



УДК 681.787

ПОДСТРОЙКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИСТОЧНИКА ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ БРЕГГОВСКИХ РЕШЕТОК

А.С. Алейник^а, А.Ю. Киреев^а, М.В. Мехреньгин^а, М.А. Чиргин^а, М.Н. Беликин^а^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: artemal@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 06.04.15, принята к печати 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-809-816

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Алейник А.С., Киреев А.Ю., Мехреньгин М.В., Чиргин М.А., Беликин М.Н. Подстройка центральной длины волны источника оптического излучения в интерферометрических датчиках на основе волоконных брегговских решеток // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 5. С. 809–816.

Аннотация

Исследован волоконно-оптический интерферометрический датчик на основе массива волоконных решеток Брэгга. Описан механизм смещения спектра отражения волоконной решетки Брэгга в результате внешних воздействий температуры и статического давления. Экспериментально показано, что смещение спектров отражения решеток Брэгга приводит к уменьшению видности интерференционной картины. Предложен метод подстройки центральной длины волны источника оптического излучения в соответствии с текущими спектрами отражения решеток Брэгга, основанный на широтно-импульсной модуляции управляющего сигнала контроллера элемента Пельтье. В качестве источника оптического излучения использован полупроводниковый поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором, управляемый драйвером накачки. Метод реализован с помощью контроллера элемента Пельтье, регулирующего и стабилизирующего температуру источника оптического излучения, и программируемой логической интегральной схемы, управляющей контроллером элемента Пельтье. Экспериментально показано, что предложенный метод позволил регулировать температуру источника оптического излучения с шагом 0,05 К и подстраивать центральную длину волны источника оптического излучения с шагом 0,005 нм. Результаты экспериментов показали, что подстройка центральной длины волны излучения с шагом 0,005 нм позволяет обеспечить работоспособность массива из четырех волоконно-оптических датчиков на основе волоконных решеток Брэгга, сформированных в одном оптическом волокне, при изменении температуры решеток Брэгга от 0 °С до 300 °С и при механическом растяжении оптического волокна силой до 2 Н.

Ключевые слова

волоконно-оптический интерферометрический датчик, волоконная решетка Брэгга, поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором.

Благодарности

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 02.G25.31.0044).

CENTRAL WAVELENGTH ADJUSTMENT OF LIGHT EMITTING SOURCE IN INTERFEROMETRIC SENSORS BASED ON FIBER-OPTIC BRAGG GRATINGS

A.S. Aleynik^а, A.Yu. Kireenkov^а, M.V. Mekhrehngin^а, M.A. Chirgin^а, M.N. Belikin^а^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: artemal@rambler.ru

Article info

Received 06.04.15, accepted 18.06.15

doi:10.17586/2226-1494-2015-15-5-809-816

Article in Russian

For citation: Aleynik A.S., Kireenkova A.Yu., Mekhrehngin M.V., Chirgin M.A., Belikin M.N. Central wavelength adjustment of light emitting source in interferometric sensors based on fiber-optic Bragg gratings. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2015, vol. 15, no. 5, pp. 809–816.

Abstract

The paper is focused on the investigation of fiber-optic interferometric sensor based on the array of fiber Bragg gratings. Reflection spectra displacement mechanism of the fiber Bragg gratings under the external temperature effects and the static pressure is described. The experiment has shown that reflection spectra displacement of Bragg gratings reduces the visibility of the interference pattern. A method of center wavelength adjustment is proposed for the optical radiation source in accord-

ance with the current Bragg gratings reflection spectra based on the impulse relative modulation of control signal for the Peltier element controller. The semiconductor vertical-cavity surface-emitting laser controlled by a pump driver is used as a light source. The method is implemented by the Peltier element controller regulating and stabilizing the light source temperature, and a programmable logic-integrated circuit monitoring the Peltier element controller. The experiment has proved that the proposed method rendered possible to regulate the light source temperature at a pitch of 0.05 K and adjust the optical radiation source center wavelength at a pitch of 0.05 nm. Experimental results have revealed that the central wavelength of the radiation adjustment at a pitch of 0.005 nm gives the possibility for the capacity of the array consisting of four optical-fiber sensors based on the fiber Bragg gratings. They are formed in one optical fiber under the Bragg grating temperature change from 0° C to 300° C and by the optical fiber mechanical stretching by the force up to 2 N.

Keywords

interferometric fiber-optic sensor, fiber Bragg grating, vertical-cavity surface-emitting laser.

Acknowledgements

This work was carried out in ITMO University under financial support by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No 02.G25.31.0044).

