ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 4, с. 40–44

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА С ЗАХВАТОМ ЧАСТОТЫ В КАЧЕСТВЕ ЗАДАЮЩЕГО ОПТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА КОГЕРЕНТНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИЙ[1]

© 2020 г. В. В. Спирин[a], C. A. López-Mercado[a], M. Wuilpart[b], Д. А. Коробко[c], И. О. Золотовский[c], А. А. Фотиади[b,c,d,*]

[a] *Исследовательский центр CICESE, Ensenada, 22860, Mexico*

[b] *Université de Mons, Place du Parc 20, 7000 Mons, Belgium*

[c] *Ульяновский государственный университет*
Россия, 432970, Ульяновск, ул. Льва Толстого, 42

[d] *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН*
Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26

*****e-mail: fotiadi@mail.ru*

Поступила в редакцию 08.03.2020 г.
После доработки 19.03.2020 г.
Принята к публикации 20.03.2020 г.

Стандартный полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью, самостабилизированный через эффект захвата частоты внешнего волоконного кольцевого резонатора, способен заменить штатный задающий генератор когерентного рефлектометра в системе распределенного волоконного датчика вибраций. Для количественной оценки способности системы восстанавливать частотный спектр вибраций проведено прямое сравнение отношения сигнал/шум, измеренного в конфигурациях с полупроводниковым и эталонным задающим генератором. Распределенные измерения спектров вибраций с частотами до 5600 Гц и пространственным разрешением 10 м при воздействии на оптическое волокно на расстоянии ~3500 м демонстрируют отношение сигнал/шум выше ~8 дБ для обеих конфигурации. Различие между конфигурациями составило <2 дБ во всем спектральном диапазоне.

DOI: 10.31857/S0032816220050055

В последнее десятилетие активно развивались системы оптической когерентной рефлектометрии, специализированные для применений в системах акустического мониторинга, таких как охрана специальных объектов, нефте- и газопроводов, железнодорожного полотна и т.д. [1–3]. Основанная на эффектах обратного рэлеевского рассеяния в оптических волокнах, такая система использует в качестве задающего генератора стабилизированный лазерный излучатель высокой когерентности, обеспечивающий ширину линии генерации в несколько килогерц и дрейф частоты менее ~10 МГц/мин [4, 5].

Стандартные полупроводниковые лазеры с распределенной обратной связью не соответствуют необходимым требованиям когерентности, так как типичная ширина их линии генерации составляет несколько мегагерц. Однако спектральные характеристики полупроводникового лазера могут быть значительно улучшены в оптической конфигурации, обеспечивающей захват лазером частоты внешнего волоконного резонатора [6–10]. При этом ширина линии генерации полупроводникового лазера может быть сужена на несколько порядков (до нескольких килогерц), а стабильность частоты генерации в режиме захвата частоты определяется стабильностью резонансной частоты внешнего резонатора.

Описанный эффект открывает перспективы создания доступных когерентных рефлектометров для широкого класса новых применений [11, 12]. В эксперименте [13] нами была оценена способность когерентного рефлектометра на основе полупроводникового лазера с захватом частоты обнаруживать и локализовать акустические возмущения в тестовой волоконной линии длиной 4.5 км. Было показано, что эффективность (соот-

[1] Результаты данного исследования были представлены и обсуждены на третьей международной конференции “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2020” (http://or-2020.permsc.ru/, 22–24 сентября, Россия, Пермь).

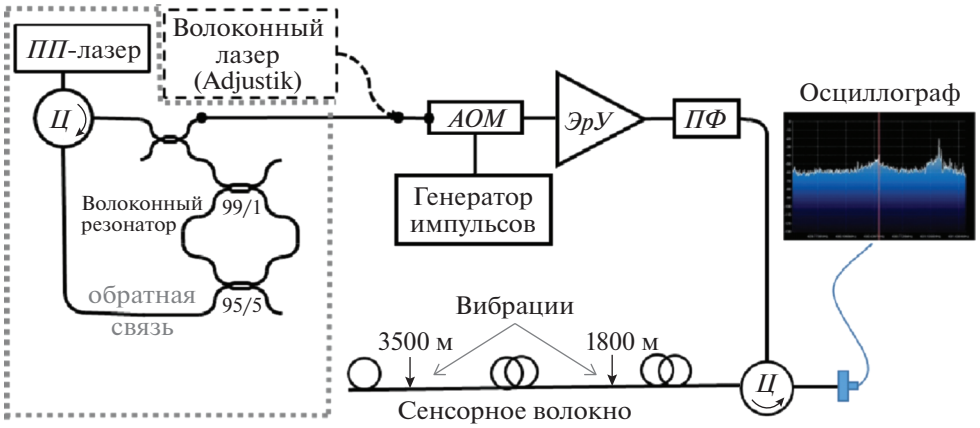

Рис. 1. Экспериментальная установка для распределенного изменения спектра вибраций с использованием полупроводникового или коммерческого волоконного лазера. *ПП*-лазер – полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью, *АОМ* – акустооптический модулятор, *ЭрУ* – эрбиевый волоконный усилитель, *ПФ* – полосовой фильтр, *Ц* – циркулятор.

