

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ

УДК 681.7.068

Информационно-измерительная система мониторинга изделий космической техники

А. С. Щевелев¹, В. В. Кикот, А. Ю. Удалов

¹к. т. н., АО «Научно-исследовательский институт физических измерений»

e-mail: persivald87@gmail.com, inbox@post.su, udaaleksandr@rambler.ru

Аннотация. В работе обоснован выбор волоконно-оптических средств измерений для изделий космической техники. Установлено, что разработанная информационно-измерительная система мониторинга отвечает требованиям, предъявляемым к системам, эксплуатируемым в специальных условиях ракетно-космической техники, и объектам наземной космической инфраструктуры. Целью являлось исследование волоконно-оптической информационно-измерительной системы мониторинга на предмет определения метрологических характеристик и дальнейшей оценки эффективности системы.

Разработанная измерительная система содержит оптические волокна с чувствительными элементами для измерения деформации и температуры в виде волоконных брэгговских решеток, сформированных в сердцевине оптических волокон. Показания температуры и деформации определялись смещением резонансных длин волн волоконных брэгговских решеток, при помощи встроенного спектроанализатора. Результаты экспериментальных исследований показали, что чувствительность ВБР составила 11,2 пм/°С для положительного диапазона (от 25 до 300 °С) и 9,1 пм/°С — для отрицательного диапазона температур (от –80 до 25 °С). Деформационный коэффициент ВБР в диапазоне до 1200 мкм/м (0,012ε) составил $K = 0,6 \pm 0,3 [1/\mu\epsilon]$. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало незначительные расхождения, что свидетельствует о правильности выбранного конструктивно-технологического решения и эффективности разработанной информационно-измерительной системы.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, информационно-измерительная система мониторинга, измерительный функциональный модуль, чувствительность

The Information-Measuring System for Space Technology Monitoring

A. S. Shchevelev¹, V. V. Kikot, A. Yu. Udalov

¹candidate of engineering science, Joint-Stock Company “Research institute of physical measurements”

e-mail: persivald87@gmail.com, inbox@post.su, udaaleksandr@rambler.ru

Abstract. The purpose of the research was to validate the choice of fiber-optic measuring instruments for space technology. It is shown that the information-measuring system meets the requirements of the system being operated in the special conditions of rocket and space engineering and of the objects of the ground space infrastructure. In addition, the task was to research the fiber-optic information-measuring system to determine the metrological characteristics and further evaluation of the system efficiency.

The developed information-measuring system includes a fiber-optic strain and temperature sensors.

The sensing tip of the fiber forms fiber bragg gratings (FBG). The temperature and strain readings are obtained by measuring the shift of the resonance FBG wavelength by the built-in spectrum analyzer. The results of the study showed that the sensitivity of the FBG was 11,2 pm/°C for the positive range (from 25 to 300 °C) and 9,1 pm/°C — for the negative temperature range (from –80 to 25 °C). The deformation ratio of FBG in the range up to 1200μ ϵ (0,012ε) was $K = 0,6 \pm 0,3 [1/\mu\epsilon]$. The comparison of the calculated and experimental data showed minor discrepancy between the predicted and experimental values, which confirms the correctness of the constructive decision and system efficiency of the developed information-measurement system.

Keywords: fiber Bragg grating, information-measuring system for monitoring, measuring cell, sensitivity

Введение

Определение изменений, происходящих внутри технически сложных объектов, представляет интерес для различных областей техники. Среди волоконно-оптических измерительных систем одними из наиболее распространенных типов являются системы на основе датчиков с брэгговскими решетками.

Датчики с брэгговскими решетками, как и прочие волоконно-оптические датчики (ВОД), обладают рядом преимуществ, которые выгодно отличают их от датчиков, построенных на других физических принципах. Основными из них являются: малая масса и габариты чувствительных элементов, обусловленные малым диаметром самого оптического волновода (~ 100 мкм); высокая надежность и воспроизводимость измерений, обусловленные стабильностью используемых методов регистрации оптического излучения, в том числе применением спектральных методов; высокая пожаробезопасность, обусловленная отсутствием в конструкциях чувствительных элементов электрических токов и нагреваемых областей, а также возможностью использования негорючих веществ; высокая электроизоляционная прочность — напряжение электрического пробоя кварцевого стекла, составляет ~ 10 кВ/мм (20°C) и $\sim 2,5$ кВ/мм (500°C); возможность проведения многоточечных и распределенных измерений, в том числе с использованием спектрального и пространственного мультиплексирования чувствительных элементов, расположенных в одном или в нескольких оптических волокнах.