Введение

В настоящее время гидроакустические системы на основе волоконно-оптических интерферометрических датчиков получают все большее распространение [1, 2]. Рост популярности обеспечен преимуществами волоконно-оптических интерферометрических датчиков над традиционными пьезокерамическими. Волоконно-оптические датчики обладают высокой чувствительностью, малыми массогабаритными параметрами, высокой устойчивостью к электромагнитным помехам и низкой стоимостью [3]. Основным преимуществом волоконно-оптических интерферометрических датчиков является возможность мультиплексирования большого количества чувствительных элементов на одном волокне, что позволяет создавать протяженные системы геофизической разведки, системы охраны портов и др. [4–6].

Наиболее простой и надежной конструкцией измерительной системы, пригодной для мультиплексирования чувствительных элементов, является волоконно-оптический интерферометрический датчик на основе волоконных решеток Брэгга (ВБР) [3].

ВБР подвержены таким воздействиям окружающей среды, как статическое давление, механическое растяжение и сжатие, а также изменение температуры волокна, в котором они записаны. Как следствие, изменяются геометрические размеры волокна и период ВБР, что приводит к смещению спектра ее отражения от исходного значения.

Цель работы – обеспечить работоспособность массива волоконно-оптических интерферометрических датчиков на основе ВБР за счет точной подстройки центральной длины волны источника оптического излучения в соответствии с спектрами отражения ВБР.

Описание схемы

На рис. 1 представлена принципиальная схема волоконно-оптического датчика на основе ВБР [7]. Измерительная система состоит из источника оптического излучения (ИОИ), волоконно-оптического циркулятора, массива из четырех чувствительных элементов (ЧЭ) на одном волокне, компенсационного интерферометра (КИ), фазового модулятора (ФМ) и фотоприемного устройства (ФПУ). Чувствительный элемент образован двумя ВБР, записанными в анизотропном оптическом волокне (ОВ) с эллиптической напрягающей оболочкой [8–10].

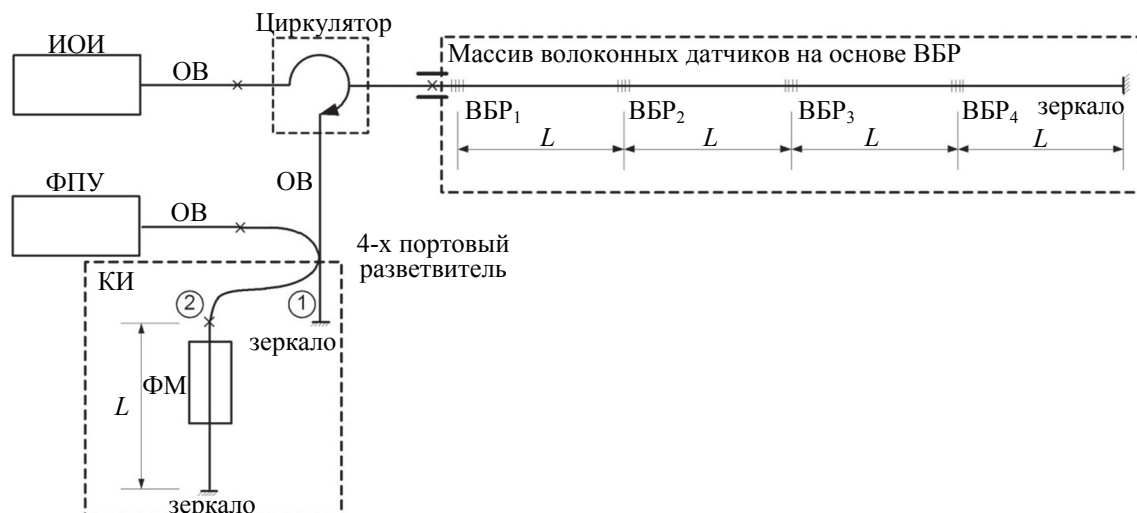


Рис. 1. Принципиальная схема волоконно-оптического интерферометрического датчика на основе волоконных решеток Брэгга. L – расстояние между соседними волоконных решеток Брэгга

Рассмотрим принцип работы измерительной системы на основе одного чувствительного элемента, образованного ВБР₁ и ВБР₂. ИОИ генерирует короткий оптический импульс длительностью несколько десятков наносекунд, который проходит по ОВ через циркулятор, затем попадает на ВБР₁, частично отражается и попадает на ВБР₂, также отражаясь от нее. Отраженные импульсы распространяются в обратном направлении и при прохождении через циркулятор направляются в порт, к которому подключен компенсационный интерферометр. Задержка распространения между этими импульсами равна удвоенному времени распространения оптического излучения между ВБР₁ и ВБР₂. В компенсационном интерферометре каждый отраженный от ВБР импульс делится на два: один импульс распространяется по длинному плечу КИ, другой – по короткому. Разность длин плеч КИ равна расстоянию между ВБР, таким образом, после прохождения КИ импульс от второй ВБР₂, прошедший по короткому плечу КИ, совпадает по времени с импульсом от первой ВБР₁, прошедшему по длинному плечу КИ. На ФПУ приходит группа из трех оптических импульсов, центральный из которых является интерференционным. В случае четырех чувствительных элементов, расположенных на одном оптическом волокне, на циркулятор поступают пять оптических импульсов: четыре импульса, отраженные от ВБР, и один импульс, отраженный от зеркала на торце волокна. После прохождения через КИ на ФПУ попадают шесть импульсов, центральные четыре из которых – интерференционные. Временные диаграммы работы для массива из четырех датчиков представлены на рис. 2 [11].

