

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-699-708
УДК 681.586.5

Исследование характеристик полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью в режиме источника и приемника оптического излучения для регистрации отклика волоконных решеток Брэгга

Вадим Сергеевич Ошлаков¹✉, Артем Сергеевич Алейник²,
Сергей Александрович Волковский³, Даниил Сергеевич Смирнов⁴

^{1,2,3,4} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ voshlakov@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>

² artemal@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>

³ savolkovskii@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>

⁴ dsmirnov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>

Аннотация

Введение. Представлены результаты экспериментального исследования возможности применения узкополосного полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью в качестве источника и приемника оптического излучения для детектирования спектрального отклика волоконной решетки Брэгга. **Метод.** В качестве исследуемого полупроводникового лазерного диода выбран DFB-лазер LDI-1550-DFB-2.5G-20/70 компании Laserscom, серийно выпускаемый на российском рынке и обладающий типовыми характеристиками. Для перестройки центральной длины волны полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью в диапазоне 1549,5–1552,0 нм использовалась прямая импульсная токовая модуляция с частотой 100 кГц, скважностью 40 и величиной тока 1 А в импульсе. Отраженное от волоконной решетки Брэгга оптическое излучение, соответствующее центральной длине волны Брэгга, регистрировалось за счет фотоэффекта в лазерном диоде. Проведена экспериментальная оценка оптоэлектронных параметров лазерного диода в фотовольтаическом режиме и режиме короткого замыкания: темновой ток, полоса пропускания и спектральная чувствительность. Оценка проводилась при температуре 25 °С. **Основные результаты.** Создана измерительная схема для детектирования отклика волоконной решетки Брэгга. Показано, что фотовольтаический режим лазерного диода применим для задач регистрации оптического излучения. Экспериментально получена амплитудно-частотная характеристика лазерного диода в фотовольтаическом режиме в зависимости от напряжения прямого смещения. Результаты эксперимента: полоса пропускания по уровню –3 дБ составляет 300 МГц, максимальная чувствительность равна 0,1 А/Вт в режиме короткого замыкания, а амплитудный отклик линеен в диапазоне длин волн 1540–1560 нм. Для лазерного диода экспериментально получена вольтамперная характеристика при обратном смещении. Темновой ток при нулевом смещении лазерного диода составляет 12,5 пА. **Обсуждение.** Представленный метод регистрации отклика волоконной решетки Брэгга может быть использован для миниатюризации и упрощения оптических схем измерительных каналов устройств опроса волоконных решеток Брэгга. Полученные результаты могут быть полезны специалистам, занимающимся волоконно-оптическими датчиками и системами сбора и обработки сигналов с таких датчиков.

Ключевые слова

волоконные решетки Брэгга, детектирование отклика от ВБР, перестройка центральной длины волны, темновой ток, амплитудно-частотная характеристика

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSER-2024-0006).

Ссылка для цитирования: Ошлаков В.С., Алейник А.С., Волковский С.А., Смирнов Д.С. Исследование характеристик полупроводникового лазерного диода с распределенной обратной связью в режиме источника и приемника оптического излучения для регистрации отклика волоконных решеток Брэгга // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 5. С. 699–708. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-699-708

© Ошлаков В.С., Алейник А.С., Волковский С.А., Смирнов Д.С., 2024

Investigation of the characteristics of a semiconductor laser diode as a transceiver for fiber Bragg gratings interrogation

Vadim S. Oshlakov¹✉, Artem S. Aleinik², Sergey A. Volkovskiy³, Daniil S. Smirnov⁴

^{1,2,3,4} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ voshlakov@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>

² artemal@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>

³ savolkovskii@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>

⁴ dsmirnov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>

Abstract

The paper presents the results of an experimental study of the possibility of using a narrow-band semiconductor distributed feedback laser diode used as a source and detector of optical radiation to detect the spectral response from a fiber Bragg grating. The DFB laser “LDI-1550-DFB-2.5G-20/70” from the company “Laserscom”, mass-produced on the Russian market and having standard characteristics, was chosen as the laser diode under study. To sweep the central wavelength of a semiconductor distributed feedback laser diode in the range 1549.5–1552 nm, direct pulse current modulation was used with a frequency of 100 kHz, a duty cycle of 40, and a current value of 1 A per pulse. The radiation reflected from the fiber Bragg grating corresponding to the central Bragg wavelength was recorded as a change in voltage at the anode and cathode of the laser diode due to the photoelectric effect in the laser diode. An experimental assessment of the optoelectronic parameters of a laser diode in photovoltaic and short-circuit modes was carried out: dark current, bandwidth and spectral sensitivity. The evaluation was carried out at a temperature of 25 °C. A measuring circuit has been created to detect the response from a fiber Bragg grating based on direct pulse current modulation and the photovoltaic mode of a semiconductor distributed feedback laser diode. It is shown that the photovoltaic mode of the laser diode is applicable to problems of recording optical radiation. The amplitude-frequency characteristic of a laser diode in the photovoltaic mode was experimentally obtained depending on the forward bias voltage. It is experimentally found that the –3 dB bandwidth is 300 MHz and the maximum sensitivity is 0.1 A/W in short-circuit mode, and the amplitude response is linear in the wavelength range from 1540 to 1560 nm. For the laser diode under study, the reverse branch of the current-voltage characteristic was experimentally obtained and the dark current at zero bias of the laser diode is 12.5 pA. The demonstrated method of FBG interrogation can be used for miniaturization and simplification of optical devices for fiber Bragg grating interrogation. The obtained results may be useful to specialists in fiber optic sensors, system for interrogation and processing signals from fiber optic sensors.

Keywords

fiber-optic Bragg gratings, FBG interrogation, wavelength sweep, dark current, Bode plot

Acknowledgements

This research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSER-2024-0006).

For citation: Oshlakov V.S., Aleinik A.S., Volkovskiy S.A., Smirnov D.S. Investigation of the characteristics of a semiconductor laser diode as a transceiver for fiber Bragg gratings interrogation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 5, pp. 699–708 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-5-699-708

Введение

Волоконные решетки Брэгга (ВБР) получили широкое распространение в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) измерителей физических величин [1], благодаря таким свойствам как компактный размер; высокая чувствительность к температуре и деформации; устойчивость к электромагнитным помехам; возможность мультиплексирования большого количества ЧЭ в рамках одного оптического волокна; отсутствие необходимости организовывать ввод/вывод излучения из оптического волокна и высокая надежность [2].

На сегодняшний день существуют два метода измерений спектрального отклика ВБР: спектрометрия (использование широкополосного источника излучения и спектроанализатора или монохроматора) [3] и перестраиваемая лазерная спектроскопия (метод временного сканирования центральной длины волны узкополосного источника оптического излучения) [4].

К достоинствам спектрометрии стоит отнести высокое разрешение по длине волны (выше 0,5 пм) и широкий диапазон длин волн (от 100 нм). К недостаткам

относятся большие габариты, сравнительно низкая частота опроса (ниже 50 кГц) и эксплуатационные характеристики, не позволяющие использовать такие приборы в условиях агрессивного воздействия окружающей среды (удары, резкие изменения температур в широком диапазоне и т. д.).