Чувствительным элементом ВОД, на основе которых построена разработанная информационно-измерительная система, является волоконная брэгговская решетка (ВБР). Она сформирована на оптическом волокне и имеет длину всего несколько миллиметров. Такие размеры очень близки к размерам точечных датчиков, однако если массив датчиков с ВБР сформирован на разных длинах волн и демодулирован системой с временным разделением, общее количество таких датчиков на одном волокне ограничено лишь шириной спектра источника и приемника излучения. На одном волокне может быть сформировано до сотни чувствитель-

ных элементов с ВБР, необходимых для построения распределенной системы, предназначенной для измерения как деформаций, так и температур.

Практически не существует ни одного объекта контроля или производственного процесса, который не испытывал бы воздействие деформационных и температурных нагрузок. В этой связи разработанная система особенно важна и актуальна в области мониторинга изделий космической техники.

Принцип работы преобразователей с ВБР

В рамках работы ОКР в ОАО «НИИФИ» ведется разработка распределенных микрооптоэлектромеханических измерительных и функциональных модулей, обеспечивающих измерение температуры и деформации базовых несущих конструкций изделий ракетно-космической техники и объектов наземной космической инфраструктуры (ИФМОТ и ИФМОД).

Конструкция, методы формирования и базовые принципы работы волоконных брэгговских решеток описаны в [1–3]. Наиболее важное свойство волоконных брэгговских решеток — узкополосное отражение оптического излучения, относительная спектральная ширина которого может составлять 10^{-6} и меньше. Излучение, распространяющееся по оптическому волокну, можно представить в виде комбинации его собственных мод: направляемых и излучательных. В отсутствие возмущений в оптическом волокне моды распространяются без взаимодействия друг с другом.

Структура ВБР выбирается таким образом, чтобы обеспечить необходимое резонансное взаимодействие между выбранными модами оптоволоконна. Взаимодействие мод в оптоволоконне обычно описывается с помощью теории связанных мод [2], в рамках которой предполагается, что на определенной длине волны только две моды удовлетворяют условию фазового синхронизма и могут эффективно передавать друг другу энергию. Волоконные брэгговские решетки связывают основную моду оптоволоконна с модой, распространяющейся в противоположном направлении. Две моды

взаимодействуют на однородной решетке показателя преломления, то есть на структуре, в которой показатель преломления периодически изменяется с постоянным периодом Λ , если выполняется условие фазового синхронизма

$$\beta_2 - \beta_1 = 2\pi N/\Lambda, \quad (1)$$

где β_1 и β_2 — постоянные распространения рассматриваемых мод, N — целое число, характеризующее порядок, в котором реализуется межмодовое взаимодействие. Постоянная распространения моды выражается соотношением

$$\beta_i = 2\pi n_{\text{eff}}^i/\lambda, \quad (2)$$

где n_{eff}^i — эффективный показатель преломления i -й моды, λ — длина волны в вакууме.

На рис. 1 приведены типы межмодовой связи для $N = 1$. По вертикальной оси отложен эффективный показатель преломления мод ОВ, причем n_{co} , n_{cl} и n_{ext} — показатели преломления сердцевинки, оболочки и внешней среды соответственно. Положительное и отрицательное направления вертикальной оси характеризуют моды оптического волокна, распространяющиеся по отношению к исходной основной моде HE_{11} в прямом и обратном направлениях. Схематически показаны дисперсионные кривые для мод сердцевинки ($n_{\text{ext}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{co}}$) и оболочки ($n_{\text{ext}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{cl}}$). Заштрихованная область отвечает излучательным модам ОВ. Пунктирными линиями 1 и 2 показаны значения $n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \lambda/\Lambda$ для решеток с малым $\Lambda_{\text{BG}} \leq 1$ мкм и большим (длиннопериодные волоконные решетки) $\Lambda_{\text{LPG}} \geq 100$ мкм периодами соответственно ($n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ — эффективный показатель преломления основной моды).