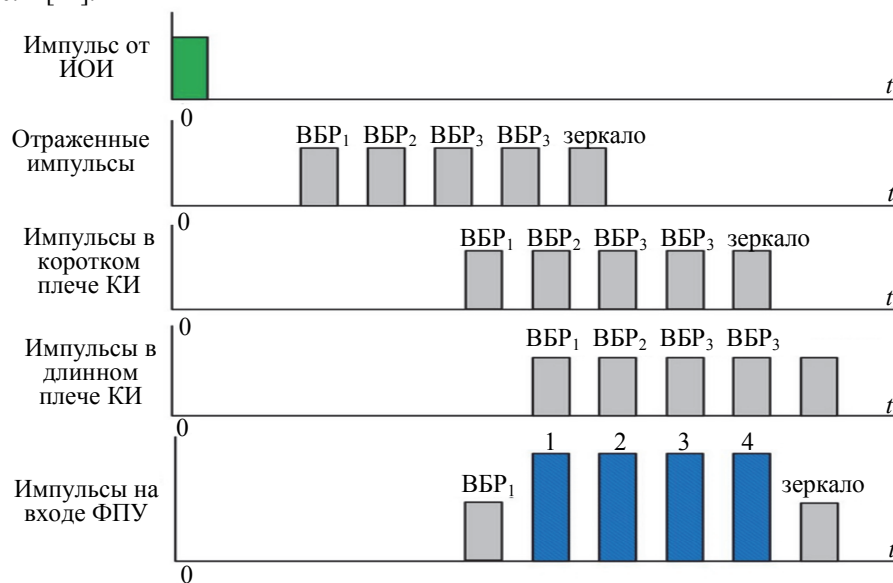


Рис. 2. Временные диаграммы работы волоконно-оптического интерферометрического датчика. Цифрами 1–4 обозначены: 1 – интерференционный импульс от ВБР₂ и ВБР₁; 2 – интерференционный импульс от ВБР₃ и ВБР₂; 3 – интерференционный импульс от ВБР₄ и ВБР₃; 4 – интерференционный импульс от зеркала и ВБР₄

Интерференционный сигнал на фотоприемнике описывается формулой [12]:

$$I(t) = A + B \cos(C \cos(\omega_0 t) + \varphi(t, T, dL) + \varphi_0),$$

где A и B – константы, определяемые интенсивностью светового излучения и видностью интерференционной картины на фотоприемнике; C – глубина фазовой модуляции; $\varphi(t, T, dL)$ – измеряемый фазовый сигнал; ω_0 – частота сигнала модуляции; φ_0 – фаза, обусловленная положением рабочей точки интерферометра; t – время; T – температура; dL – изменение длины датчика.

В качестве источника оптического излучения используется поверхностно-излучающий лазер с вертикальным резонатором (Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL), который генерирует линейно-поляризованное излучение на длине волны 1550 нм. Полупроводниковый кристалл размещен на элементе Пельтье в корпусе типа ТО (Transistor Outline) с волоконным выходом. Элемент Пельтье предназначен для стабилизации и регулировки температуры полупроводникового источника оптического излучения. На рис. 3 представлена зависимость центральной длины волны VCSEL от его температуры. Регулировка длины волны осуществляется в диапазоне от 1544 нм до 1548 нм, диапазон изменения температуры от 4 °С до 39 °С, угол наклона – 9,1 К/нм. Диапазон изменения температуры источника оптического излучения обусловлен техническими условиями эксплуатации.

В работах [13, 14] приводятся результаты исследований сдвига резонансной длины волны спектра отражения ВБР под воздействием температуры и механического растяжения. Резонансная длина волны спектра отражения волоконной решетки Брэгга при изменении температуры от 0 °С до 300 °С сдвигается с 1544 нм до 1548 нм. Растяжение волокна с ВБР силой в 1 Н вызывает сдвиг длины волны брэгговского резонанса на 1,5 нм.