Достоинствами перестраиваемой лазерной спектроскопии являются: малые габаритные размеры; высокая частота опроса (выше 50 кГц); возможность временного мультиплексирования ВБР (т. е. при аналогичной частоте опроса одиночной решетки при использовании спектрометрии, спектроскопия позволяет опрашивать несколько ВБР на одной длине волны, разнесенные по времени отклика). Из недостатков отметим более низкое разрешение по длине волны (1–10 пм), по сравнению с спектрометрией и ограниченный диапазон длин волн (5–10 нм) на один измерительный канал.

Общим недостатком обоих методов является высокая стоимость блоков опроса. Для снижения себестоимости блоки опроса проектируются таким образом, чтобы снизить стоимость одного измерительного канала, но из-за высокой стоимости имеющихся техни-

ческих решений приемлемая стоимость блоков опроса достигается только в сложных дорогостоящих многоканальных системах.

На практике часто возникает необходимость опроса единичного или небольшого массива ЧЭ на основе ВБР, в связи с чем актуальной является задача миниатюризации, повышения надежности и удешевления устройств обработки сигналов от таких ЧЭ [5–8].

Применение широко распространенной телекоммуникационной элементной базы позволяет существенно снизить стоимость современных сенсорных систем различного типа. Среди телекоммуникационных полупроводниковых лазеров, подходящих для опроса ВБР методом сканирования центральной длины волны, выделим поверхностно-излучающие лазеры с вертикальным резонатором (Vertical-Cavity Surface-Emitting, VCSEL) и лазеры с распределенной обратной связью (Distributed Feedback, DFB).

Известны методы перестройки центральной длины волны таких лазеров при помощи прямой импульсной токовой модуляции [9–11]. Ключевым недостатком VCSEL является то, что коммерчески доступные лазеры, излучающие на длинах волн 1,3 мкм или 1,5 мкм, производят небольшое количество компаний. В свою очередь DFB-лазеры имеют более широкую номенклатуру и низкую стоимость из-за хорошо отработанной технологии производства и широкого распространения в качестве источников излучения для телекоммуникационных передатчиков, что делает такие лазеры более привлекательными при использовании в устройствах опроса ВБР.

В объемной оптике широко известным является метод автодинной интерферометрии [12]. Ключевой особенностью данного метода является использование лазера в качестве источника излучения и интерферометра, а встроенный в лазер фотодиод, предназначенный для контроля оптической мощности, применяется для детектирования интерференционного сигнала. Основным недостатком данного метода являются низкие чувствительность и полоса пропускания встроенного в лазер фотодиода. В работе [13] продемонстрировано детектирование сигналов автодинной интерферометрии за счет изменения напряжения на аноде и катоде лазерного диода, тем самым лазерный диод является источником и приемником излучения. В сравнении со встроенным фотодиодом такой метод позволяет обеспечить полосу частот приема сигналов, сопоставимую с полосой частоты модуляции излучения лазера. Стоит отметить, что основные оптоэлектронные характеристики лазера в режимах короткого замыкания и фотовольтаическом режиме не паспортизируются и не приводятся в документации производителями.

Ключевыми параметрами лазерного диода, использующегося в качестве приемника оптического излучения, являются: чувствительность в диапазоне длин волн (А/Вт); темновой ток (пА) и амплитудно-частотная характеристика.

В настоящей работе предложен метод детектирования спектрального отклика ВБР, основанный на использовании DFB-лазера в качестве источника и приемника оптического излучения. Перестройка центральной дли-

ны волны лазера осуществляется посредством прямой импульсной токовой модуляции. Отраженное от ВБР излучение детектируется за счет фотоэффекта в лазерном диоде в моменты отсутствия токового импульса.

Цель работы — исследование оптоэлектронных характеристик полупроводникового DFB-лазера в режиме короткого замыкания (КЗ) и фотовольтаическом режиме.

Перестраиваемая лазерная спектроскопия для опроса ВБР

Типовая схема устройства, реализующего метод перестраиваемой лазерной спектроскопии для детектирования спектрального отклика от ВБР (рис. 1), включает: перестраиваемый по длине волны источник излучения, оптический циркулятор и фотодиод. Часто циркулятор заменяют на Y-ответвитель и изолятор [14] для защиты источника излучения от обратных отражений. Центральная длина волны источника излучения 2 перестраивается прямым токовым импульсом формируемым генератором импульсов 1 в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_N за время T , при этом каждому моменту времени в импульсе соответствует некоторая величина λ . Импульс оптического излучения с мощностью P и длительностью T проходит по волокну расстояние L и от ВБР 4 отражается излучение, соответствующее центральной длине волны Брэгга $\lambda_{ВБР}$. Отраженное излучение проходит в обратном направлении расстояние L и через циркулятор 3 попадает на фотодиод 5, где преобразуется в электрический сигнал, поступающий на счетчик времени 6 вместе с исходным импульсом генератора. Счетчик времени определяет время от начала импульса перестройки центральной длины волны, поданного на лазерный диод до прихода на фотодиод излучения, отраженного от ВБР. При механическом или температурном воздействиях на ВБР $\lambda_{ВБР}$ смещается, в результате счетчик времени регистрирует разницу по времени между импульсом перестройки центральной длины волны источника излучения и зарегистрированным импульсом на фотодиоде.

Представленный метод опроса ВБР позволяет упростить типовую схему устройства, реализующего метод сканирования центральной длины волны узкополосного источника излучения до лазерного диода и ВБР.

В качестве исследуемого лазерного диода выбран DFB-лазер LDI-1550-DFB-2.5G-20/70 от компании Laserscom, серийно выпускаемый на российский рынок и обладающий следующими типовыми параметрами: центральная длина волны 1550 нм, максимальная выходная мощность 70 мВт, ширина спектра 80 пм, частота модуляции до 2,5 ГГц.

Метод перестройки центральной длины волны DFB-лазера

Метод перестройки центральной длины волны DFB-лазера описан в работе [15] и основан на температурном сдвиге центральной длины волны лазера в результате кратковременного разогрева активной области импульсным током высокой плотности на кристалле.

