

ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 621.373.826

БРИЛЛЮЭНОВСКИЕ ЛАЗЕРЫ И СЕНСОРЫ: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© А. А. Фотиади^{1,2}, Д. А. Коробко¹, И. О. Золотовский¹

¹Ульяновский государственный университет,
432017, г. Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

²University of Mons,
Mons, blvd. Dolez 31, Belgium, B-7000
E-mail: Andrei.Fotiadi@gmail.com

Приведён обзор новых средств фотоники, основанных на использовании вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ) в оптических световодах. Основное внимание уделено оригинальным схемам узкополосных малошумящих лазеров и их возможным применениям для распределённых волоконных измерений.

Ключевые слова: волоконные лазеры, вынужденное рассеяние Мандельштама — Бриллюэна, распределённые волоконные датчики.

DOI: 10.15372/AUT20230108

Введение. Процесс вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ) [1, 2] в стандартных волокнах характеризуется однородной линией усиления с шириной ~ 30 МГц и обладает большим динамическим диапазоном по абсолютному усилению мощности резонансного сигнала [3–7]. Верхняя граница усиления $\sim 10^{12}$ соответствует развитию ВРМБ из теплового шума при типичной пороговой мощности накачки ~ 10 мВт на километр телекоммуникационного волокна. Такие низкие пороговые мощности и гигантское усиление делают возможным создание ВРМБ-устройств на основе стандартных полупроводниковых лазерных диодов и волоконных резонаторов. Однако для того чтобы полупроводниковый лазер мог производить ВРМБ-генерацию в волоконном резонаторе, его собственная линия генерации должна быть предварительно сужена на несколько порядков. Простые, но эффективные методы сужения линии генерации полупроводникового лазера позволяют создавать недорогие компактные узкополосные бриллюэновские источники, обладающие компактностью, низким уровнем фазового шума, надёжностью и дешёвой конструкцией.

За последние несколько лет нами был предложен ряд решений для бриллюэновских лазеров с шириной лоренцевской линии генерации до 500 Гц, представляющих собой полностью сварные волоконные конфигурации, объединяющие лазерный диод и несколько стандартных телекоммуникационных компонент. Возможность одновременной генерации на двух строго привязанных друг к другу частотах делает эти решения привлекательными для использования в качестве задающего генератора в распределённых датчиках на основе как рэлеевского, так и бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах.

Целью данной работы является описание оригинальных идей и отдельных технических решений, лежащих в основе разработанных конфигураций узкополосных лазеров [8–10], а также особенностей их возможных применений в распределённых волоконных датчиках акустических вибраций, температуры и давления [11–15].

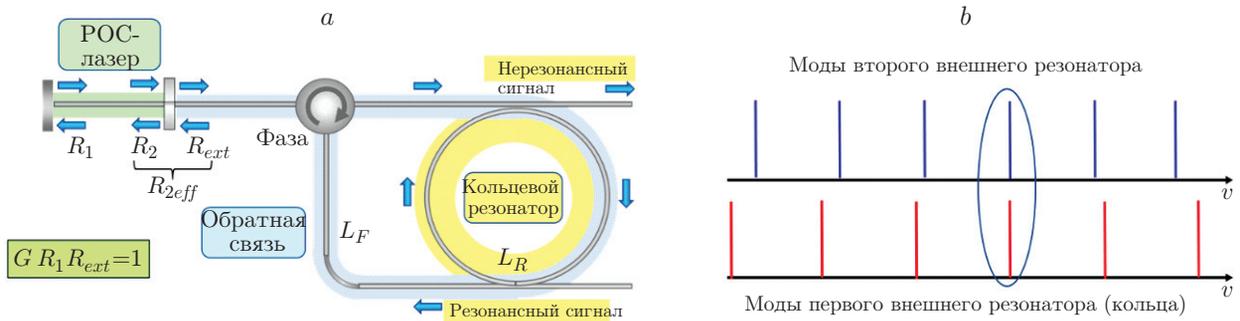


Рис. 1. Иллюстрация механизма захвата частоты внешнего кольцевого резонатора РОС-лазером: *a* — принципиальная схема лазера с внешним резонатором; *b* — положение мод, необходимое для поддержания стабильной работы лазера в режиме захвата частоты

Сужение линии генерации лазера и её стабилизация. Сужение ширины линии и стабилизация генерации полупроводникового лазера представляют значительный исследовательский интерес, обусловленный большим спросом на компактные экономичные узкополосные лазерные источники с высокой когерентностью, необходимые для большого числа приложений [16–20]. Среди них спектроскопия высокого разрешения, когерентная оптическая связь, распределённый оптический мониторинг, анализ оптического спектра и микроволновая фотоника [21–24]. Ширина линии генерации стандартных полупроводниковых РОС-лазеров (с распределённой обратной связью) обычно составляет несколько мегагерц [25]. Самозахват частоты лазера посредством внешней обратной связи является одним из наиболее перспективных механизмов сужения лазерной линии. Чтобы обеспечить эффект, часть оптического излучения, испускаемого лазером, возвращается в его резонатор, тем самым снижая порог на захваченной частоте [26]. Этот относительно простой метод позволяет создавать экономичные узкополосные лазерные источники на основе стандартных лазерных диодов, что делает его более привлекательным по сравнению с обычными лазерными системами на основе активной обратной связи. Один из наиболее интересных вариантов лазерной конфигурации с самозахватом частоты использует в петле слабой обратной связи узкополосный оптический фильтр [27]. Современный прогресс связан, в частности, с применением микрорезонаторов [28–35]. При использовании подобных резонаторов в режиме «шепчущей галереи» ширина линии генерации полупроводникового лазера может быть снижена до субкилогерцового диапазона частот в надёжной и компактной конфигурации [36]. Недостатками систем, применяющих микрорезонаторы с огромной добротностью ($\sim 10^{11}$), являются сложности настройки, регулировки, а также соединения волоконных и неволоконных элементов.

Альтернативным вариантом являются системы на основе волоконных резонаторов, обладающие меньшей добротностью, но способные обеспечить схожее сужение линии. В частности, такие решения представляют большой интерес для генерации радиочастотного спектра и распределённого бриллюэновского мониторинга, где волоконный резонатор одновременно может служить нелинейной средой для генерации бриллюэновского излучения со сдвигом частоты [37–43].