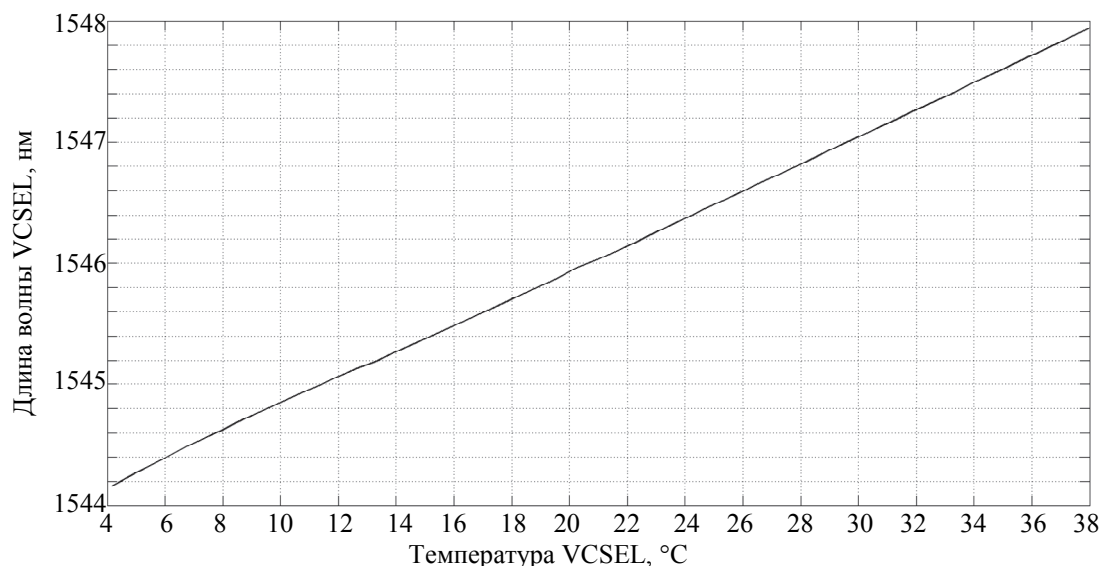


Рис. 3. Экспериментальная зависимость центральной длины волны от температуры

Постановка проблемы

Видность интерференционной картины на входе ФПУ зависит от когерентности источника оптического излучения, рассогласования длин волокон компенсационного интерферометра и чувствительного элемента, соотношения мощностей импульсов, отраженных от первой и второй решеток Брэгга. Мощность каждого из отраженных импульсов зависит от идентичности спектра излучения ИОИ и спектра отражения ВБР. В случае полного соответствия спектров достигается максимальный коэффициент отражения. Под действием температуры и давления ВБР деформируется, что приводит к изменению периода и сдвигу центральной длины волны ВБР. Если деформируется только одна ВБР, то ухудшается видность интерференционной картины, так как интерферируют два импульса с разными мощностями. В итоге размах сигнала на ФПУ при воздействии фазовой модуляции уменьшается, что приводит к снижению соотношения сигнал/шум. Если обе ВБР, составляющие чувствительный элемент, деформируются одновременно, то уменьшается оптическая мощность интерференционного импульса, что также приводит к понижению соотношения сигнал/шум. Для поддержания видности интерференционной картины и оптической мощности на максимальном уровне необходимо осуществлять подстройку длины волны ИОИ в соответствии с текущей центральной длиной волны ВБР.

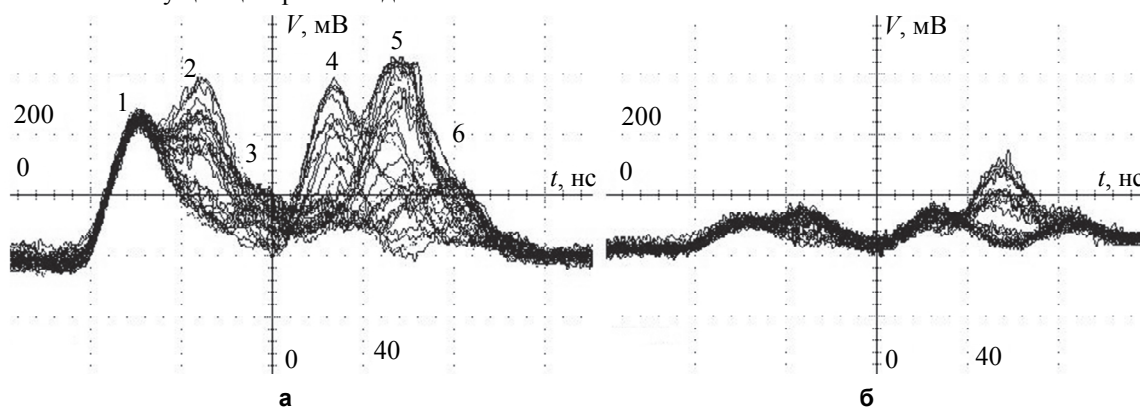


Рис. 4. Осциллограмма интерференционной картины при центральной длине волны источника оптического излучения, не согласованной с текущим состоянием волоконной решетки Брэгга (а).