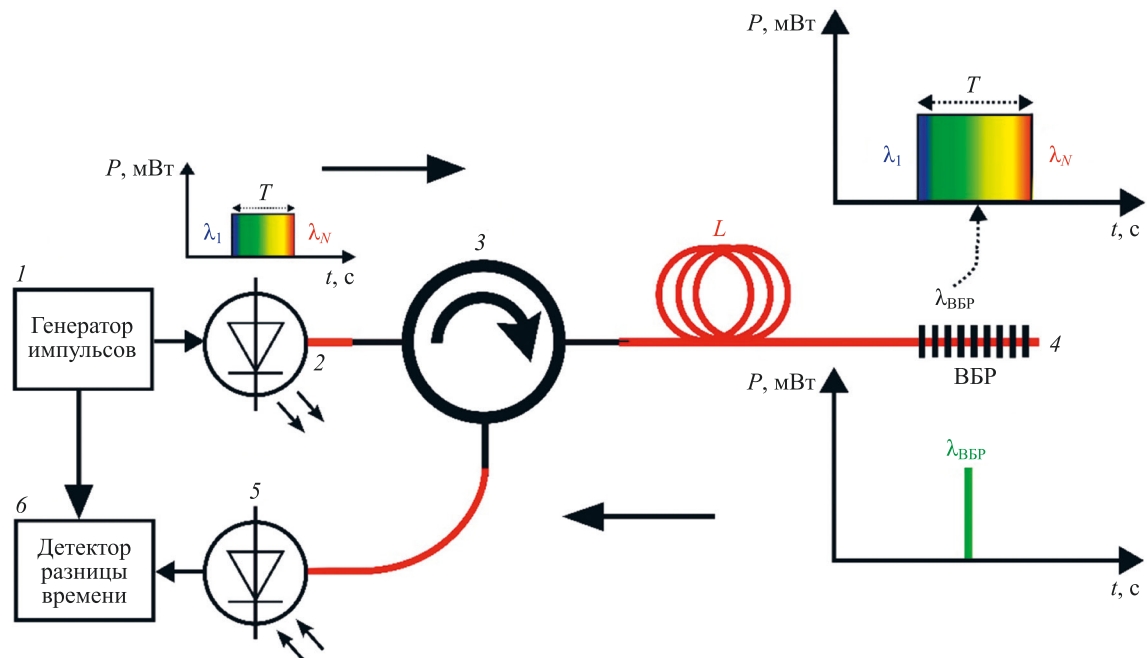


Рис. 1. Типовая схема устройства детектирования отклика от волоконной решетки Брэгга при помощи метода перестройки центральной длины волны узкополосного источника излучения:

1 — генератор импульсов; 2 — источник излучения; 3 — циркулятор; 4 — волоконная решетка Брэгга (ВБР); 5 — фотодиод; 6 — счетчик времени

Fig. 1. Typical fiber Bragg grating interrogation system based on wavelength-swept laser diode.

1 — pulse generator; 2 — light source; 3 — circulator; 4 — fiber Bragg grating (ВБР); 5 — photodiode; 6 — time measurement unit

Перестройка центральной длины волны на 10 нм осуществляется за счет модуляции короткими импульсами тока, величина которых на несколько порядков выше рабочего тока лазера и составляет 4 А.

На исследуемый лазерный диод подаются токовые импульсы с периодом 10 мкс и длительностью 250 нс. Диапазон перестройки величины тока в импульсе составил от 0,04 до 1 А, ток при этом увеличивался с шагом 40 мА. Зарегистрированные спектры излучения лазера при перестройке центральной длины волны в зависимости от величины тока модуляции показаны на рис. 2.

Для регистрации спектров использован оптический спектроанализатор Yokogawa AQ6370C. Период цикла сканирования в спектральном диапазоне от 1500 до 1600 нм составляет 0,2 с, поэтому нарушается принцип инвариантности и спектры перестройки центральной длины волны DFB-лазера имеют вид сплошных. Нелинейная форма спектрального отклика перестройки частоты излучения лазера при постоянном токе в импульсе свидетельствует о нелинейности скорости перестройки центральной длины волны лазера [16]. На спектрограмме нелинейность скорости перестройки центральной длины проявляется как постепенное изменение уровня мощности на границах диапазона перестройки.

Типовой сдвиг центральной длины волны Брэгга для ВБР, используемой в качестве ЧЭ в волоконно-оптических спектрально-селективных системах измерения температуры [17], составляет 10 пм/К. Для обеспечения работы в диапазоне температур от минус 40 °С до 120 °С, необходимо обеспечить диапазон пе-

рестройки центральной длины волны лазера на 1,6 нм. Полученного диапазона перестройки центральной длины волны (2,5 нм) DFB-лазера достаточно для опроса одной ВБР в приведенном температурном диапазоне в качестве ЧЭ для измерения температуры.

Амплитудно-частотная характеристика DFB-лазера в фотовольтаическом режиме

Так как метод перестройки центральной длины волны DFB-лазера основан на прямой импульсной токовой модуляции с длительностью импульсов 250 нс, то для детектирования отклика от ВБР с использованием фотовольтаического режима лазерного диода, его полоса пропускания в этом режиме не должна ограничивать полосу регистрируемого сигнала.

В рамках настоящей работы выполнена оценка частотных параметров DFB-лазера в фотовольтаическом режиме и в режиме КЗ. Измерения проводились при помощи схемы, представленной на рис. 3. Принцип измерения основан на регистрации коэффициента передачи S₂₁ DFB-лазера в фотовольтаическом режиме в диапазоне частот от 50 кГц до 300 МГц при помощи векторного анализатора цепей.

В качестве источника излучения применен лабораторный суперлюминесцентный диод от компании Thorlabs, модель S5FC1005P / с центральной длиной волны 1550 нм, обладающий шириной спектра равной 50 нм и регулируемой выходной мощностью оптического излучения. Выходное излучение источника линейно поляризовано, что позволяет при использовании