Развиваемый в представленной работе подход основан на эффекте захвата полупроводниковым лазером с распределённой обратной связью (РОС-лазером) собственной частоты внешнего волоконного резонатора, как показано на рис. 1, *a*. Внешние волоконные резонаторы могут быть изготовлены из стандартных компонентов и обладать низкой себестоимостью. Для реализации механизма самозахвата частоты излучение полупроводникового

РОС-лазера пропускается через внешний высокочастотный кольцевой резонатор, а затем через волокно обратной связи попадает обратно в резонатор РОС-лазера, навязывая ему генерацию на собственной частоте внешнего резонатора. Продемонстрировано значительное (более чем в 1000 раз) сужение линии генерации стандартного недорогого РОС-лазера, подключённого к внешнему волоконному кольцевому резонатору [44, 45]. После захвата частоты любое медленное изменение частоты моды волоконного резонатора (например, из-за колебаний температуры) приводит к одновременному изменению частоты генерации лазера. Однако в реальных условиях при наличии шумов окружающей среды стабильная работа лазера в режиме генерации одной продольной моды резонатора происходит в течение интервала времени, ограниченного несколькими секундами. Эти интервалы стабильной работы прерываются кратковременными скачками интенсивности генерации, вызванными перескоком мод резонатора. Несмотря на то что точная стабилизация тока накачки и фиксация температуры волокна позволяют увеличить эти интервалы до десятков минут, даже редкие перескоки мод, срывающие стабильную генерацию в режиме захвата частоты, делают невозможными многие практически важные применения лазеров этого типа [46].

Причина нестабильностей проиллюстрирована на рис. 1, *b*. Это нарушение нужного баланса длин кольцевого интерферометра и волокна оптической обратной связи в конфигурации лазера, вызванное изменениями температуры окружающей среды. Лазерная конфигурация представляет собой комбинацию полупроводникового лазера и двух внешних резонаторов: кольцевого интерферометра и резонатора, включающего волокно обратной связи [47]. При работе полупроводникового лазера в режиме захвата частоты кольца частота его генерации совпадает с резонансной частотой кольца. Однако устойчивая работа лазера в этом режиме возможна только тогда, когда резонансная частота кольца является также резонансной для второго внешнего резонатора. Поэтому для стабильной работы лазера в режиме захвата частоты необходима непрерывная подстройка резонанса второго внешнего резонатора под резонанс кольца. Это можно сделать через модуляцию тока лазерного диода или через контроль длины волокна второго внешнего резонатора через пьезоактуатор (см. рис. 1, *a*). Для этих целей в последующих работах была использована схема с активной оптоэлектронной обратной связью, управляемой простейшим контроллером типа USB-DAQ.

Одночастотный лазер. В [8] предложена волоконная конфигурация, в которой сужение линии генерации и стабилизация работы полупроводникового РОС-лазера происходят за счёт эффекта самозахвата частоты в сочетании с активной оптоэлектронной обратной связью, управляемой простейшим контроллером типа USB-DAQ (USB Data Acquisition). Важно, что в этой конфигурации сужение линии генерации полностью обеспечивается механизмом самозахвата частоты, тогда как активная обратная связь только помогает поддерживать этот режим пассивной стабилизации. Поэтому с точки зрения сложности исполнения используемых электронных схем предложенное комбинированное решение намного менее затратно, чем все известные схемы активной стабилизации, в частности основанные на методах Паунда — Древера — Холла (PDH) и Ханша — Куиллода, обычно применяемые в волоконных лазерах [48–50]. Кроме того, применяемый метод предоставляет возможность дополнительного контроля и настройки ширины линии лазера.

Экспериментальная конфигурация полупроводникового РОС-лазера, соединённого с кольцевым волоконным резонатором, показана на рис. 2, *a*. Стандартный лазерный диод (MITSUBISHI FU-68PDF-V520M27B), работающий на длине волны 1534,85 нм с выходной мощностью ~ 5 мВт, снабжён встроенным оптическим изолятором, ослабляющим мощность обратного излучения на ~ 30 дБ. Изолятор устраняет эффекты неконтролируемого обратного отражения и уменьшает мощность обратной связи, получаемой через внешний кольцевой резонатор. Чтобы реализовать механизм самозахвата, излучение лазера проходит через оптический циркулятор и вводится через ответвитель в кольцевой резонатор,

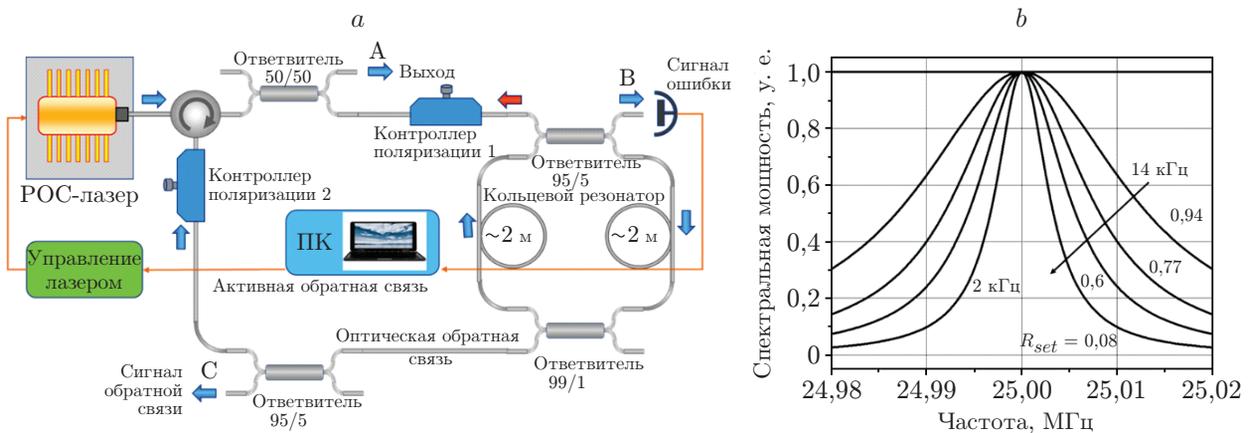


Рис. 2. Схема одночастотного лазера: *a* — принципиальная схема лазера; *b* — самогетеродинные спектры лазера, стабилизированного при разных уровнях сигнала В (доля от максимального)

который образован ответвителями 95/5 и 99/1 и включает ~ 4 м стандартного волокна SMF-28. Второй ответвитель направляет часть излучения, циркулирующего в резонаторе, через циркулятор обратно в РОС-лазер, обеспечивая пассивную обратную связь для захвата частоты.