Цифрами 1–6 обозначены: 1 – импульс, отраженный от ВБР₁ и прошедший по короткому плечу КИ; 2 – интерференционный импульс от ВБР₂ и ВБР₁; 3 – интерференционный импульс от ВБР₃ и ВБР₂; 4 – интерференционный импульс от ВБР₄ и ВБР₃; 5 – интерференционный импульс от зеркала и ВБР₄; 6 – импульс, отраженный от зеркала и прошедший по длинному плечу КИ.

Осциллограмма интерференционной картины при оптимально подстроенной центральной длине волны источника оптического излучения (б): V – напряжение (мВ), t – время (нс)

На рис. 4, а, показан сигнал с массива из четырех датчиков при подстроенной центральной длине волны ИОИ, где 1 – импульс, отраженный от ВБР₁ и прошедший по короткому плечу КИ; 2–5 – интерференционные импульсы; 6 – импульс, отраженный от зеркала и прошедший по длинному плечу КИ. При деформации и изменении периодов ВБР (рис. 4, б) на ФПУ приходят оптические импульсы меньшей

мощности, что приводит к ухудшению видности интерференционной картины, снижению амплитуды сигнала и понижению соотношения сигнал/шум. Решение проблемы подстройки центральной длины волны ИОИ рассматривается в настоящей работе.

Процесс регулировки температуры источника оптического излучения

Центральная длина волны излучения зависит от температуры VCSEL, что позволяет регулировать длину волны. Известна схема регулировки и стабилизации температуры VCSEL, построенная на основе микросхемы контроллера элемента Пельтье (TEC Controller). Схема регулировки и стабилизации температуры VCSEL приведена на рис. 5.

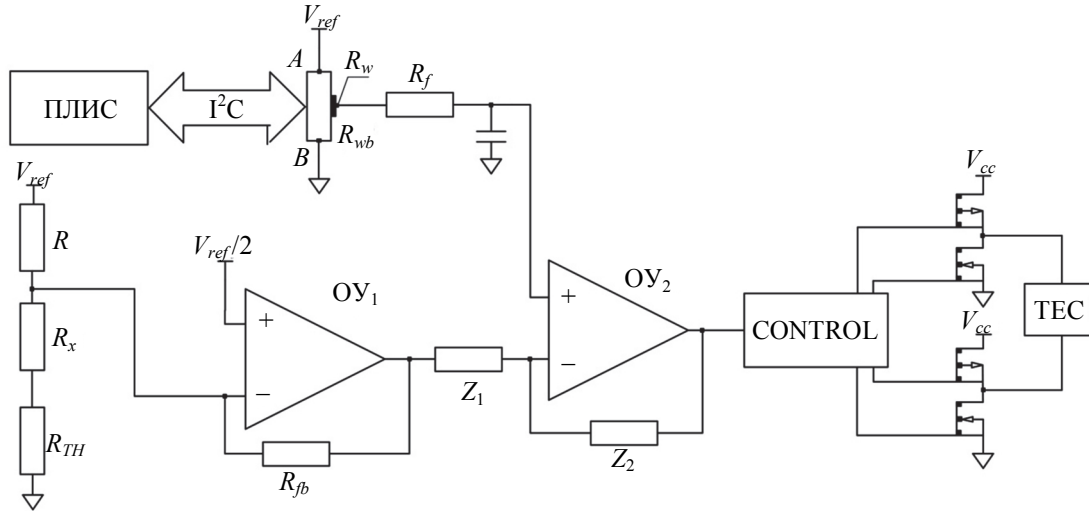


Рис. 5. Схема регулировки и стабилизации температуры VCSEL

На рис. 5 R и R_x – резисторы, формирующие делитель напряжения; $ОУ_1$ и $ОУ_2$ – операционные усилители; R_{wb} – цифровой 128-битный потенциометр; ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема, с помощью которой осуществляется управление процессом регулировки температуры ИОИ; R_{fb} – резистор обратной связи $ОУ_1$; CONTROL – блок контроля, управляющий двумя комплементарными парами транзисторов; R_{TH} и TEC – терморезистор и элемент Пельтье, расположенные в корпусе ИОИ; V_{ref} – опорное напряжение; V_{cc} – напряжение питания транзисторов; Z_1 – сопротивление на входе $ОУ_2$; Z_2 – сопротивление в обратной связи $ОУ_2$; R_f – резистор RC-фильтра; A и B – контакты цифрового потенциометра.