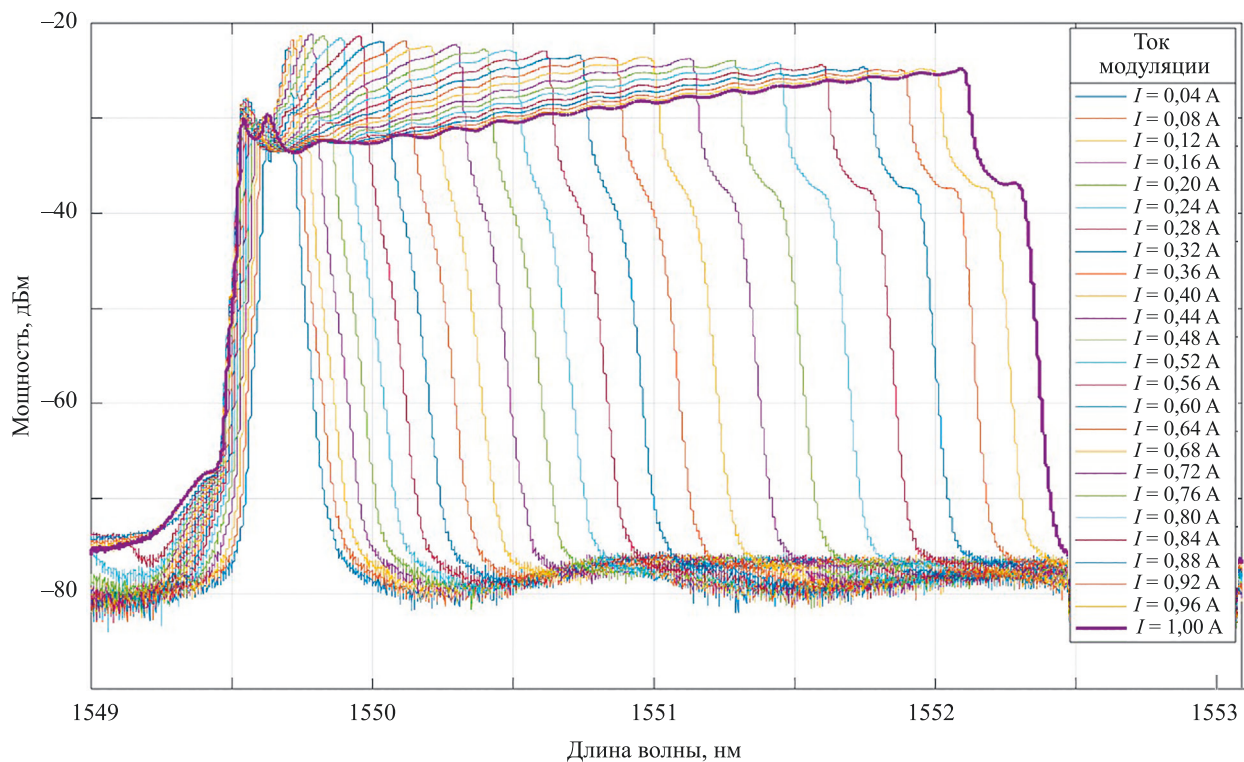


Рис. 2. Спектры перестройки центральной длины волны DFB-лазера при разных токах модуляции
Fig. 2. Spectrums of the central wavelength sweeping at different modulation currents of the DFB laser diode

оптического волокна, сохраняющего состояние поляризации, согласовать рабочие поляризационные оси источника излучения и входного оптического волокна модулятора, обеспечив максимальную глубину модуля-

ции модулятором Маха–Цендера (ММЦ) 2 (компания JDS Uniphase, модель 10023707).

Оптическое излучение источника модулируется при помощи амплитудного модулятора гармоническим сиг-

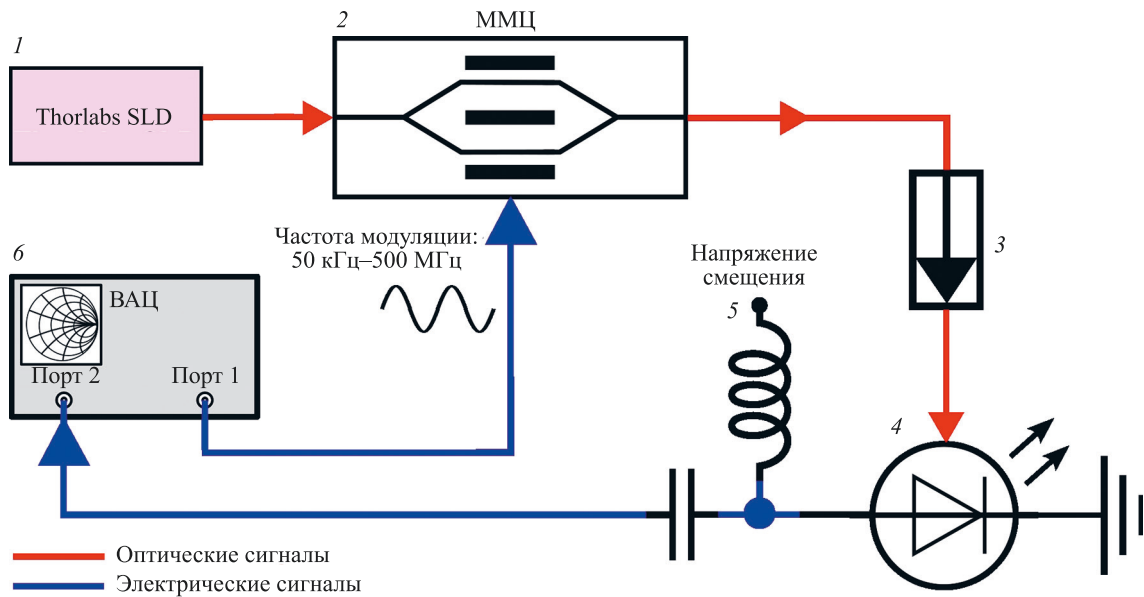


Рис. 3. Блок-схема стенда для оценки частотных характеристик DFB-лазера в фотовольтаическом режиме при различных напряжениях смещения:

1 — источник излучения; 2 — модулятор Маха–Цендера (ММЦ); 3 — оптический изолятор; 4 — DFB-лазер; 5 — LC-фильтр; 6 — векторный анализатор цепей (BAЦ)

Fig. 3. Measurement frequency characteristics setup of the DFB laser diode in the photovoltaic mode at different bias voltages:

1 — light source; 2 — Mach-Zender modulator (ММЦ); 3 — optical isolator; 4 — DFB laser diode; 5 — LC-filter; 6 — vector network analyzer (BAЦ)

налом с частотой в диапазоне от 50 кГц до 300 МГц, поступающим с порта 1 векторного анализатора цепей компании Siglent, модель 4502 6. Амплитудно-модулированное излучение через изолятор 3 подается на вход исследуемого лазерного диода 4, где за счет фотоэффекта преобразуется в электрический сигнал. Оптический изолятор 3 использован для предотвращения возникновения неконтролируемой лазерной генерации суперлюминесцентного диода, которая может привести к выходу из строя.

Электрический отклик с исследуемого лазерного диода регистрируется входным портом векторного анализатора цепей (ВАЦ). В результате получен набор коэффициентов передачи исследуемого лазерного диода (S21) при прямом смещении диода в диапазоне от 0 до 0,9 В. Напряжение смещения при помощи лабораторного блока питания компании Rohde&Schwartz, модель NGL202 подается на DFB-лазер через LC-фильтр компании MiniCircuits, модель ZX85-12G-S+ 5, предотвращающий шунтирование блока питания с портом 2 векторного анализатора цепей. Диапазон изменения напряжения смещения, подаваемого с лабораторного блока питания, составил от 0 до 0,9 В с шагом 10 мВ.

Амплитудно-частотные характеристики исследуемого лазерного диода в диапазоне напряжений прямого смещения показаны на рис. 4.

С увеличением прямого напряжения смещения лазерный диод из режима КЗ переходит в фотовольтаический режим, что приводит к снижению электрического отклика на внешнее оптическое излучение вплоть до 0,75 В, соответствующего пороговому напряжению согласно его паспортной вольтамперной характеристике. При напряжении смещения 0,85 В наблюдается амплитудный отклик во всей полосе частот, ток через лазер соответствует значению 7 мА, при этом уровень выходной мощности оптического излучения лазера сопоставим с мощностью модулируемого источника излучения (1 мВт). В работе [14] такой эффект описан как оптическая инжекция, на частотных характери-

ках это проявляется как амплитудный всплеск электрического сигнала. Дальнейшее увеличение напряжения прямого смещения лазерного диода согласно теории полупроводников приводит к снижению дрейфового напряжения в *PN*-переходе и росту диффузионного тока через диод, что вызывает рост величины излучаемой оптической мощности. Под воздействием оптического излучения в активной области происходит генерация фотоиндуцированных электронно-дырочных пар, поэтому снижение дрейфового напряжения внешним электрическим полем приводит к увеличению рекомбинации фотоиндуцированных носителей в активной области, при этом величина фототока падает и становится малоразличимой в сравнении с растущим прямым диффузионным током.