Пересечения кривых с дисперсионными кривыми различных мод задают длины волн, на которых выполняется условие фазового синхронизма (1)

$$\lambda_{\text{BG}} = 2n_{\text{eff}}^{\text{co}}\Lambda_{\text{BG}}. \quad (3)$$

Свойства этого отражения зависят от параметров решетки. Для однородной решетки длины L коэффициент отражения R на резонансной длине волны λ_{BG} выражается как $R = th^2(\kappa_{\text{BG}}L)$, где $\kappa_{\text{BG}} = \pi\Delta n_{\text{mod}}\eta_{\text{BG}}/\lambda_{\text{BG}}$ — коэффициент связи, Δn_{mod} — амплитуда модуляции в первом порядке разложения формы штриха в ряд Фурье, часть

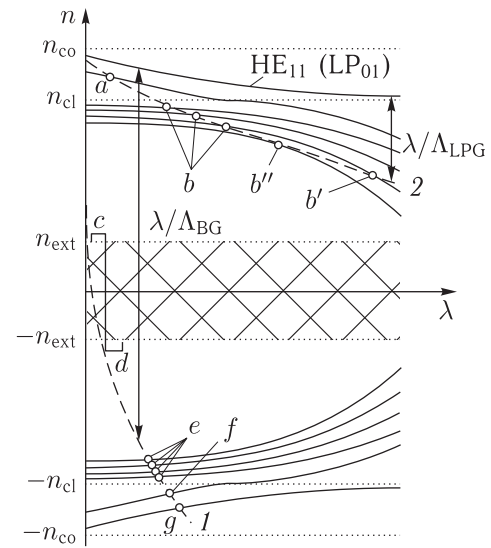


Рис. 1. Диаграмма, демонстрирующая выполнение условия фазового синхронизма между основной модой HE_{11} (LP_{01}) и другими модами оптического волокна

мощности основной моды, которая распространяется по сердцевине оптоволокна радиуса a , E_{co} — амплитуда электрического поля основной моды.

Зависимость брэгговской длины волны от перепада температуры ΔT может быть записана в виде:

$$\Delta\lambda_{\text{BG}} = \lambda_{\text{BG}}(\zeta + \alpha)\Delta T, \quad (4)$$

где $\alpha = \left(\frac{1}{\Lambda}\right)\left(\frac{\partial\Lambda}{\partial T}\right)$ — это термический коэффициент ($0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); $\zeta = \left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)$ — термооптический коэффициент ($8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) для кварцевой сердцевинки оптоволокна с легированием германием.

Для одновременного измерения деформации, при условии, что температурные коэффициенты для них существенно отличаются друг от друга, система уравнений

$$\begin{pmatrix} d\lambda_{\text{BG}}^1/\lambda_{\text{BG}}^1 \\ d\lambda_{\text{BG}}^2/\lambda_{\text{BG}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_\varepsilon^{01} & K_T^{01} \\ K_\varepsilon^{02} & K_T^{02} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\varepsilon \\ dT \end{pmatrix} = \bar{K} \begin{pmatrix} d\varepsilon \\ dT \end{pmatrix} \quad (5)$$

имеет отличный от нуля детерминант ($\det(\bar{K}) \neq 0$) и может быть решена аналитически относительно $d\varepsilon$ и dT :

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon \\ dT \end{pmatrix} = \bar{K}^{-1} \begin{pmatrix} d\lambda_{\text{BG}}^1/\lambda_{\text{BG}}^1 \\ d\lambda_{\text{BG}}^2/\lambda_{\text{BG}}^2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