ношение сигнал/шум) обнаружения источника вибрации и точность его локализации в этом случае не хуже, чем в случае использования дорогостоящего штатного задающего генератора.

В данной статье приведены результаты новых экспериментов [14] по изучению особенностей использования полупроводникового лазера с захватом частоты в системе когерентного рефлектометра. Изучена способность системы восстанавливать частотный спектр возмущений, получена количественная оценка отношения сигнал/шум для распределенных 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, обладающего сверхузкой линией генерации (~100 Гц). Это позволило определить предельные параметры системы, обусловленные использованием полупроводникового лазера с захватом частоты.

Экспериментальная конфигурация распределенного датчика вибраций на основе когерентного рефлектометра показана на рис. 1. Сенсорная волоконная линия (SMF28, Corning Inc.) длиной $L_0 = 4$ км опрашивается импульсными сигналами с пиковой мощностью ~ 100 мВт и длительностью ~100 нс (пространственное разрешение ~10 м). Импульсы с частотой повторения f_0 формируются акустооптическим модулятором (*АОМ*) из излучения узкополосного задающего генератора, усиленного эрбиевым усилителем (*ЭрУ*). Полосовой фильтр 2 ГГц (*ПФ*) используется для подавления шумов от спонтанной люминесценции.

Сенсорное волокно подвергалось вибрациям, возбуждаемых в точке 1800 м пьезопреобразователем и в точке 3500 м шейкером. В частности, для дистанционного измерения спектра вибраций волокно в точке 3500 м было пропущено через пластиковую трубку длиной 2 м, а вибрации в волокно передавались от вибратора (шейкера), примыкающего к трубке. Исследования проводились при частоте вибраций 350, 500, 1200, 3700 и 5600 Гц.

В качестве задающего генератора в эксперименте использовались два оптических источника. Первый – это обычный полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью, специализированный для телекоммуникационных приложений. В свободном режиме лазер вырабатывает излучение на длине волны ~1548.5 нм с выходной мощностью ~7.4 мВт и шириной линии генерации ~1 МГц.

Для принудительной работы лазера в режиме захвата частоты волоконный выход лазера через линию обратной связи, содержащую оптический циркулятор и кольцевой волоконный фильтр [15, 16], сваренный из двух волоконных ответвителей на основе оптического волокна с сохранением поляризации общей длиной 3.75 м, замкнут сам на себя. В режиме захвата частоты происходит резкое сужение ширины линии генерации и самостабилизация частоты лазера с генерацией одной продольной моды в полосе менее ~6 кГц [9].

Использование волоконно-оптических компонентов с сохранением поляризации позволяет избежать скачкообразного изменения состояния поляризации лазера, что является основным источником нестабильности [17], приводящей к срыву генерации лазера в режиме захвата частоты. Для поддержания работы лазера в режиме самозахвата частоты внешнего резонатора ток лазерного диода 50 мА (пороговый ток 10 мА) и рабочая температура 25°C лазерной конфигурации были экспериментально подобраны для достижения наилуч-