При воздействии внешнего оптического излучения DFB-лазер имеет наибольший амплитудный отклик во всей полосе частот и обладает наибольшей чувствительностью и полосой пропускания по уровню -3 дБ равной 300 МГц при напряжении смещения, соответствующем 0 В, т. е. в режиме КЗ. С ростом частоты амплитудной модуляции внешнего излучения наблюдается незначительное снижение величины электрического амплитудного отклика, что может быть связано с несовпадением волновых сопротивлений входного порта векторного анализатора цепей и DFB-лазера.

Полученной полосы пропускания равной 300 МГц в режиме КЗ достаточно для регистрации спектрального отклика от ВБР во временной области.

Спектральная чувствительность и темновой ток лазерного диода в фотодиодном режиме

Темновой ток и спектральная чувствительность определяют пороговую чувствительность фотоприемника. Для детектирования спектрального отклика от ВБР необходимо, чтобы при фотоэффекте электрический отклик исследуемого лазерного диода в режиме КЗ был линейен и независим от длины волны внешнего оптического излучения, а темновой ток был сопоставим с темновым током *PIN*-фотодиодов, использующихся в измерительных схемах. Типовая чувствительность *PIN*-фотодиодов близка к 1 А/Вт. Величина темнового тока *PIN*-фотодиодов составляет десятки пикоампер (фотодиод от компании Laserscom, модель PDI-80-P10-2G-K, обладающий чувствительностью 1 А/Вт в диапазоне длин волн 1400–1650 нм и темновым током величиной 30 пА).

Схема измерения темнового тока, показана на рис. 5. Пикоамперметр компании Keithley, модель 6487 позволяет измерять токи с разрешением 10^{-14} А и точностью 0,3 %, имеет встроенный регулируемый источник напряжения для смещения *PN*-перехода исследуемого лазерного диода в прямом и обратном направлениях, что подходит для измерения фототока и темнового тока фотодиодов. Измерения проводились при температуре 25 °С без воздействия оптического излучения на DFB-лазер.

Измеренная обратная ветвь вольтамперной характеристики DFB-лазера представлена на рис. 6. Темновой ток в режиме КЗ (при нулевом напряжении смещения

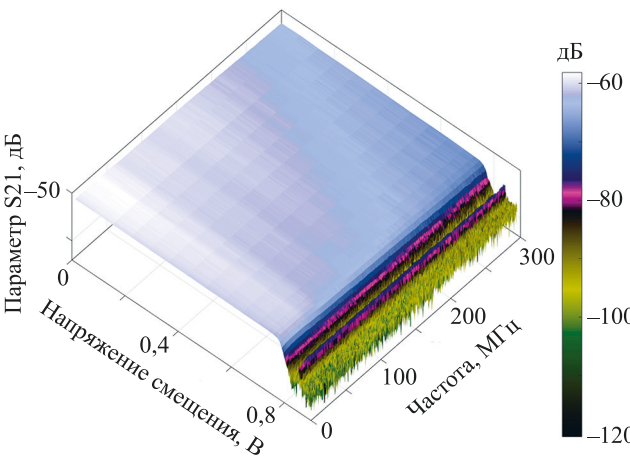


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи S21 DFB-лазера в фотовольтаическом режиме от величины напряжения прямого смещения

Fig. 4. Transmission coefficient S21 of the DFB laser diode in photovoltaic mode at different bias voltages



Рис. 5. Схема измерения темнового тока DFB-лазера
Fig. 5. Measurement dark current setup of the DFB laser diode

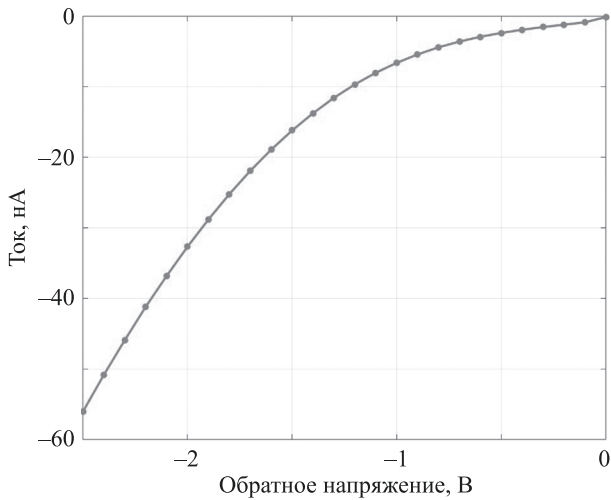


Рис. 6. Обратная ветвь вольтамперной характеристики DFB-лазера
Fig. 6. Current-voltage characteristic reverse branch of the DFB laser diode

лазера) составляет 12,5 пА, при увеличении обратного напряжения смещения до -2,5 В увеличивается до 55 нА. Темновой ток в режиме КЗ сопоставим с темновыми токами *PIN*-фотодиодов, используемых в измерительных схемах. В режиме КЗ DFB-лазер может быть применен для детектирования оптического излучения от ВБР или других волоконно-оптических спектральных датчиков.

Для измерения спектральной чувствительности DFB-лазера использовалась схема, представленная на рис. 7.

В качестве внешнего источника излучения выбран перестраиваемый лазер компании Keysight, модель

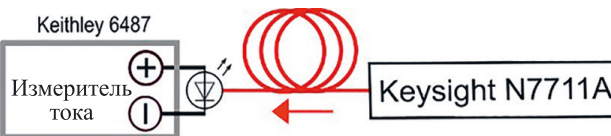


Рис. 7. Схема измерения чувствительности DFB-лазера в режиме короткого замыкания
Fig. 7. Measurement sensitivity setup of the DFB laser diode in short circuit mode

N7711A с возможностью регулировки выходной мощности и центральной длины волны. На вход исследуемого лазерного диода подавалось оптическое излучение в диапазоне 0–20 мВт с шагом 2,5 мВт на трех длинах волн 1540, 1550 и 1560 нм. Регистрация тока производилась с помощью пикоамперметра (рис. 8).

Чувствительность DFB-лазера получена при нулевом напряжении смещения и, согласно рис. 8, составляет 0,1 А/Вт. Отклик лазерного диода на поступающую входную оптическую мощность линеен и не имеет зависимости от длины волны в диапазоне сканирования. Чувствительность лазерного диода на порядок ниже, чем типовые значения чувствительности у *PIN*-фотодиодов, использующихся в измерительных схемах в диапазоне длин волн от 1540 до 1560 нм, однако уровни чувствительности в 0,1 А/Вт достаточно для детектирования мощности оптического излучения отклика от ВБР или других волоконно-оптических спектральных датчиков удаленных на расстояние в пределах 10 км.