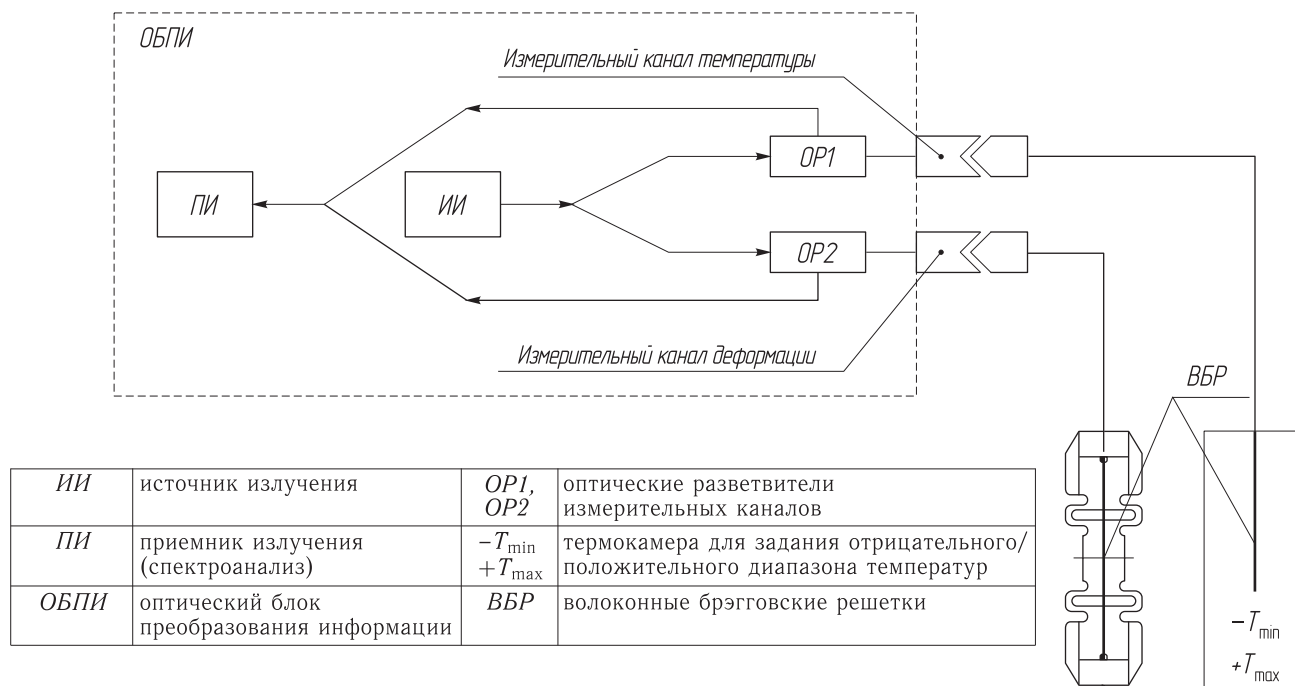


Рис. 2. Структурная схема информационно-измерительной системы

Таким образом, при использовании двух ВБР (для измерения температуры и деформации) задача сводится к тому, чтобы спектральный отклик решеток был различным при изменении температуры или при приложении деформации (силы сжатия/растяжения), величину которой требуется измерить.

Экспериментальные исследования

Структурная схема измерительной системы мониторинга представлена на рис. 2.

Источник излучения формирует световой поток с длиной волны в диапазоне 1550–1590 нм, который распространяется по оптоволокну. В качестве приемника излучения используется спектроанализатор, необходимый для отображения и исследования спектров отражения брэгговских длин волн λ_{BG} . Измерение спектров отражения проводилось на брэгговской длине волны $1550 \pm 0,5$ нм (для измерения температуры) и $1538 \pm 0,5$ нм (для измерения деформации) с коэффициентом отражения 70%, в нормальных климатических условиях.

Проведены экспериментальные исследования на воздействие повышенной температуры в интер-

вале от 25 до 300 °С, пониженной температуры от –80 до +25 °С (рис. 3 и 4). При воздействии повышенной и пониженной температуры наблюдается смещение брэгговской длины волны в сторону увеличения и уменьшения соответственно. Нагрузка также приводит к смещению брэгговской длины волны измерительного функционального оптического модуля деформации.

Зависимости $\Delta\lambda_1 = f(T_{\max})$ и $\lambda_{BG1} = f(T_{\max})$ имеют линейный характер во всем температурном диапазоне (рис. 3). Согласно выражению (4) чувствительность составила 11,9 пм/°С. Анализ экспериментальной зависимости $\lambda_{BG1} = f(T_{\max})$ показал, что чувствительность модуля в положительном диапазоне составляет 11,2 пм/°С. Расходимость экспериментальных и расчетных данных — незначительная. Так же, как и в случае повышенных температур, зависимости $\Delta\lambda_1 = f(T_{\min})$ и $\lambda_{BG1} = f(T_{\min})$ имеют линейный характер в отрицательном температурном диапазоне (рис. 4). Теоретически, согласно выражению (4), чувствительность составила 11,9 пм/°С. Анализ экспериментальной зависимости и $\lambda_{BG1} = f(T_{\min})$ показал, что чувствительность датчика в отрицательном диапазоне составляет 9,1 пм/°С.