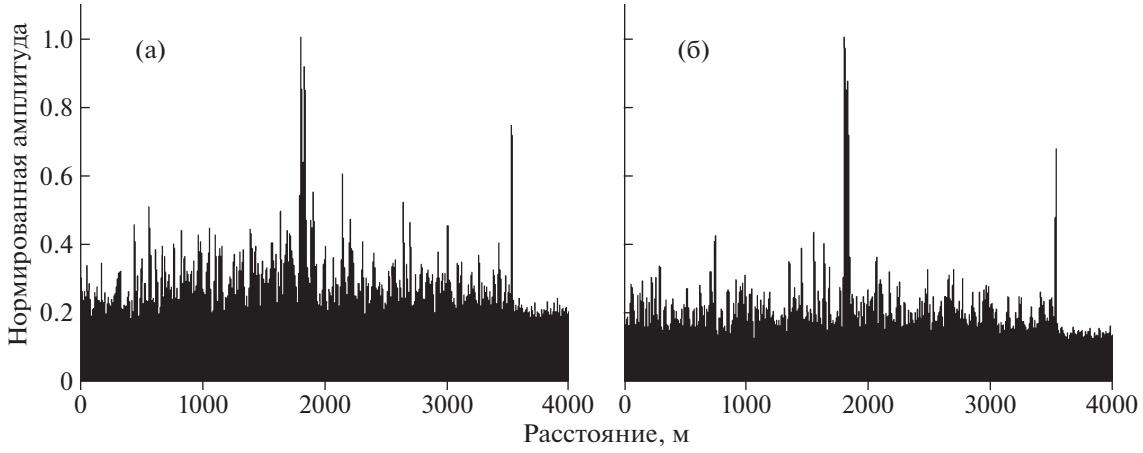

Рис. 2. Примеры рефлектограмм, полученных с помощью полупроводникового (**а**) и коммерческого волоконного лазера (**б**). Пики на рефлектограммах показывают локализацию точек приложения вибраций.

шего результата и стабилизированы с точностью ~0.3% [18].

Для защиты лазера от внешних возмущений вся лазерная система была помещена в полиуретановую термо- и шумоизолирующую коробку. В этих условиях дрейф частоты лазера в основном определялся температурной стабильностью внешнего кольцевого резонатора и, по оценкам, составлял менее ~30 МГц/мин. Продолжительность непрерывной работы лазера в режиме самозахвата частоты (между событиями перескока мод) – до ~30 мин.

Второй лазер, использованный в эксперименте в качестве эталонного задающего генератора, – коммерческий волоконный лазер (Koheras Adjustik, NKT Photonics), работающий на длине волны ~1552.5 нм с выходной мощностью ~40 мВт и шириной линии ~100 Гц. Согласно спецификации лазер имеет дрейф частоты ~1 МГц/мин.

В процессе опроса сенсорного волокна каждый пробный импульс, вводимый в волокно, генерирует сигнал обратного рассеяния, который отцифровывается быстрым фотоприемником с помощью цифрового преобразователя. Исходная рефлектограмма состоит из $M = 8000$ точек, соответствующих равномерному распределению по длине волокна, т.е. разрешение выборки составляет ~0.5 м. Для анализа вибраций используется $N = 932$ последовательно записанных рефлектограмм, образующих сигнальную матрицу $N \times M$ $\{s_{nm}\}$.

При ее обработке каждый матричный элемент s_{nm} усредняется по 20 ближайшим элементам строки (т.е. в пространственном домене): $\tilde{s}_{nm} = \frac{1}{w}\sum_{k=m-(w-1)/2}^{m+(w-1)/2} s_{nk}$, где $w = 21$. Эта процедура сглаживает записанные рефлектограммы, т.е. отфильтровывает шум сигнала вне пространственного спектра, соответствующего разрешению ~10 м. Дальнейшая обработка сигналов применялась к столбцам матрицы (т.е. к временной области): применение алгоритма с движущимся дифференциалом [13, 14] позволяет уменьшить шумовой фон и приводит к результирующему сигналу, приведенному на рис. 2, с ярко выраженными пиками в позициях приложенных возмущений.

Спектральная функция $U(f_k, x_m) = FFT(\tilde{s}_{nm}, m, k)$ частот $f_k = f_0(k-1)/(N-1)$ описывает спектр колебаний в точке волокна $x_m = L_0(m-1)/(M-1)$, который получается из $\{\tilde{s}_{nm}\}$ быстрым преобразованием Фурье по индексу n.

На рис. 3 показан спектр $U(f_k, x_m)$, зарегистрированный для частоты колебаний ~500 Гц в точке $x_m \sim 3500m$, полученный с помощью полупроводникового (рис. 3а) и коммерческого лазера (рис. 3б). Для уменьшения флуктуаций в отклике [19] (связанных со стохастическими флуктуациями ширины пика и уровня фона) для каждой частоты было выполнено несколько (5–10) измерений, и представленные значения отношения сигнал/шум – это усредненные значения для каждой частоты.

Для конфигурации с полупроводниковым лазером (рис. 3а) пик спектра превышает максимальный уровень шума примерно в 10 раз, обеспечивая надежное распознавание приложенной частоты колебаний. Отношение сигнал/шум, определяемое как отношение между пиковым значением спектра и среднеквадратичным уровнем спектрального шума, оценивается как ~9.4 дБ. Для конфигурации с коммерческим лазером (рис. 3б) эти значения почти такие же, ~9 раз и 9.0 дБ соответственно.