Регистрация отклика ВБР при помощи DFB-лазера в режиме прямо-передатчика

Для проведения измерения была изготовлена ВБР в телекоммуникационном оптическом волокне SMF-28 стандарта G.657.A1 (диаметры световедущей жилы — около 10 мкм, оболочки — 125 мкм и защитного акрилатного покрытия — 250 мкм) при помощи схемы записи на основе интерферометра Тальбота [18].

Параметры ВБР: центральная длина волны (при температуре 25 °С) — 1551 нм, ширина спектра — 0,22 нм (по уровню -3 дБ), температурный сдвиг центральной длины волны — 10 пм/К, коэффициент отражения — 90 %.

На рис. 9 представлена блок-схема макета для экспериментальной проверки работоспособности предложенного метода опроса ВБР при помощи DFB-лазера в режимах источника и приемника оптического излучения. Измерения проводились при комнатной темпера-

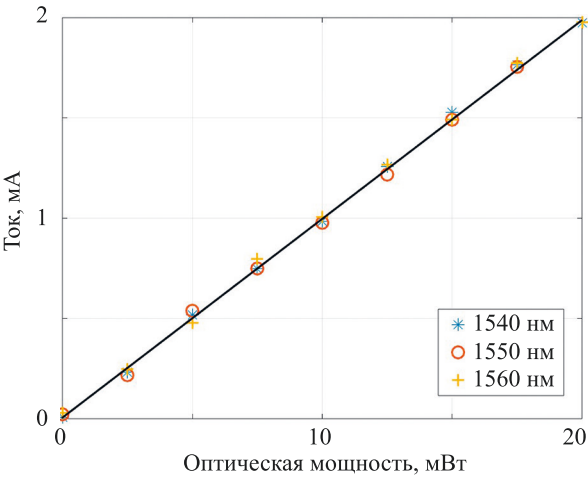


Рис. 8. Зависимость фототока DFB-лазера в режиме короткого замыкания от мощности входного оптического излучения для длин волн 1540, 1550 и 1560 нм
Fig. 8. Photocurrent dependence of the DFB laser diode in short circuit mode at wavelength 1540 nm, 1550 nm, 1560 nm

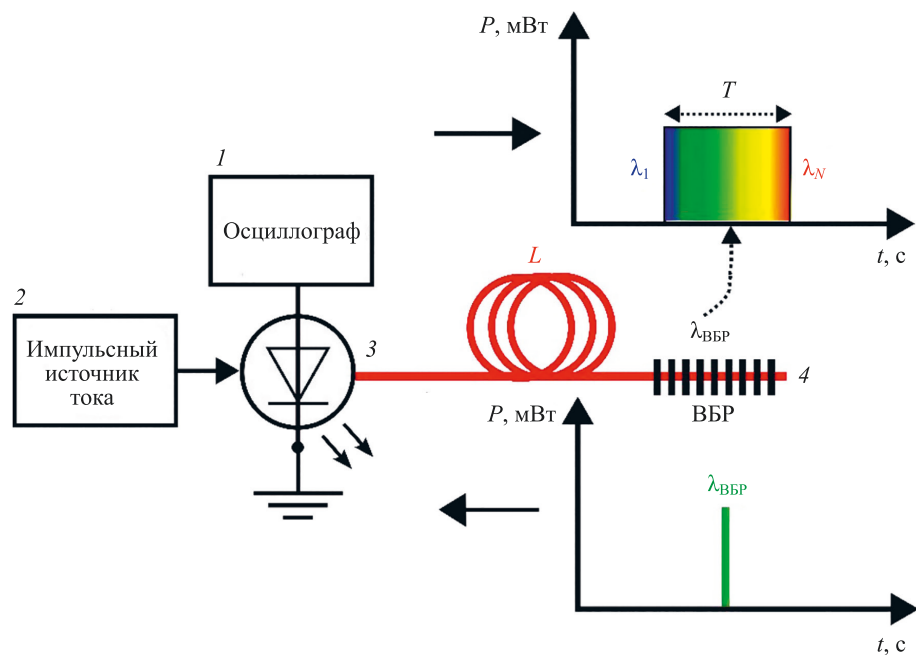


Рис. 9. Блок-схема макета для опроса волоконной решетки Брэгга (ВБР) при помощи DFB-лазера в режиме приемника и передатчика оптического излучения:

1 — осциллограф; 2 — импульсный источник тока; 3 — исследуемый лазерный диод; 4 — волоконная решетка Брэгга (ВБР)

Fig. 9. Measurement setup for fiber Bragg grating interrogation system using DFB laser in the receiver and transmitter mode of optical power:

1 — oscilloscope; 2 — pulse current source; 3 — laser diode; 4 — fiber Bragg grating (ВБР)

туре 25 °С. На лазерный диод 3 подавались импульсы тока величиной 1 А с длительностью 250 нс и периодом следования 10 мкс при помощи импульсного источника тока 2. Диапазон перестройки центральной длины волны составил 2,5 нм в соответствии с рис. 2.

Импульс оптического излучения с постоянной мгновенной мощностью и изменяющейся длиной волны формируемый лазерным диодом длительностью $\tau = 250$ нс проходит по волокну расстояние 100 м, и от ВБР 4 отражается оптическое излучение с длиной волны, соответствующей центральной длине волны Брэгга — 1551 нм ($\lambda_{\text{ВБР}}$ на рис. 9). Отраженное от ВБР излучение проходит в обратном направлении расстояние, равное 100 м и приходит на DFB-лазер в момент времени, когда напряжение на лазерном диоде упало до 0 В, где за счет фотоэффекта преобразуется в электрический отклик. Отклик от ВБР в виде напряжения на лазерном диоде детектируется при помощи осциллографа компании Rhode&Schwarz, модель RTO1024 1.

На рис. 10 представлен результат детектирования спектрального отклика от ВБР.

В результате температурного воздействия на ВБР происходит сдвиг центральной длины волны Брэгга. Так как центральной длине волны лазера при перестройке можно сопоставить некоторый момент времени из длительности τ , то сдвиг центральной длины ВБР во временной области приводит к изменению задержки между импульсом модуляции и отраженным от ВБР излучением.

Изменение задержки по времени между импульсом модуляции и отраженным от ВБР излучением соответствует 700 пс при сдвиге центральной длины волны

ВБР соответствующем 10 пм, что эквивалентно изменению температуры ВБР на 1 °С. Величина сдвига центральной длины волны фиксировалась спектроанализатором по излучению прошедшему через ВБР.