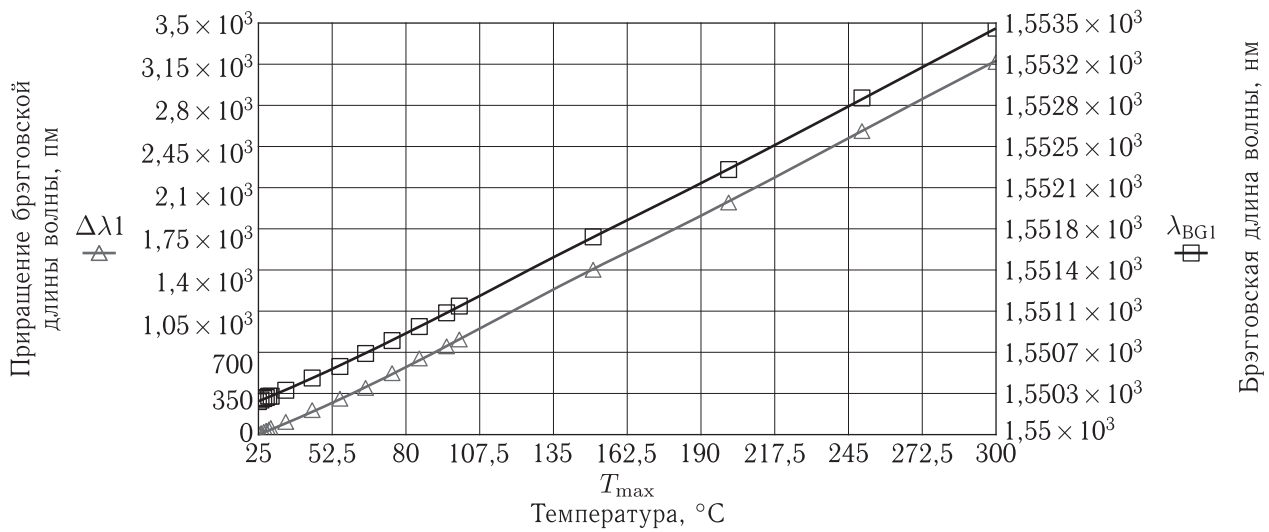


Рис. 3. Функциональная зависимость смещения брэгговской длины волны $\Delta\lambda_{BG1}$ от температуры в положительном диапазоне

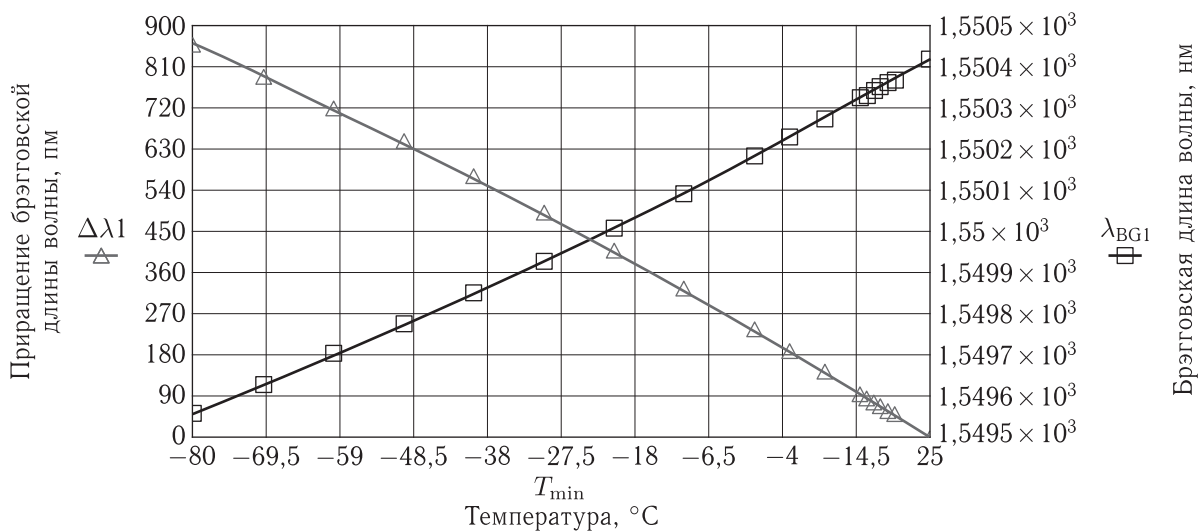


Рис. 4. Функциональная зависимость смещения брэгговской длины волны $\Delta\lambda_{BG1}$ от температуры в отрицательном диапазоне

Измерение деформации представляет определенную сложность, т.к. требует высокой стабильности узлов фиксации измерительной части оптического волокна в процессе измерений. На рис. 5 приведена зависимость относительного изменения длины волны $\Delta\lambda_{BG2}$ от приложенной к оптическому волокну деформации, измеренная при нормальных климатических условиях.