Когда петля пассивной обратной связи разомкнута, лазер работает в свободном режиме. Его полная ширина линии генерации оценивается приблизительно в 10 МГц. При замкнутом контуре обратной связи устанавливается режим захвата частоты с резким (~ 3000 раз) сужением линии генерации лазера, измеряемой методом самогетеродинирования, до нескольких кГц [51]. В режиме самозахвата частоты с пассивной обратной связью ширина линии генерации лазера поддерживает минимальное значение в течение 1–100 с (в зависимости от уровня шумов окружающей среды). В остальное время она медленно флуктуирует в диапазоне (2,8–14) кГц до тех пор, пока не произойдет перескок мод. Задача оптоэлектронной обратной связи на основе недорогого многофункционального USB-контроллера DAQ NI USB-6009 (National Instrument), управляемого ПК, состоит в том, чтобы поддерживать работу лазера в режиме самозахвата частоты (т. е. не допускать выхода частоты отстройки из рабочего диапазона стабильной генерации), избегая скачков мод. Для этой цели мощность излучения, отражаемая кольцевым резонатором (порт В) и регистрируемая фотодетектором, должна поддерживаться постоянной на заданном уровне. Отклонение параметра отражённой мощности от установленного значения используется в качестве сигнала ошибки для микроконтроллера DAQ, который может регулировать рабочую частоту лазера в диапазоне порядка 1 ГГц за счёт слабого отклонения тока лазерного диода. При строгой привязке параметра мощности R к некоторой заданной величине R_{set} с помощью оптоэлектронной обратной связи происходит стабилизация как отстройки частоты лазера от пика пропускания кольцевого резонатора, так и ширины линии генерации лазера. Кривые на рис. 2, *b* показывают самогетеродинные спектры лазера, записанные с различными заданными значениями R_{set} . При минимуме $R_{set} = R_{min} \sim 0,08$ частота лазера совпадает с одним из пиков пропускания кольцевого резонатора, а ширина линии генерации принимает минимальное значение $\sim 2,8$ кГц. Подробные характеристики лазера описаны в [8].

Двухчастотный бриллюэновский лазер. В работе [9] была реализована волоконная конфигурация двухчастотного непрерывного лазера. В новой конфигурации, представленной на рис. 3, *a*, один и тот же кольцевой волоконный резонатор используется как

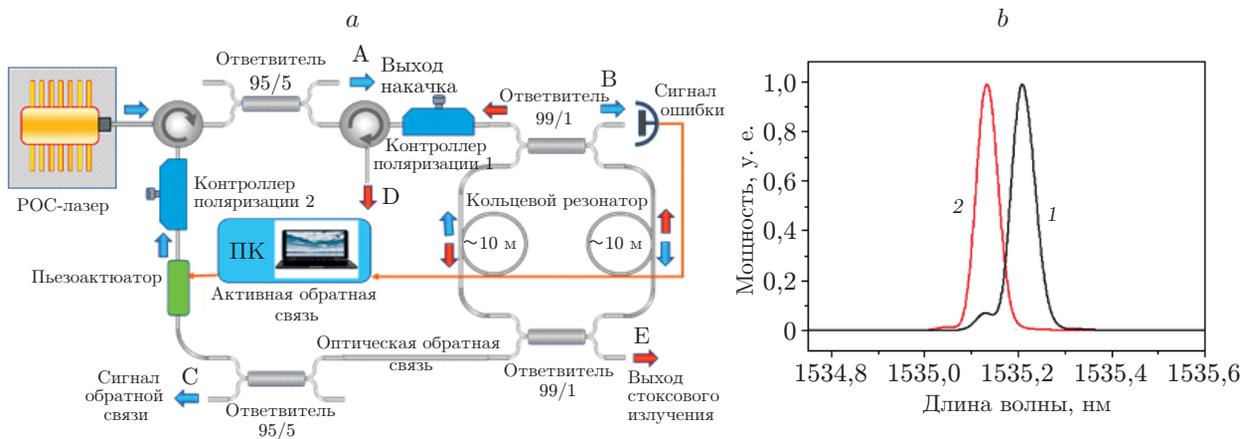


Рис. 3. Схема двухчастотного лазера: *a* — экспериментальная конфигурация двухчастотного бриллюэновского лазера; *b* — оптические спектры для двух лазерных каналов: частота накачки (2), стоксовая частота (1)

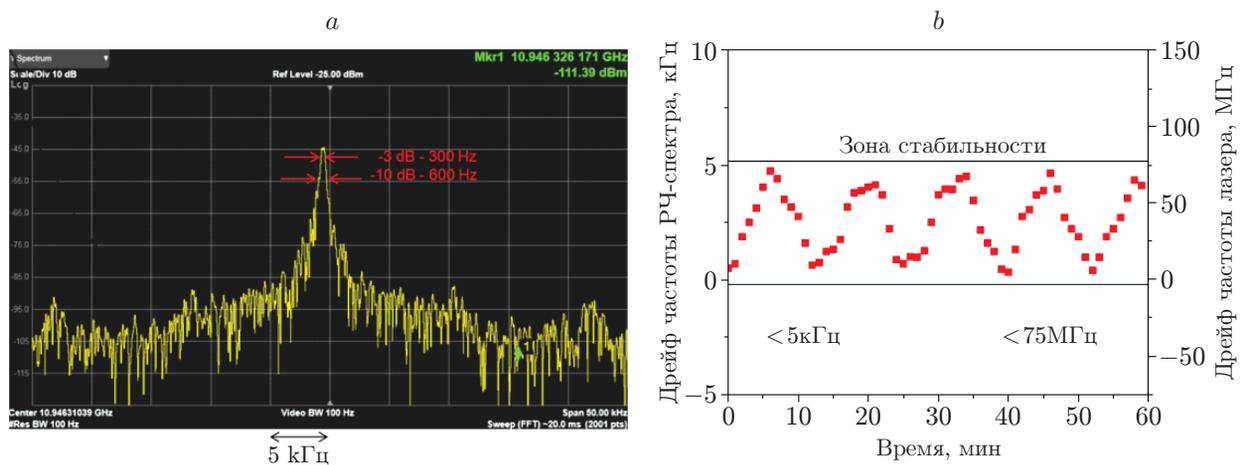


Рис. 4. Характеристики двухчастотного лазера: *a* — радиочастотный спектр сигнала биений между двумя выходными излучениями двухчастотного лазера, *b* — долговременная эволюция пиковой частоты спектра биений при работе активной термостабилизации лазерной конфигурации в целом

для самозахвата частоты РОС-лазера, так и для генерации стоксовой компоненты бриллюэновского излучения. Так же, как и в предыдущем случае, простая (и дешёвая) карта USB-DAQ используется для стабилизации системы, предотвращая скачки мод. Важно, что стабильная работа лазера на двух строго связанных частотах обеспечивается механизмом самозахвата частоты, в то время как петля активной обратной связи лишь помогает поддерживать этот режим. Механизм самозахвата частоты поддерживает непрерывную синхронизацию РОС-лазера с внешним кольцевым резонатором, обеспечивая идеальную связь лазера с кольцом для резонансной (малощумной) накачки бриллюэновской генерации.