Зависимость сопротивления терморезистора от температуры описывается формулой [15]

$$R_{TH} = R_0 \cdot \exp\left(3930 \cdot \left(\frac{1}{T + 273} - \frac{1}{298}\right)\right). \quad (1)$$

Взаимодействие ПЛИС и цифрового управляемого потенциометра реализуется по интерфейсу I²C. ПЛИС задает сопротивление цифрового потенциометра. Потенциометр включен по схеме делителя напряжения, поэтому изменение его сопротивления приводит к изменению напряжения V_{ts} , подаваемого на вход $ОУ_2$. Формула зависимости V_{ts} от значения сопротивления потенциометра приведена ниже:

$$v_{ts} = v_{ref} \cdot \left(\frac{R_{ab} \cdot D}{128} + 2R_w\right) / R_{ab}, \quad (2)$$

где R_{ab} – максимальное сопротивление цифрового управляемого потенциометра; R_w – сопротивление внутреннего переключателя потенциометра [16]. На вход $ОУ_1$ подается сигнал, зависящий от сопротивления терморезистора – напряжение с делителя $\frac{R_{TH} + R_x}{R_{TH} + R_x + R}$. $ОУ_1$ усиливает сигнал относительно на-

пряжения, равного половине опорного:

$$v_{out1} = \left(\frac{R_{fb}}{R_{TH} + R_x} - \frac{R_{fb}}{R} + 1\right) \times \frac{v_{ref}}{2} \quad (3)$$

Таким образом, выходной сигнал $ОУ_1$ пропорционален температуре VCSEL. Сигнал с выхода $ОУ_1$ подается на инвертирующий вход $ОУ_2$, который сравнивает его с сигналом потенциометра, приходящим на неинвертирующий вход операционного усилителя. $ОУ_2$ реализует классическую схему пропорционально-интегрального регулятора. Выходной сигнал $ОУ_2$ описывается формулой

$$V_{out2} = V_{ts} - \frac{Z_1}{Z_2} (V_{out1} - V_{ts})$$

Сигнал с выхода ОУ₂ подается в блок контроля, управляющий током через элемент Пельтье. Блок контроля управляет двумя комплементарными парами транзисторов, чтобы пропускать ток через элемент Пельтье в двух направлениях. В зависимости от направления протекания тока элемент Пельтье нагревает или охлаждает VCSEL.

Из формул сопротивления терморезистора (1), выходного напряжения потенциометра (2) и выходного напряжения ОУ₁ (3) можно выразить зависимость температуры VCSEL от сопротивления потенциометра:

$$T = \frac{3930 \cdot 298}{298 \cdot \ln\left(\frac{R_{fb}}{\left(\frac{2D}{128} + \frac{4R_W}{R_{ab}} + \frac{R_{fb}}{R} - 1\right) \cdot R_0} - \frac{R_x}{R_0}\right) + 3930} - 273 \quad (4)$$

В приведенной схеме используются следующие номиналы элементов: $R_W=75$ Ом, $R_{fb}=R=17800$ Ом, $R_{ab}=R_0=10$ кОм, $R_x=7680$ Ом. Зависимость температуры VCSEL от кодового значения управляющего цифрового потенциометра D приведена на рис. 6.

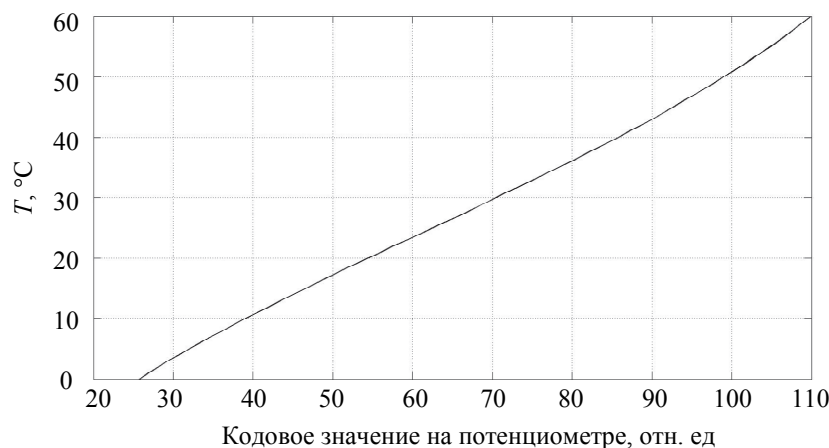


Рис. 6. Расчетная зависимость температуры VCSEL от значения кода на потенциометре

По формуле (4) можно рассчитать шаг подстройки температуры VCSEL при изменении кода, задающего сопротивление потенциометра D на единицу. Например, при $D = 40$ температура VCSEL равна 10,6 °C, при $D = 41$ $T = 11,3$ °C. Следовательно, шаг подстройки температуры ИОИ в схеме с цифровым потенциометром составит 0,7 К. При изменении температуры ИОИ на 0,7 К центральная длина волны сместится на 0,075 нм, а ширина спектра отражения ВБР составляет 0,08 нм [8], что показано на рис. 7.