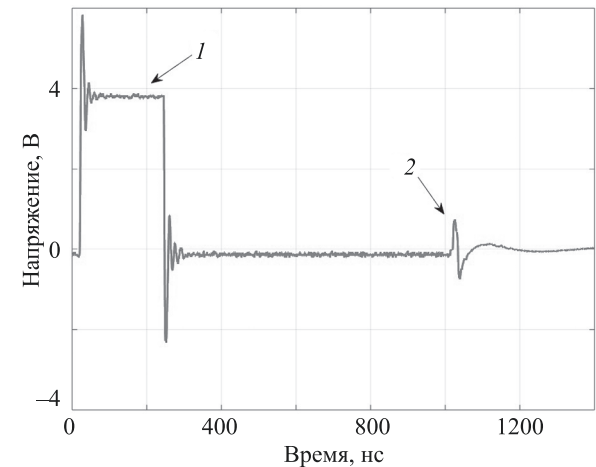


Рис. 10. Осциллограмма зарегистрированного отклика от волоконной решетки Брэгга (ВБР) при помощи DFB-лазера в режиме источника и приемника оптического излучения:

1 — импульс модуляции лазера; 2 — электрический отклик, вызванный отражением от ВБР, зарегистрированный при помощи DFB-лазера в фотovoltaическом режиме

Fig. 10. Waveform of the recorded FBG signal using DFB laser diode in the receiver and transmitter mode of optical power:

1 — laser modulation pulse; 2 — electrical response of the DFB laser diode in the photovoltaic mode induced by FBG reflection

Длительности импульсов отраженного от ВБР излучения (2 на рис. 10) накладывают высокие требования к аппаратуре регистрации и обработки отклика от ВБР в части высокой частоты дискретизации (выше $6 \cdot 10^8$ Гц) и обеспечения аналоговой полосы пропускания тракта выше 300 МГц. Использование современных преобразователей время-цифровой код [19] для детектирования временной задержки между импульсами измерения может существенно снизить требования к электронной части опроса ВБР с сохранением высокого разрешения по центральной длине волны не менее 10 пм.

Заключение

Представлен метод опроса волоконных решеток Брэгга при помощи исследуемого лазерного диода (DFB-лазера) в режиме источника и приемника излучения. Проведена оценка типовых характеристик DFB-лазера в режиме приемника оптического излучения. По полученным данным можно сделать вывод о возможности использования DFB-лазера для детектирования отклика от волоконной решетки Брэгга в режиме короткого замыкания и в фотовольтаическом режиме. При нулевом смещении лазерного диода наблюдается самый низкий темновой ток 12,5 пА и наибольший электрический отклик на входное оптическое излучение в диапазоне длин волн от 1540 до 1560 нм. Подтверждено, что полоса пропускания DFB-лазера в фотовольтаическом режиме и в режиме короткого замыкания позволяет использовать лазер для детектирования

сигналов в полосе частот до 300 МГц при частотах опроса чувствительных элементов на уровне 100 кГц и выше, что может быть применено при построении высокоскоростных измерителей на основе волоконных решеток Брэгга. Диапазон перестройки центральной длины волны лазера может быть расширен с 2,5 нм до 5 нм и выше за счет увеличения величины прямого тока в импульсе, что достаточно для опроса двух чувствительных элементов с мультиплексированием по длине волны в одном оптическом волокне. При величине характерного сдвига центральной длины волны датчика температуры на основе волоконной решетки Брэгга (10 пм/К), полученного диапазона перестройки центральной длины волны (2,5 нм) и разрешения (700 пс/К), достаточно для опроса датчика температуры в диапазоне изменения температуры от минус 70 °С до 150 °С с разрешением выше 1 °С. Предложенная схема и метод позволяют без механических компонентов и при минимальном количестве оптических элементов производить опрос чувствительного элемента на основе волоконных решеток Брэгга. Использование DFB-лазера в режиме источника и приемника оптического излучения позволяет снизить стоимость схемы опроса чувствительных элементов на основе волоконных решеток Брэгга, расширить диапазон применимости схемы за счет ее миниатюризации, меньшей чувствительности к внешним вибрационным и ударным воздействиям из-за отсутствия подвижных механических элементов, в отличие от классических анализаторов спектра и перестраиваемых лазеров, а также существенно увеличить частоту опроса.

Литература

1. Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation / ed. by A. Cusano, A. Cutolo, J. Albert. Bentham Science Publishers, 2011. <https://doi.org/10.2174/97816080508401110101>
2. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology // *Frontiers of Optoelectronics in China*. 2011. V. 4. N 2. P. 204–212. <https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4>
3. Silveira P.C., Dante A., Keley M.M., Carvalho C., Allil R., Mok R., Garcao L., Werneck M. Experimental evaluation of low-cost interrogation techniques for FBG sensors // *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2018. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2018.8409722>
4. Lee H.S., Lee H., Kim H., Cho J., Jeong M., Kim C.-S. A fiber Bragg grating sensor interrogation system based on a linearly wavelength-swept thermo-optic laser chip // *Sensors*. 2014. V. 14. N 9. P. 16109–16116. <https://doi.org/10.3390/s140916109>
5. Flores-Bravo J.A., Madrigal J., Zubia J., Sales S., Villatoro J. Coupled-core fiber Bragg gratings for low-cost sensing // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. N 1. P. 1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05313-9>
6. Yang F., Zhang W., Zhao S., Liu Q., Tao J., He Z. Miniature interrogator for multiplexed FBG strain sensors based on a thermally tunable microring resonator array // *Optics Express*. 2019. V. 27. N 5. P. 6037–6046. <https://doi.org/10.1364/oe.27.006037>
7. Darwich D., Youssef A., Zaraket H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications // *Optics Letters*. 2020. V. 45. N 5. P. 1116–1119. <https://doi.org/10.1364/ol.386053>
8. Darwich D., Youssef A., Pisco M., Zaraket H. Investigation of low-cost interrogation technique based on modulated distributed feedback laser // *IEEE Sensors Journal*. 2020. V. 20. N 5. P. 2460–2466. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2951436>

References

1. *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation*. Ed. by A. Cusano, A. Cutolo, J. Albert. Bentham Science Publishers, 2011. <https://doi.org/10.2174/97816080508401110101>
2. Chen J., Liu B., Zhang H. Review of fiber Bragg grating sensor technology. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2011, vol. 4, no. 2, pp. 204–212. <https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4>
3. Silveira P.C., Dante A., Keley M.M., Carvalho C., Allil R., Mok R., Garcao L., Werneck M. Experimental evaluation of low-cost interrogation techniques for FBG sensors. *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2018, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/i2mtc.2018.8409722>
4. Lee H.S., Lee H., Kim H., Cho J., Jeong M., Kim C.-S. A fiber Bragg grating sensor interrogation system based on a linearly wavelength-swept thermo-optic laser chip. *Sensors*, 2014, vol. 14, no. 9, pp. 16109–16116. <https://doi.org/10.3390/s140916109>
5. Flores-Bravo J.A., Madrigal J., Zubia J., Sales S., Villatoro J. Coupled-core fiber Bragg gratings for low-cost sensing. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1, pp. 1280. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05313-9>
6. Yang F., Zhang W., Zhao S., Liu Q., Tao J., He Z. Miniature interrogator for multiplexed FBG strain sensors based on a thermally tunable microring resonator array. *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 5, pp. 6037–6046. <https://doi.org/10.1364/oe.27.006037>
7. Darwich D., Youssef A., Zaraket H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications. *Optics Letters*, 2020, vol. 45, no. 5, pp. 1116–1119. <https://doi.org/10.1364/ol.386053>
8. Darwich D., Youssef A., Pisco M., Zaraket H. Investigation of low-cost interrogation technique based on modulated distributed feedback laser. *IEEE Sensors Journal*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 2460–2466. <https://doi.org/10.1109/jsen.2019.2951436>