Измеренные характеристики простого двухчастотного лазера находятся на уровне дорогостоящих аналогов. Лоренцевская ширина линии генерации (измеренная по методу [52, 53]) на частоте накачки и стоксового сигнала составляет < 270 Гц и < 110 Гц соответственно, а ширина радиочастотного (РЧ) спектра биений между ними < 300 Гц (рис. 4, *a*). Это является важным результатом особенно с учётом того, что система не

требует серьёзной стабилизации по температуре. Выходная мощность лазера составляет ~ 9 мВт и ~ 100 мкВт для накачки и стокового излучения соответственно и допускает дальнейшее масштабирование мощности внешними усилителями. При этом мощность лазера на частоте накачки может быть усилена с помощью волоконного эрбиевого усилителя (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA), в то время как использование внешнего бриллюэновского усилителя (изготовленного из того же волокна, что и кольцевой резонатор, и накачиваемого лазером, усиленным в EDFA) предпочтительней (и естественно) для узкополосного усиления стокового сигнала. Рабочие частоты лазера строго привязаны к резонансам кольцевого резонатора, и их дрейф, измеренный в эксперименте ($\sim 8,8$ МГц/мин), в основном определяется изменениями температуры окружающей среды.

Дрейф температуры окружающей среды является основным источником нестабильной работы двухчастотного лазера. Для уменьшения этого влияния лазерная конфигурация помещается в пенопластовую коробку, однако это не спасает от медленного дрейфа частоты лазера. Использование дополнительного терморегулятора, применяемого ко всей конфигурации лазера в целом, позволяет ограничить дрейф частоты лазера и минимизировать уширение радиочастотного спектра. Изменения температуры окружающей среды влияют как на длину кольцевого резонатора, так и на длину волокна контура обратной связи, изменяя взаимное положение их резонансных частот. Для стабильной работы лазера эти резонансы должны совпадать. Электронная схема обратной связи работает против температурного шума, стараясь всегда поддерживать совпадение резонансов. С этой целью она подстраивает фазовую задержку в контуре оптической обратной связи, плавно изменяя напряжение, подаваемое на пьезоактюатор. Однако динамический диапазон пьезоактюатора ограничен. Когда его предел исчерпан, фаза должна быть сброшена на целое число периодов, а это возможно только через скачкообразное изменение напряжения на пьезоактюаторе. Скачки управляющего сигнала на короткое время дестабилизируют лазер. Таким образом, имеющаяся система стабилизации (на пьезоактюаторе) позволяет стабилизировать лазерную генерацию, пока частота лазерной генерации находится в пределах определённого частотного диапазона. Когда под влиянием температурного дрейфа она выходит из этого диапазона, происходит скачок мод. При характерном дрейфе частоты лазера ~ 8 МГц/мин (в лабораторных условиях) типичное время между скачками мод составляет $\sim 7-10$ мин.

Для постоянной стабилизации лазера применялся дополнительный термоконтроль всего лазерного блока. Результат его работы продемонстрирован на рис. 4, *b*. В качестве сигнала ошибки в этой системе использовался электрический сигнал, подаваемый на пьезоактюатор. Когда его отклонение от среднего значения превышало определённый уровень, температура системы изменялась в сторону, обеспечивающую уменьшение этого отклонения. Типичное изменение температуры внутри лазерного блока за один термоимпульс составляло $\sim 0,1$ °С, а характерное время колебания температуры — 5–7 мин. Для контроля частотного дрейфа была разработана и реализована методика, основанная на непрерывном измерении пика радиочастотного спектра биений оптического излучения, регистрируемого с двух выходов лазера. Это обеспечивало долгосрочную стабильность работы лазера. При этом дрейф частоты лазера составлял < 80 МГц, а вариации пиковой частоты радиочастотного спектра биений были ограничены полосой < 5 кГц. Важно, что нахождение частоты биений в этих пределах диапазона полностью предотвращало скачки мод.

Бриллюэновский лазер на высокодобротном резонаторе. В [10] была предложена и исследована ещё одна конфигурация узкополосного двухчастотного лазера, представленная на рис. 5, *a*. В отличие от предыдущих двухчастотных лазерных конфигураций здесь использовался волоконный кольцевой резонатор, изготовленный (а затем включённый в конфигурацию) из одного волоконного ответвителя вместо двух, как обычно. Новая конструкция лазера позволила снизить оптические потери в кольцевом резонаторе (вдвое

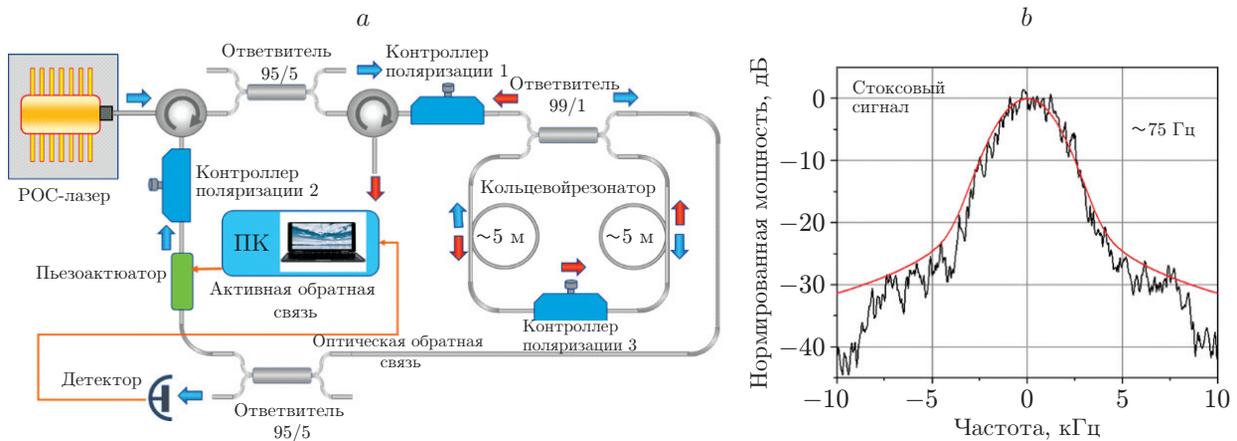


Рис. 5. Схема бриллюэновского лазера на высокодобротном резонаторе: *a* — экспериментальная конфигурация бриллюэновского лазера; *b* — самогетеродинный оптический спектр лазера

по сравнению с кольцевым резонатором с двумя подводными волокнами), обеспечивая повышенную добротность. Благодаря этому были значительно улучшены потребительские характеристики двухчастотного лазера. Выходная мощность по стоксовому излучению увеличена в 2 раза. Пороговая мощность бриллюэновской генерации снижена в 2 раза по сравнению с прежними работами. Лоренцевская ширина линии лазерного излучения стала уже на 30 % по сравнению с демонстрируемой ранее в [9].