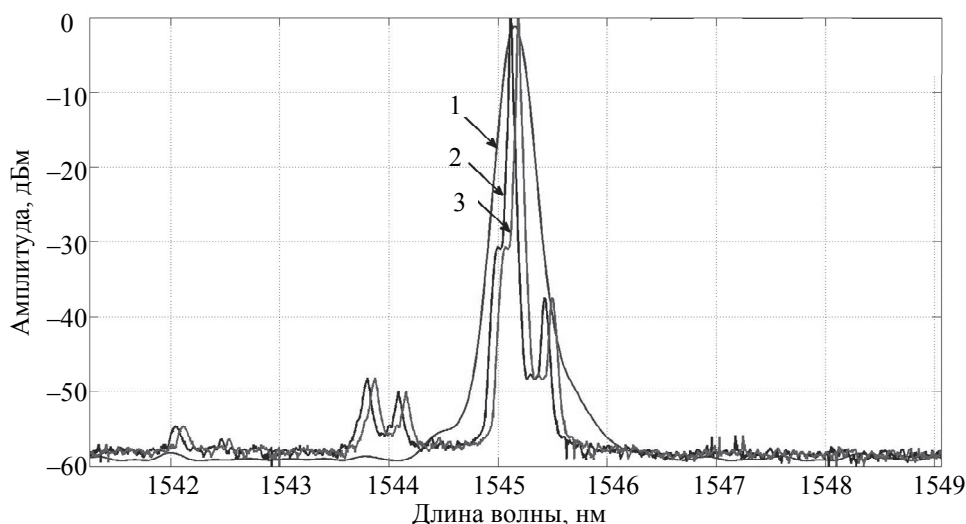


Рис. 7. Наложение спектров ВБР и VCSEL: 1 – спектр ВБР, 2– спектр VCSEL (T_1), 3 – спектр VCSEL ($T_1 + 0,7$ К)

Технология записи массива ВБР на одном волокне не позволяет получать решетки с идентичными спектрами отражения. Центральные длины волн спектров отражения ВБР, как правило, имеют разброс в пределах $\pm 0,1$ нм. При таком соотношении шага подстройки и ширины спектра ВБР сложно согласовать центральную длину волны излучения VCSEL и центральные длины отражения массива ВБР.

Уменьшение шага регулировки температуры источника излучения

Из описания работы алгоритма подстройки и стабилизации температуры VCSEL следует, что минимальный шаг регулировки температуры ограничен разницей между соседними значениями сопротивления на потенциометре. Для уменьшения шага регулировки температуры необходимо периодически изменять значение сопротивления цифрового потенциометра.

Идея заключается в поочередной подаче на цифровой потенциометр цифровых кодов, соответствующих двум соседним значениям сопротивления. В результате напряжение на выходе потенциометра имеет форму меандра. Для преобразования полученного сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ-сигнал) в линейное напряжение использовался RC-фильтр. Максимально возможная частота сигнала составляет 500 Гц и ограничена особенностями интерфейса I²C. Регулировка выходного напряжения осуществляется через изменение скважности ШИМ-сигнала на выходе потенциометра. Выходное напряжение описывается формулой [17]

$$V_{\text{вых}} = (V_{R2} - V_{R1})Q + V_{R1},$$

где Q – скважность ШИМ-сигнала на выходе потенциометра, а V_{R2} и V_{R1} – напряжения на выходе потенциометра при соседних значениях сопротивления R_2 и R_1 .

На рис. 8 представлены сигналы на выходе потенциометра при различных скважностях выходного сигнала напряжения.

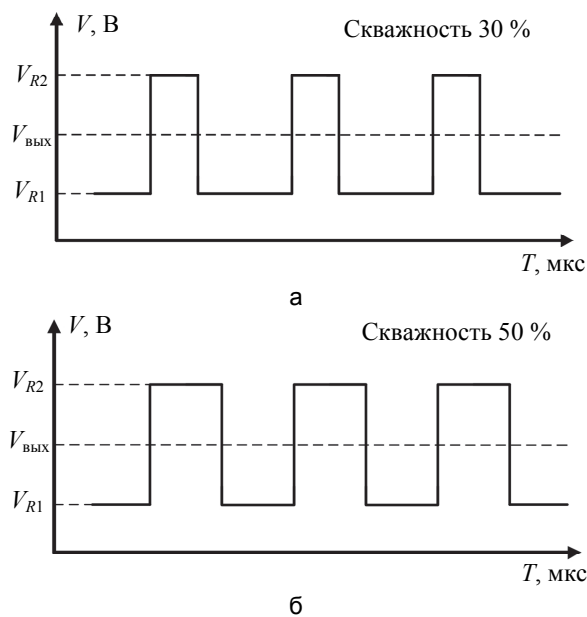


Рис. 8. Напряжение на выходе потенциометра при скважности входного сигнала на потенциометре: 30% (а); 50% (б)

В результате на неинвертирующий вход ОУ₂ в схеме регулировки (рис. 5) поступает постоянное напряжение. Следовательно, регулируя интервалы между подачами двух цифровых кодов на потенциометр, мы можем управлять промежуточным значением напряжения на входе ОУ₂ и соответственно током через ТЕС. Разработанный метод позволяет уменьшить первоначальный шаг подстройки температуры в 15 раз, до 0,05 К.