9. Qiao P., Cook K.T., Li K., Chang-Hasnain C.J. Wavelength-swept VCSELs // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2017. V. 23. N 6. P. 1700516. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2017.2707181>
10. Алейник А.С., Киреевков А.Ю., Мехренгин М.В., Чиргин М.А., Беликин М.Н. Подстройка центральной длины волны источника оптического излучения в интерферометрических датчиках на основе волоконных брэгговских решеток // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2015. Т. 15. № 5. С. 809–816. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-5-809-816>
11. Njegovec M., Donlagic D. Rapid and broad wavelength sweeping of standard telecommunication distributed feedback laser diode // *Optics Letters*. 2013. V. 38. N 11. P. 1999–2001. <https://doi.org/10.1364/ol.38.001999>
12. Liu B., Ruan Y., Yu Y., Xi J., Guo Q., Tong J., Rajan G. Laser self-mixing fiber Bragg grating sensor for acoustic emission measurement // *Sensors*. 2018. V. 18. N 6. P. 1956. <https://doi.org/10.3390/s18061956>
13. Lim Y.L., Bertling K., Rio P., Tucker J.R., Rakic A.D. Displacement and distance measurement using the change in junction voltage across a laser diode due to the self-mixing effect // *Proceedings of SPIE*. 2006. V. 6038. P. 60381O. <https://doi.org/10.1117/12.638433>
14. Liu Z., Slavik R. Optical injection locking: From principle to applications // *Journal of Lightwave Technology*. 2020. V. 38. N 1. P. 43–59. <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2945718>
15. Njegovec M., Donlagic D. Interrogation of FBGs and FBGs arrays using standard telecom DFB diode // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. V. 34. N 22. P. 5340–5348. <https://doi.org/10.1109/jlt.2016.2616725>
16. Беликин М.Н. Быстродействующее малогабаритное устройство регистрации спектрального отклика для волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.11.01 / Университет ИТМО. Санкт-Петербург, 2017. 131 с.
17. Tudose M., Enciu D., Ursu I. Towards use of Fiber Bragg Grating sensors for structural health monitoring of (aero) space structures // *International Journal of Modeling and Optimization*. 2018. V. 8. N 4. P. 246–249. <https://doi.org/10.7763/ijmo.2018.v8.659>
18. Gribov A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer // *Optical and Quantum Electronics*. 2016. V. 48. N 12. P. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
19. Henzler S. *Time-to-Digital Converter Basics*. Springer Netherlands, 2010. P. 5–18. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8628-0_2
9. Qiao P., Cook K.T., Li K., Chang-Hasnain C.J. Wavelength-swept VCSELs. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, vol. 23, no. 6, pp. 1700516. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2017.2707181>
10. Aleynik A.S., Kireenkova A.Yu., Mekhreging 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. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2015-15-5-809-816>
11. Njegovec M., Donlagic D. Rapid and broad wavelength sweeping of standard telecommunication distributed feedback laser diode. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 11, pp. 1999–2001. <https://doi.org/10.1364/ol.38.001999>
12. Liu B., Ruan Y., Yu Y., Xi J., Guo Q., Tong J., Rajan G. Laser self-mixing fiber Bragg grating sensor for acoustic emission measurement. *Sensors*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1956. <https://doi.org/10.3390/s18061956>
13. Lim Y.L., Bertling K., Rio P., Tucker J.R., Rakic A.D. Displacement and distance measurement using the change in junction voltage across a laser diode due to the self-mixing effect. *Proceedings of SPIE*, 2006, vol. 6038, pp. 60381O. <https://doi.org/10.1117/12.638433>
14. Liu Z., Slavik R. Optical injection locking: From principle to applications. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, vol. 38, no. 1, pp. 43–59. <https://doi.org/10.1109/jlt.2019.2945718>
15. Njegovec M., Donlagic D. Interrogation of FBGs and FBGs arrays using standard telecom DFB diode. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, vol. 34, no. 22, pp. 5340–5348. <https://doi.org/10.1109/jlt.2016.2616725>
16. Belikin M.N. *A high-speed, small-sized spectral response recording device for fiber-optic Bragg grating sensors*. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. St. Petersburg, ITMO University, 2017, 131 p. (in Russian)
17. Tudose M., Enciu D., Ursu I. Towards use of Fiber Bragg Grating sensors for structural health monitoring of (aero) space structures. *International Journal of Modeling and Optimization*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 246–249. <https://doi.org/10.7763/ijmo.2018.v8.659>
18. Gribov A.I., Pavlishin I.V., Stam A.M., Idrisov R.F., Varzhel S.V., Konnov K.A. Laboratory setup for fiber Bragg gratings inscription based on Talbot interferometer. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, vol. 48, no. 12, pp. 540. <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0816-3>
19. Henzler S. *Time-to-Digital Converter Basics*. Springer Netherlands, 2010, pp. 5–18. https://doi.org/10.1007/978-90-481-8628-0_2

Авторы

Ошлаков Вадим Сергеевич — начальник группы, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57442309800](https://orcid.org/0000-0002-2983-4397), <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>, voshlakov@mail.ru

Алейник Артем Сергеевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 54793978900](https://orcid.org/0000-0002-7682-348X), <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>, artemal@itmo.ru

Волковский Сергей Александрович — кандидат технических наук, ассистент, научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57195476252](https://orcid.org/0000-0001-8462-5208), <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>, savolkovskii@itmo.ru

Смирнов Даниил Сергеевич — кандидат технических наук, ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57204933153](https://orcid.org/0000-0003-4324-9327), <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>, dsmirnov@itmo.ru

Authors

Vadim S. Oshlakov — Head of Group, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57442309800](https://orcid.org/0000-0002-2983-4397), <https://orcid.org/0000-0002-2983-4397>, voshlakov@mail.ru

Artem S. Aleinik — PhD, Associate Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 54793978900](https://orcid.org/0000-0002-7682-348X), <https://orcid.org/0000-0002-7682-348X>, artemal@itmo.ru

Sergey A. Volkovskiy — PhD, Assistant, Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57195476252](https://orcid.org/0000-0001-8462-5208), <https://orcid.org/0000-0001-8462-5208>, savolkovskii@itmo.ru

Daniil S. Smirnov — PhD, Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57204933153](https://orcid.org/0000-0003-4324-9327), <https://orcid.org/0000-0003-4324-9327>, dsmirnov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2024
Одобрена после рецензирования 20.07.2024
Принята к печати 21.09.2024

Received 02.02.2024
Approved after reviewing 20.07.2024
Accepted 21.09.2024



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»