В целом лазер производит непрерывное узкополосное излучение одновременно на частотах накачки и стоксового сигнала. Лазерный диод работает в режиме захвата частоты кольцевого волоконного резонатора, что обеспечивает сужение лоренцевской ширины линии в $\sim 10\,000$ раз до ~ 400 Гц. Работа лазера в этом режиме поддерживается активной оптоэлектронной обратной связью, управляемой простым микроконтроллером. Аккумуляция узкополосного излучения лазера накачки внутри кольцевого резонатора заставляет кольцевой резонатор работать как непрерывный бриллюэновский лазер, производящий излучение с лоренцевской шириной спектральной линии ~ 75 Гц (рис. 5, *b*). Насколько известно, это самая узкая ширина лазерной линии генерации, когда-либо зарегистрированная с РОС-лазерами в конфигурации с самозахватом частоты через внешний волоконный резонатор. Ранее лоренцевская ширина линии генерации ~ 125 Гц была получена с более сложной конфигурацией через захват частоты волоконной решётки [38] (для сравнения ширина линии генерации коммерческого лазера с захватом частоты на моде «шепчущей галереи» ~ 300 Гц [54]); типичная лоренцевская ширина линии генерации бриллюэновского лазера (на волоконном резонаторе 25 км) ~ 30 Гц [55]. Пороговая мощность накачки в нашем эксперименте $\sim 1,5$ мВт. Относительный шум интенсивности стоксового излучения составляет < -90 дБ/Гц, а фазовый шум составляет < -100 дБ/Гц для радиочастот > 30 кГц.

Сравнение рис. 2, *a*, 3, *a* и 5, *a* позволяет увидеть принципиальную разницу в механизме стабилизации лазера в рабочем режиме. В конфигурациях первых двух лазеров, основанных на эффекте захвата частоты, сигнал обратной связи увеличивается, когда полупроводниковый лазер захватывает частоту резонатора. В последнем случае кажется, что он принимает минимальное значение при захвате частоты. То, что это не так, становится понятным, если принять во внимание наличие в кольцевом резонаторе лазера наведенного двулучепреломления, которое изменяет поляризацию света при однократном прохождении кольца на перпендикулярную. Обнаруженный эффект был усилен и исполь-

зован в новой конфигурации лазера, собранного на волокне с сохранением поляризации [56]. Её преимуществом является гораздо лучшая устойчивость к внешним воздействиям, чем у всех предыдущих конфигураций узкополосных лазеров, рассмотренных в данной работе.

Применения лазеров для распределённых измерений. Хотя в настоящее время распределённые волоконные датчики на рэлеевском и бриллюэновском рассеянии [57–62] широко используются в нефтяной и газовой промышленности, атомной энергетике, при строительстве крупных инфраструктурных объектов, их относительно высокая стоимость остаётся основным фактором, ограничивающим диапазон их применений только ресурсоёмкими производствами. Ключевой и наиболее дорогой частью анализатора такого датчика является модуль задающего генератора. Разработанная в [12] конфигурация одночастотного лазера на волокне с сохранением поляризации была испытана в качестве задающего источника в рефлектометрической волоконной системе распределённого датчика вибрации. В эксперименте была оценена способность когерентного рефлектометра на основе полупроводникового лазера с захватом частоты обнаруживать и локализовать акустические возмущения в тестовой волоконной линии длиной 9 км. Было показано, что эффективность (соотношение сигнал/шум) обнаружения источника вибрации и точность его локализации в этом случае не хуже, чем в случае использования дорогостоящего штатного задающего генератора.

В [13] была изучена также способность системы восстанавливать частотный спектр возмущений, получена количественная оценка отношения сигнал/шум для распределённых измерений частоты вибрации на длине 4000 м в диапазоне частот 350–5600 Гц. Для сравнения те же измерения, на том же рефлектометре и в тех же условиях возбуждения возмущений были проведены с использованием коммерческого волоконного лазера (Koheras Adjustik, NKT Photonics), обладающего сверхузкой линией генерации (~ 100 Гц). Это позволило определить предельные параметры системы, обусловленные использованием полупроводникового лазера с захватом частоты. Таким образом, нами было количественно обосновано использование обычного телекоммуникационного полупроводникового лазера в режиме самозахвата частоты внешнего резонатора для работы в качестве задающего генератора когерентного рефлектометра, специализированного для распределённого детектирования вибраций. Полученные значения отношения сигнал/шум подтверждают способность системы выполнять распределённое измерение частот вибрации с пространственным разрешением ~ 10 м.

Возможность непрерывной генерации двух строго связанных частот делает лазер привлекательным для многих приложений, включая спектроскопию высокого разрешения, фазово-когерентную оптическую связь, распределённый волоконный мониторинг, когерентный оптический анализ спектра и микроволновую фотонику. Для многих из них субкилогерцовая ширина линий генерации является необходимым условием, для других более важна простота конфигурации. В [15] была изучена возможность применения двухчастотного узкополосного лазера, представленного на рис. 3, *a* в качестве задающего генератора бриллюэновского анализатора. Заметим, что в отличие от других подобных решений на основе бриллюэновских лазеров [63, 64] в представленной работе впервые был задействован лазер, работающий на эффекте захвата частоты. Позднее эта идея была заимствована в [65].