Заключение

В результате работы предложен и реализован метод программной подстройки центральной длины волны поверхностно-излучающего лазера с вертикальным резонатором. Благодаря программной реализации данного метода подстройки температуры VCSEL удалось уменьшить шаг регулировки температуры полупроводникового источника оптического излучения до 0,05 К. Метод обеспечивает подстройку длины волны источника оптического излучения с шагом 0,005 нм. Это позволило обеспечить работоспособность массива из четырех волоконно-оптических датчиков, сформированных в одном оптическом волокне, на основе решеток Брэгга, при изменении температуры волоконных решеток Брэгга от 0 °С до 300 °С и при механическом растяжении оптического волокна силой до 2 Н.

Литература

1. Cole J.H., Kirkendall C., Dandridge A., Cogdell G., Giallorenzi T.G. Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Naval Research Laboratory // Washington Academy of Sciences. 2004. V. 90. N 3. P. 40–57.

2. Lee B.H., Kim Y.H., Park K.S., Eom J.B., Kim M.J., Rho B.S., Choi H.Y. Interferometric fiber optic sensors // *Sensors*. 2012. V. 12. N 3. P. 2467–2486. doi: 10.3390/s120302467
3. Yin S., Ruffin P.B., Yu F.T.S. *Fiber Optic Sensors*. 2nd ed. CRC Press, 2008. 492 p.
4. Zhang W., Liu Y., Li F. Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity // *Chinese Optics Letters*. 2008. V. 6. N 9. P. 631–633. doi: 10.3788/COL20080609.0631
5. Cusano A., Campopiano S., D'Addio S., Balbi M., Balzarini S., Giordano M., Cutolo A. Optical fiber hydrophone using polymer-coated fiber Bragg grating // *Proc. Optical Fiber Sensors (OFS 2006)*. Cancun, Mexico, 2006.
6. Okawara C., Himamura H., Nakata M., Uchida H. Fiber optic FBG interferometric hydrophone array using TDM and WDM // *Technical Report*. 2006. V. 6936. P. 13.
7. Куликов А.В. Волоконно-оптические акустические сенсоры на брэгговских решетках: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 144 с.
8. Варжель С.В., Куликов А.В., Асеев В.А., Брунов В.С., Калько В.Г., Артеев В.А. Запись узкополосных волоконных отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*. 2011. № 5 (75). С. 27–30.
9. Варжель С.В., Куликов А.В., Мешковский И.К., Стригалева В.Е. Запись брэгговских решеток в двухлучепреломляющем оптическом волокне одиночным 20-нс импульсом эксимерного лазера // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 4. С. 85–88.
10. Becker M., Bruckner S., Lindner E., Rothhardt M., Unger S., Kobelke J., Schuster K., Bartelt H. Fiber Bragg grating inscription with UV femtosecond exposure and two beam interference for fiber laser applications // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2010. V. 7750. Art. 775015–1. doi: 10.1117/12.871009
11. Плотников М.Ю. Волоконно-оптический гидрофон: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 155 с.
12. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. М.: Техносфера, 2008. 520 с.
13. Варжель С.В. Брэгговские дифракционные структуры для волоконно-оптических измерительных систем: дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 154 с.
14. Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В., Забиякин А.Н. Защитные покрытия волоконной решетки брэгга для уменьшения влияния механического воздействия на ее спектральные характеристики // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 2. С. 241–245.
15. Thermoelectric Cooler (TEC) Controller ADN8831 Datasheet. Analog Devices. 20 p.
16. 128-Position I²C Compatible Digital Potentiometer ADN5247 Data Sheet. Analog Devices. 20 p.
17. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.

<i>Алейник Артем Сергеевич</i>	– кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, artemal@rambler.ru
<i>Киреев Александр Юрьевич</i>	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alexkir49@gmail.com
<i>Мехреньгин Михаил Викторович</i>	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mehrengin@gmail.com
<i>Чиргин Максим Александрович</i>	– студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ll1o@mail.ru
<i>Беликин Михаил Николаевич</i>	– инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, mbelikin@gmail.com
<i>Artem S. Aleynik</i>	– PhD, Associate professor, Head of the laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, artemal@rambler.ru
<i>Alexander Yu. Kireenkov</i>	– research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alexkir49@gmail.com
<i>Mikhail V. Mekhrengin</i>	– research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mehrengin@gmail.com
<i>Maksim A. Chirgin</i>	– student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ll1o@mail.ru
<i>Mikhail N. Belikin</i>	– research engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, mbelikin@gmail.com