Экспериментальное значение коэффициента деформации $K = 0,6 \pm 0,3 [1/\mu\epsilon]$ ($K\epsilon = 0,800 \pm$

$\pm 0,003 [ppm/\mu\epsilon]$) превышает значение коэффициента деформации, полученного при имитационном моделировании $K\epsilon = \frac{d\lambda_{BG2}/\lambda_{BG2}}{d\epsilon} = 0,78 [ppm/\mu\epsilon]$.

Выводы

Исследования показали, что функции преобразования $\lambda_{BG1} = f(T_{max})$ и $\lambda_{BG1} = f(T_{min})$ имеют линейный характер. Чувствительность ИФМОТ

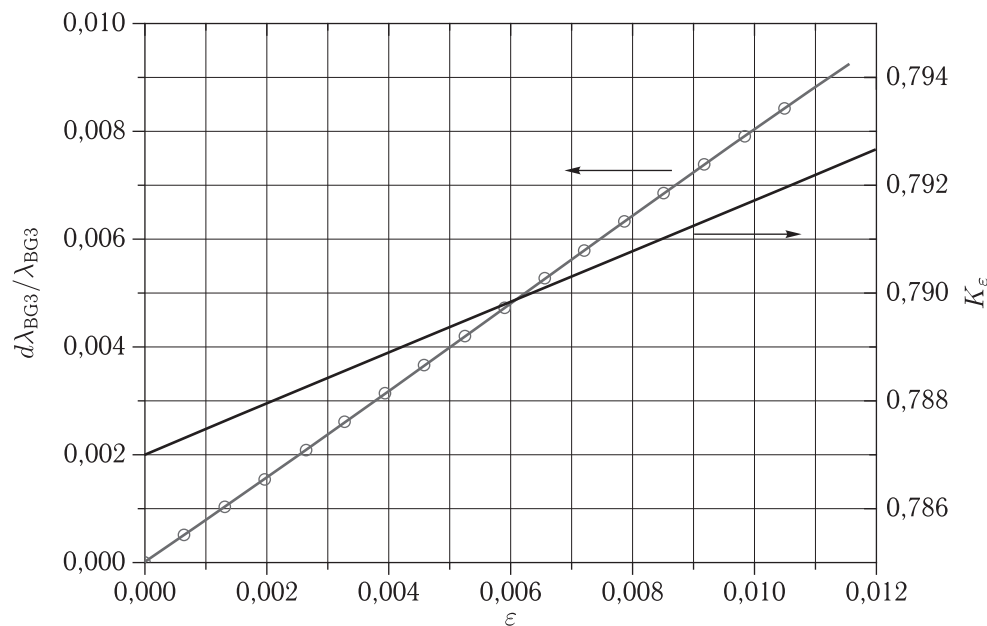


Рис. 5. Зависимость относительного изменения брэгговской длины волны $\Delta\lambda_{BG2}$

составила 11,2 пм/°С для положительного диапазона и 9,1 пм/°С — для отрицательного диапазона температур. Для ИФМОД деформационный коэффициент составил $K = 0,6 \pm 0,3$ [1/με].

Сравнением показателей, полученных при имитационном моделировании и экспериментальных исследованиях, выявлена их практическая полная сходимость, что подтверждает эффективность разработанной информационно-измерительной системы.

Список литературы

1. Кульчин Ю. Н. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 272 с.
2. Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation. Eds. Cusano A., Cutolo A. and Albert J. Bentham Science Publishers, 2011.
3. *Bragg Gratings*. Photosensitivity, and Poling in Glass Fibers and Waveguides: Applications and Fundamentals (BGPP).
4. *Kashyap R.* Fiber Bragg Gratings (Academic Press, 1999).
5. *Shu X., Allsop T., Gwandu B., Zhang L., Bennion I.* High-temperature sensitivity of long-period gratings in B-Ge Codoped fiber // IEEE Phot. Lett., 2001, vol. 13, № 8. P. 818–820.
6. *Васильев С.А., Дианов Е.М., Медведков О.И., Протопопов В.Н., Костантини Д.М., Иокко А., Лимбергер Х.Г., Салате Р.П.* // Квантовая электроника, 1999, 26, 65.