Измеренные характеристики лазера значительно превосходят требования к лазерным модулям (< 15 кГц), обычно используемым в бриллюэновских анализаторах BOTDA (Brillouin Optical Time-Domain Analyser) [66]. На рис. 6, *a* представлена оптическая схема анализатора BOTDA, предназначенного для работы с распределённым волоконным датчиком температуры и натяжения. Использование лазера, работающего на двух фиксированных частотах, значительно упростило систему BOTDA, так как позволило исключить

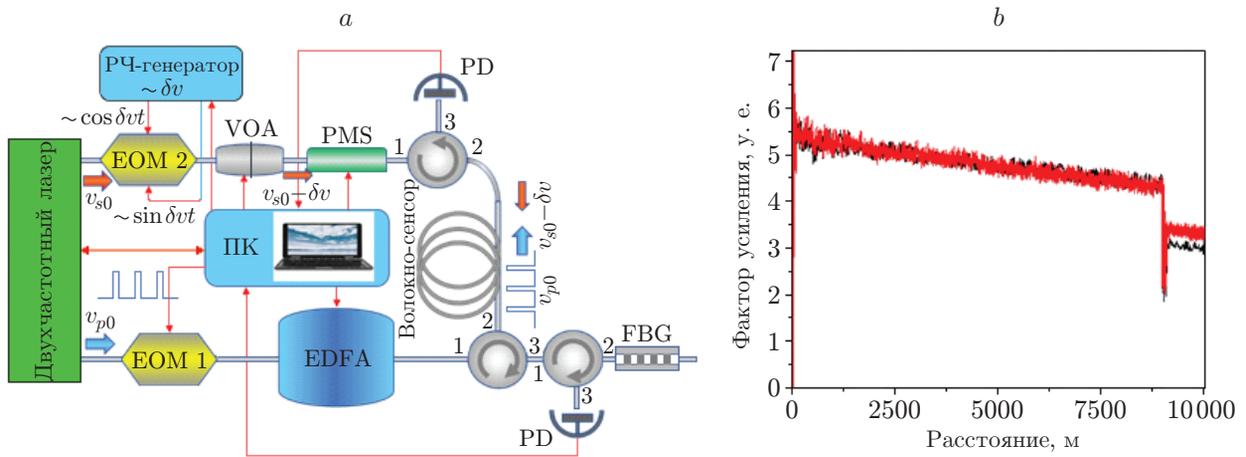


Рис. 6. Применение двухчастотного лазера для распределённого измерения температуры и напряжения: *a* — схема анализатора; *b* — типичные рефлектограммы BOTDA, записанные для ~ 9 км волоконной линии на разработанном (серая кривая) и коммерческом (чёрная кривая) анализаторах. Обозначения: EOM — электрооптический модулятор, VOA — перестраиваемый аттенюатор, PMS — поляризационный смеситель, FBG — фильтр на волоконной решётке, PD — фотодетектор

широкополосный электрооптический модулятор (EOM) и мощный высокочастотный микроволновый генератор, питающий EOM, из традиционной конфигурации BOTDA, основанной на одном узкополосном лазерном источнике. Эти относительно дорогие устройства составляют значительную часть стоимости системы BOTDA. Кроме того, в механизме работы нашего лазера, обеспечивающем самостабилизированную генерацию оптического сигнала на стоксовой частоте, не используется дорогостоящая электронная схема захвата длины волны, которая была частью бриллюэновских лазеров, предложенных ранее для применений в BOTDA [63]. Вместо этого в предложенной нами установке BOTDA используется недорогой электрооптический модулятор, управляемый от стандартного радиочастотного генератора с сигналом до ~ 1 ГГц. В этой конфигурации основной сдвиг частоты (~ 11 ГГц) обеспечивается самим лазером, а электрооптический модулятор используется только для дополнительной перестройки частоты в небольшом диапазоне. Причём диапазона перестройки радиочастотного генератора до 100 МГц оказалось вполне достаточно для всех измерений, которые были проведены при тестировании анализатора на специально разработанной калибровочной волоконной линии. Под контролем коммерческого BOTDA была оценена способность недорогого лазерного решения работать с датчиком BOTDA и продемонстрированы распределённые измерения бриллюэновского сдвига частоты в волоконной тестовой линии длиной 10 км с пространственным разрешением 1,5 м и точностью до ~ 2 °C. На рис. 6, *b* показаны типичные рефлектограммы, записанные анализатором BOTDA (серая кривая) и коммерческим анализатором (чёрная кривая) (OZ-Optics, Канада). Никакого ухудшения рабочих характеристик системы, связанных с использованием двухчастотного лазера, в ходе измерений не наблюдалось. Детали её работы и потребительские характеристики подробно описаны в [15].

Заключение. При разработке стабильного узкополосного лазерного источника в данной работе был использован стандартный полупроводниковый РОС-лазер, стабилизированный в режиме самозахвата частоты посредством активной оптоэлектронной обратной связи, управляемой с помощью недорогой карты USB-DAQ (через модуляцию тока РОС-лазера или пьезоактюатор, контролирующей длину волокна в цепи оптической обрат-

ной связи). Для двухчастотной генерации один и тот же кольцевой волоконный резонатор используется как для самозахвата частоты РОС-лазера, так и для генерации стоксовой компоненты бриллюэновского излучения. При этом предельно достижимые значения ширины линии генерации на бриллюэновской частоте определяются добротностью внешнего кольцевого резонатора. Для достижения рекордно узкой линии генерации (~ 75 Гц) использовался высокодобротный кольцевой резонатор, изготовленный из одного волоконного ответвителя. Для уменьшения дрейфа частоты лазера до < 80 МГц и подавления скачка мод специальный термоконтроль был применён ко всему лазерному блоку. Также была исследована возможность использования узкополосного двухчастотного лазера в качестве задающего генератора бриллюэновского анализатора BOTDA, что значительно упрощает его конструкцию. Сравнение с коммерческой системой продемонстрировало отсутствие какого-либо ухудшения характеристик BOTDA, обусловленных использованием разработанного двухчастотного лазера.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-12-00457П) и Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-581).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Starunov V. S., Fabelinskii I. L.** Stimulated Mandel'shtam–Brillouin scattering and stimulated entropy (temperature) scattering of light // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 1969. **98**, N 7. P. 441–491.
2. **Рубенчик А. М.** О проблеме лазерного термоядерного синтеза // *Автометрия*. 1979. **5**. С. 80–93.
3. **Петров М. П., Кузин Е. А.** Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах и обращение волнового фронта // *Физика твёрдого тела*. 1983. **25**, № 2. С. 334–338.
4. **Dianov E. M., Karasik A. Y., Lutchnikov A. V., Pilipetskii A. N.** Saturation effects at backward-stimulated scattering in the single-mode regime of interaction // *Optical and Quantum Electronics*. 1989. **21**, N 5. P. 381–395.
5. **Agrawal G.** *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego: Academic Press, 2001.
6. **Kuzin E., Petrov M., Fotiadi A.** Fiber-optic stimulated-Brillouin-scattering amplifier // *Soviet Physics Technical Physics*. 1988. **33**, N 2. P. 206–209.
7. **Kuzin E. A., Petrov M. P., Fotiadi A. A.** Phase conjugation by SMBS in optical fibers // *Optical Phase Conjugation* /M. Gower D. P. Springer-Verlag, 1994. P. 74–96.
8. **Spirin V. V., Bueno Escobedo J. L., Korobko D. A. et al.** Stabilizing DFB laser injection-locked to an external fiber-optic ring resonator // *Opt. Express*. 2020. **28**, N 1. P. 478–484.
9. **Spirin V. V., Bueno Escobedo J. L., Korobko D. A. et al.** Dual-frequency laser comprising a single fiber ring cavity for self-injection locking of DFB laser diode and Brillouin lasing // *Opt. Express*. 2020. **28**, N 25. P. 37322–37333.
10. **Spirin V. V., Bueno Escobedo J. L., Miridonov S. V. et al.** Sub-kilohertz Brillouin fiber laser with stabilized self-injection locked DFB pump laser // *Optics & Laser Technology*. 2021. **141**. P. 107156.
11. **Spirin V. V., López-Mercado C. A., Mégret P., Fotiadi A. A.** Fiber Laser for Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry. INTECH, 2018. P. 197–211.
12. **Bueno Escobedo J. L., Spirin V. V., López-Mercado C. A. et al.** Self-injection locking of the DFB laser through an external ring fiber cavity: Application for phase sensitive OTDR acoustic sensor // *Results in Physics*. 2017. **7**. P. 641–643.