Зависимость отношения сигнал/шум от частоты колебаний показана на рис. 4. Видно, что отношение сигнал/шум плавно увеличивается с увеличением частоты вибрации. Это может быть объяснено сужением пика спектра, восстановленного с помощью быстрого преобразования

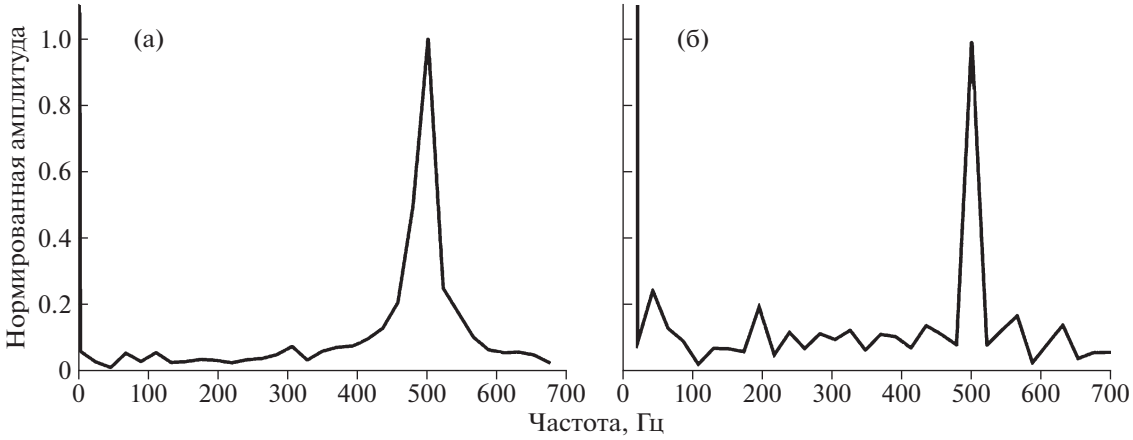

Рис. 3. Спектр частот вибрации при частоте воздействия 500 Гц от вибраций, записанных в точке ~3500 м при использовании полупроводникового лазера с захватом частоты внешнего резонатора (**а**) и коммерческого волоконного лазера (**б**).

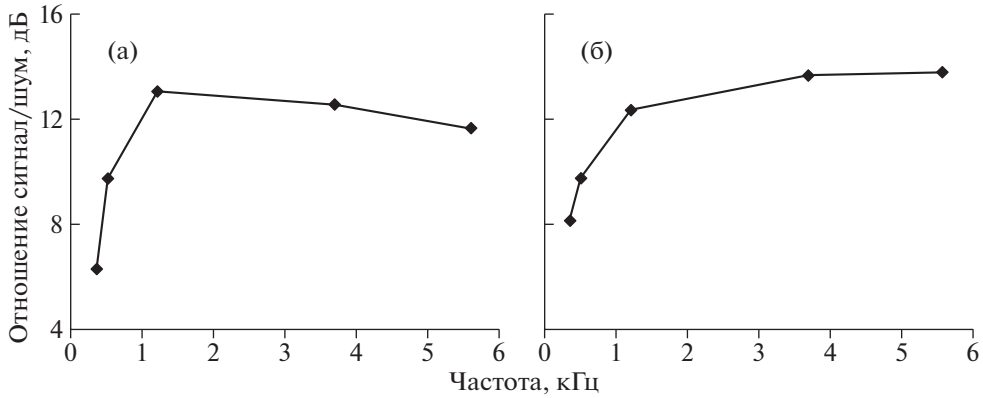

Рис. 4. Значение отношения сигнал/шум как функция частоты от вибраций, записанных в точке ~3500 м при использовании полупроводникового лазера с захватом частоты внешнего резонатора (**а**) и коммерческого волоконного лазера (**б**).

Фурье, при увеличении числа периодов колебаний за фиксированное время измерений. На низких частотах вибрации обе конфигурации имеют одинаковые отношения сигнал/шум. Для более высоких частот чуть меньшие значения отношения сигнал/шум получаются с полупроводниковым лазером (рис. 4а) из-за более быстрого дрейфа его частоты, а при частоте колебаний 5600 Гц разность значений для двух конфигураций составляет ~10%. Во всем диапазоне частот вибрации ≥500 Гц значения отношения сигнал/шум в обоих случаях превышает ~8 дБ.

