ИЕС61757-1-1. Однако этот метод является достаточно трудоемким для формирования большой базы экспериментальных данных. В работе на основе данного метода были проведены единичные тестовые испытания, результаты которых подтвердили достоверность полученных значений коэффициента тензочувствительности и установили возможность использования их для отрицательных деформаций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00108-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варжель С.В.* Волоконные брэгговские решетки. Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2015.
2. *Sahota J. K., Gupta N., Dhawan D.* Opt. Engin. 2020. V. 59. № 6. P. 060901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.59.6.060901>
3. *Othonos A.* Rev. Sci. Instrum. 1997. V. 68. № 12. P. 4309. <https://doi.org/10.1063/1.1148392>
4. *Kreuzer M.* Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors. Germany, Darmstadt: HBM GmbH, 2006. <https://www.ae.metu.edu.tr/seminar/strain-gage/FBG.pdf>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема установки по определению коэффициента оптической тензочувствительности:

1 – пневматические зажимы, 2 – нанопозиционеры, 3 – деформационная ВБР, 4 – термокомпенсационная ВБР

Рис. 2. Плотность распределения значений коэффициента k .

Рис. 3. Концептуальная схема установки на четырехточечный изгиб: 1 – балка с датчиками, 2 – нижние опоры, 3 – верхние опоры, 4 – измеритель линейных перемещений, 5 – опорная скоба

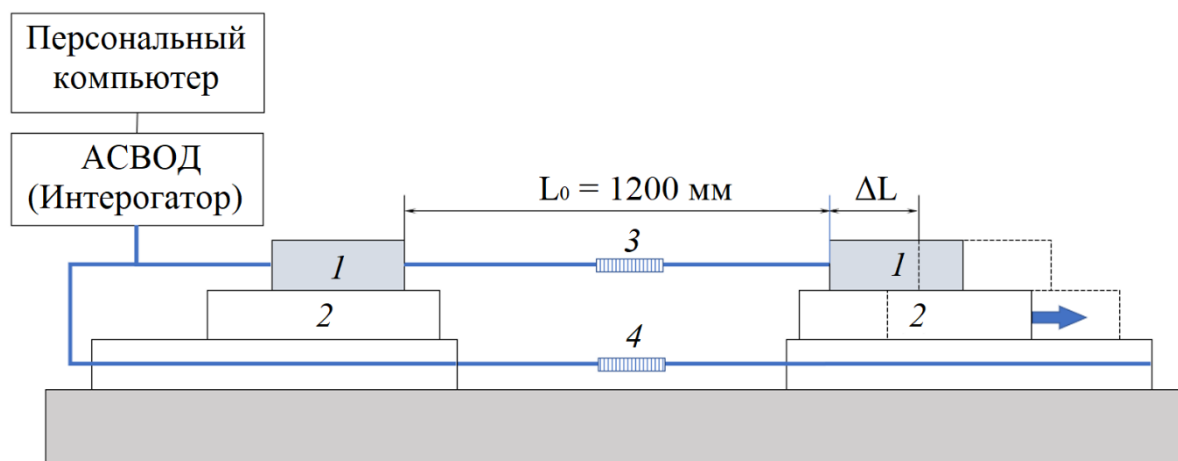


Рис.1.

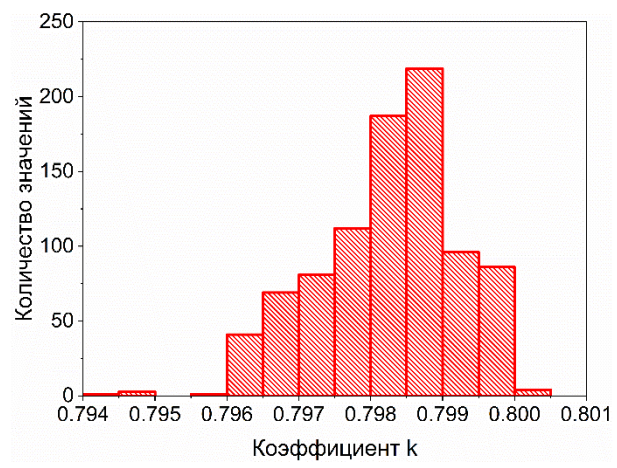


Рис. 2.

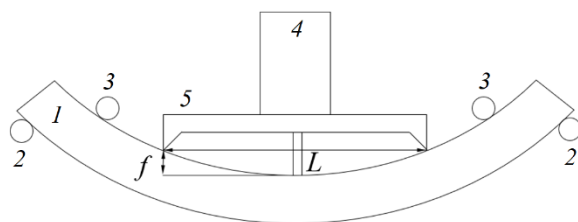


Рис. 3.