13. **Bueno Escobedo J. L., Jason J., López-Mercado C. A. et al.** Distributed measurements of vibration frequency using phase-OTDR with a DFB laser self-stabilized through PM fiber ring cavity // *Results in Physics*. 2019. **12**. P. 1840–1842.
14. **Спирин В. В., Lopez-Mercado C. A., Wuilpart M. и др.** Использование полупроводникового лазера с захватом частоты в качестве задающего оптического генератора когерентного рефлектометра для распределённых измерений частоты вибраций // *Приборы и техника эксперимента*. 2020. № 4. С. 40–44.
15. **Lopez-Mercado C. A., Korobko D. A., Zolotovskii I. O., Fotiadi A. A.** Application of dual-frequency self-injection locked DFB laser for Brillouin optical time domain analysis // *Sensors*. 2021. **21**, N 20. P. 6859.
16. **Zhongmin Yang C. L., Shanhui Xu, Changsheng Yang.** Single-frequency fiber lasers. optical and fiber communications reports / Eds. Arun K., Majumdar C. L., USA: Springer, 2019. *Optical and Fiber Communications Reports*.
17. **Владимирская А. Д., Скворцов М. И., Вольф А. А. и др.** Одночастотный волоконный тулиевый лазер с распределенной обратной связью // *Автометрия*. 2020. **56**, № 4. С. 103–110. DOI: 10.15372/AUT20200412.
18. **Бабин С. А., Ватник И. Д.** Волоконные лазеры со случайной распределённой обратной связью на рэлеевском рассеянии // *Автометрия*. 2013. **49**, № 4. С. 3–29.
19. **Popov S. M., Butov O. V., Bazakutsa A. P. et al.** Random lasing in a short Er-doped artificial Rayleigh fiber // *Results in Physics*. 2020. **16**. P. 102868.
20. **Popov S. M., Butov O. V., Chamorovski Y. K.** Narrow linewidth short cavity Brillouin random laser based on Bragg grating array fiber and dynamical population inversion gratings // *Results in Physics*. 2018. **9**. P. 806–808.
21. **Кульчин Ю. Н., Витрик О. Б., Дышлюк А. В. и др.** Рефлектометрический метод детектирования сигналов от датчиков на волоконных брэгговских решетках // *Автометрия*. 2008. **44**, № 2. С. 113–118.
22. **Бабин С. А., Кузнецов А. Г., Шелемба И. С.** Сравнение методов измерения распределения температуры с помощью брэгговских решеток и комбинационного рассеяния света в оптических волокнах // *Автометрия*. 2010. **46**, № 4. С. 70–77.
23. **Шапиро Е. Г., Шапиро Д. А.** Оптимизация пропускной способности волоконной линии связи с нелинейной памятью // *Автометрия*. 2018. **54**, № 4. С. 107–116. DOI: 10.15372/AUT20180414.
24. **Штейнберг И. Ш., Твердохлеб П. Е., Беликов А. Ю.** Анализ и отображение внутренних неоднородностей прозрачных оптических материалов путём трёхмерного лазерного гетеродинного микронзондирования // *Автометрия*. 2018. **54**, № 6. С. 21–33. DOI: 10.15372/AUT20180603.
25. **Fang Z., Cai H., Chen G., Qu R.** *Single Frequency Semiconductor Lasers*. Springer, 2017. 306 p.
26. **Petermann K.** External optical feedback phenomena in semiconductor lasers // *IEEE Journ. Selected Topics in Quantum Electronics*. 1995. **1**, N 2. P. 480–489.
27. **Ohtsubo J.** *Semiconductor Lasers: Stability, Instability and Chaos*. Springer, 2012. 572 p.
28. **Galiev R., Pavlov N., Kondratiev N. et al.** Spectrum collapse, narrow linewidth, and Bogatov effect in diode lasers locked to high-Q optical microresonators // *Opt. Express*. 2018. **26**, № 23. P. 30509–30522.
29. **Liang W., Ilchenko V., Eliyahu D. et al.** Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser // *Nature Communications*. 2015. **6**, N 1. P. 1–6.