Таким образом, нами количественно обосновано использование обычного телекоммуникационного полупроводникового лазера в режиме захвата частоты внешнего резонатора для работы в качестве задающего генератора когерентного рефлектометра, специализированного для распределенного детектирования вибраций. Полученные значения отношения сигнал/шум подтверждают способность системы выполнять распределенное измерение частот вибрации в диапазоне 500–5600 Гц с пространственным разрешением ~10 м.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана Российским научным фондом (проект 18-12-00457) и Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 18-42-732001 р_мк и 19-42-730009 р_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горбуленков В., Леонов А., Марченко К., Трещиков В.* // Фотон-экспресс. 2014. № 5(117). С. 12.
2. *Нестеров Е., Озеров А., Наний О., Трещиков В.* // Фотон-экспресс. 2011. № 6 (94). С. 122.

3. *Lu Y., Zhu T., Chen L., Bao X.* // Lightwave Technology. 2010. V. 28(22). P. 3243.
4. *Фомиряков Э.А., Харасов Д.Р., Никитин С.П., Наний О.Е., Трещиков В.Н.* // Фотон-экспресс. 2019. № ВКВО. С. 48. https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16019
5. *Peng F., Wu H., Jia X.-H., Rao Y.-J., Wang Z.-N., Peng Z.-P.* // Optics Express. 2014. V. 22(11). P. 13804. https://doi.org/10.1364/OE.22.013804
6. *Spirin V.V., Castro M., López-Mercado C.A., Mégret P., Fotiadi A.A.* // Laser Phys. 2012. V. 22. P. 760. https://doi.org/10.1134/S1054660X12040214
7. *Spirin V.V., López-Mercado C.A., Mégret P., Fotiadi A.A.* // Laser Phys. Lett. 2012. V. 9. P. 377. https://doi.org/10.7452/lapl.201110138
8. *Spirin V.V., López-Mercado C.A., Kinet D., Mégret P., Zolotovskiy I.O., Fotiadi A.A.* // Laser Phys. Lett. 2013. V. 10. P. 015102. https://doi.org/10.1088/1612-2011/10/1/015102
9. *López-Mercado C.A., Spirin V.V., Escobedo J.L.B., Lucero A.M., Mégret P., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A.* // Opt. Commun. 2016. V. 359. P. 195. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.076
10. *Spirin V.V., Escobedo J.L.B., Korobko D.A., Mégret P., Fotiadi A.A.* // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 478. https://doi.org/10.1364/OE.28.000478
11. *Escobedo J.L.B., Spirin V.V., López-Mercado C.A., Lucero A.M., Mégret P., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A.* // Results in Physics. 2017. V. 7. P. 641. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.01.013
12. *Spirin V.V., López-Mercado C.A., Mégret P., Fotiadi A.A.* // INTECH. 2018. https://doi.org/10.5772/intechopen.72553
13. *López-Mercado C.A., Jason J., Spirin V.V., Escobedo J.L.B., Wuilpart M., Mégret P., Korobko D.A., Zolotovskiy I.O., Fotiadi A.A.* // SPIE Photonics Europe (SPIE, Strasbourg, France, 2018). 2018. P. 106802S. https://doi.org/10.1117/12.2307683
14. *Escobedo J.L.B., Jason J., López-Mercado C.A., Spirin V.V., Wuilpart M., Mégret P., Korobko D.A., Zolotovskiy I.O., Fotiadi A.A.* // Results in Physics. 2019. V. 12. P. 1840. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.02.023
15. *Spirin V.V., López-Mercado C.A., Kablukov S.I., Zlobina E.A., Zolotovskiy I.O., Mégret P., Fotiadi A.A.* // Optics Lett. 2013. V. 38. P. 2528. https://doi.org/10.1364/OL.38.002528
16. *López-Mercado C.A., Spirin V.V., Kablukov S.I., Zlobina E.A., Zolotovskiy I.O., Mégret P., Fotiadi A.A.* // Optical Fiber Technology. 2014. V. 20. P. 194. https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.01.011
17. *Escobedo J.L.B., Spirin V.V., López-Mercado C.A., Mégret P., Zolotovskii I.O., Fotiadi A.A.* // Results in Physics. 2016. V. 6. P. 59. https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.01.017
18. *Korobko D.A., Zolotovskii I.O., Panajotov K., Spirin V.V., Fotiadi A.A.* // Opt. Commun. 2017. V. 405. P. 253. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.08.040
19. *Hartog A.H.* An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. Boca Raton: CRC Press, 2017. https://doi.org/10.1201/9781315119014