30. **Lan T., Cao Z., Huang L. et al.** Ultra-narrow-linewidth DFB laser array based on dual-cavity feedback // *Opt. Express*. 2022. **30**, N 9. P. 14617–14628.
31. **Li F., Huang L., Dang L. et al.** Self-adaptive single frequency laser assisted by distributed feedbacks // arXiv preprint arXiv: 2011.13840. 2020.
32. **Geng J., Yang L., Zhao S., Zhang Y.** Resonant micro-optical gyro based on self-injection locking // *Opt. Express*. 2020. **28**, N 22. P. 32907–32915.
33. **Huang D., Tran M. A., Guo J. et al.** High-power sub-kHz linewidth lasers fully integrated on silicon // *Optica*. 2019. **6**, N 6. P. 745–752.
34. **Shao S., Li J., Wu Y. et al.** Modulation bandwidth enhanced self-injection locking laser with an external high-Q microring reflector // *Opt. Lett.* 2021. **46**, N 13. P. 3251–3254.
35. **Торопов А., Качанова М., Живодков Ю. и др.** Сверхминиатюрные излучатели на основе полупроводниковых наноструктур // *Автометрия*. 2020. **56**, № 5. С. 81.
36. **Jiang L., Shi L., Luo J. et al.** Simultaneous self-injection locking of two VCSELs to a single whispering-gallery-mode microcavity // *Optics Express*. 2021. **29**, N 23. C. 37845–37851.
37. **Spirin V. V., López-Mercado C. A., Kablukov S. I. et al.** Single cut technique for adjustment of doubly resonant Brillouin laser cavities // *Optics Letters*. 2013. **38**, N 14. P. 2528.
38. **Wei F., Yang F., Zhang X. et al.** Subkilohertz linewidth reduction of a DFB diode laser using self-injection locking with a fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity // *Opt. Express*. 2016. **24**, N 15. P. 17406-15.
39. **Spirin V., López-Mercado C., Mégret P., Fotiadi A.** Single-mode Brillouin fiber laser passively stabilized at resonance frequency with self-injection locked pump laser // *Laser Physics Letters*. 2012. **9**, N 5. P. 377.
40. **Spirin V. V., López-Mercado C. A., Kinet D., et al.** A single-longitudinal-mode Brillouin fiber laser passively stabilized at the pump resonance frequency with a dynamic population inversion grating // *Laser Physics Letters*. 2013. **10**, N 1. P. 015102.
41. **Spirin V. V., Castro M., López-Mercado C. A. et al.** Optical locking of two semiconductor lasers through high-order Brillouin Stokes components in optical fiber // *Laser Phys.* 2012. **22**, N 4. P. 760–764.
42. **Preda C. E., Fotiadi A. A., Megret P.** Numerical approximation for Brillouin fiber ring resonator // *Opt Express*. 2012. **20**, N 5. P. 5783-8.
43. **Korobko D., Zolotovskii I., Svetukhin V. et al.** Detuning effects in Brillouin ring microresonator laser // *Optics Express*. 2020. **28**, N 4. P. 4962–4972.
44. **López-Mercado C. A., Spirin V. V., Bueno Escobedo J. L. et al.** Locking of the DFB laser through fiber optic resonator on different coupling regimes // *Opt. Commun.* 2016. **359**. P. 195–199.
45. **Bueno Escobedo J. L., Spirin V. V., López-Mercado C. A. et al.** Self-injection locking of the DFB laser through an external ring fiber cavity: Polarization behavior // *Results in Physics*. 2016. **6**. P. 59–60.
46. **Geng J., Yang L., Liang J. et al.** Stability in self-injection locking of the DFB laser through a fiber optic resonator // *Opt. Communications*. 2022. **505**. P. 127531.
47. **Korobko D. A., Zolotovskii I. O., Panajotov K. et al.** Self-injection-locking linewidth narrowing in a semiconductor laser coupled to an external fiber-optic ring resonator // *Opt. Communications*. 2017. **405**. P. 253–258.
48. **Hansch T., Couillaud B.** Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity // *Optics Communications*. 1980. **35**, N 3. P. 441–444.
49. **Alnis J., Matveev A., Kolachevsky N. et al.** Subhertz linewidth diode lasers by stabilization to vibrationally and thermally compensated ultralow-expansion glass Fabry-Pérot cavities // *Phys. Rev. A*. 2008. **77**, N 5. P. 053809.

50. **Idjadi M. H., Aflatouni F.** Integrated Pound-Drever-Hall laser stabilization system in silicon // Nat Commun. 2017. **8**, N 1. P. 1209.
51. **Derickson D., Hentschel C., Vobis J.** Fiber Optic Test and Measurement. Prentice Hall PTR New Jersey, 1998. 642 p.
52. **Mercer L. B.** 1/f Frequency Noise Effects on Self-Heterodyne Linewidth Measurements // IEEE Lightwave Technology. 1991. **9**, N 4. P. 485–493.
53. **Chen M., Meng Z., Wang J., Chen W.** Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting // Optics Express. 2015. **23**, N 5. P. 6803–6808.
54. **Fomiryakov E., Kharasov D., Nanii O. E. et al.** New approach to laser characterization using delayed self-heterodyne interferometry // Journal of Lightwave Technology. 2021. **39**, N 15. P. 5191–5196.
55. **Ou Z., Bao X., Li Y. et al.** Ultranarrow linewidth Brillouin fiber laser // IEEE Photonics Technology Letters. 2014. **26**, N 20. P. 2058–2061.
56. **Паняев И. С., Итрин П. А., Коробко Д. А., Фотиади А. А.** Самозахват частоты и стабилизация узкополосной генерации полупроводникового РОС-лазера в схеме с внешним резонатором на волокне с сохранением поляризации // X Международный семинар по волоконным лазерам. Новосибирск, 2022. С. 184–185.
57. **Hartog A. H.** An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Boca Raton: CRC Press, 2017. 472 p.
58. **Lu Y., Zhu T., Chen L., Bao X.** Distributed Vibration Sensor Based on Coherent Detection of Phase-OTDR // Journal of Lightwave Technology. 2010. **28**, N 22. P. 3243–3249.
59. **Peng F., Wu H., Jia X.-H. et al.** Ultra-long high-sensitivity Φ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines // Optics Express. 2014. **22**, N 11. P. 13804–13810.
60. **Gorshkov B. G., Yüksel K., Fotiadi A. A. et al.** Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // Sensors. 2022. **22**, N 3. P. 1033.
61. **Faustov A. V., Gusarov A. V., Mégret P. et al.** The use of optical frequency-domain reflectometry in remote distributed measurements of the γ -radiation dose // Technical Physics Letters. 2015. **41**, N 5. P. 414–417.
62. **Faustov A. V., Gusarov A. V., Mégret P. et al.** Application of phosphate doped fibers for OFDR dosimetry // Results in Physics. 2016. **6**. P. 86–87.
63. **Rossi L., Marini D., Bastianini F., Bolognini G.** Analysis of enhanced-performance fibre Brillouin ring laser for Brillouin sensing applications // Optics Express. 2019. **27**, N 20. P. 29448–29459.
64. **Marini D., Iuliano M., Bastianini F., Bolognini G.** BOTDA Sensing Employing a Modified Brillouin Fiber Laser Probe Source // Journal of Lightwave Technology. 2018. **36**, N 4. P. 1131–1137.
65. **Rossi L., Bastianini F., Bolognini G.** Study of injection-locked stabilized, short cavity Brillouin ring laser source design for fiber sensing applications // Journ. Eur. Opt. Society-Rapid Publ. 2022. **18**, N 1. P. 5.
66. **Soto M. A.** Distributed Brillouin Sensing: Time-Domain Techniques / Handbook of Optical Fibers. Singapore: Springer, 2018.

Поступила в редакцию 31.10.2022

После доработки 22.11.2022

Принята к публикации 02.12.2022