Письма в ЖЭТФ, том 122, вып. 11, с. 769 – 773

Анализ параметров узкополосной генерации случайного волоконного ВКР-лазера для сверхразрешающей спектроскопии со сканирующим спектрометром

О. А. Горбунов[1], *И. Д. Ватник*

Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 28 октября 2025 г.
После переработки 28 октября 2025 г.
Принята к публикации 29 октября 2025 г.

В статье анализируются параметры узкополосной генерации случайного волоконного лазера на вынужденном комбинационном рассеянии в волокне (ВКР-лазера) с обратной связью на основе рэлеевского рассеяния, необходимые для реализации сверхразрешающей спектроскопии со сканирующим однопиксельным анализатором спектра. Показано, что для корректной подпиксельной аппроксимации требуются: время жизни мод ≥ 0.5 мс, межмодовый интервал ≥ 2.5 ГГц и достаточная плотность мод в единичном спектральном интервале. Параметры лазера удовлетворяют этим требованиям, что позволяет достичь эффективного повышения спектрального разрешения (до шага дискретизации прибора, вплоть до 1 пм).

DOI: 10.31857/S0370274X25120107

1. Введение. В настоящее время происходит бурный рост приложений в фотонике, связанных с задачами спектроскопии и основанной на ней сенсорики. Эти приложения обуславливают запрос на новые источники излучения со специфическими параметрами, при этом для проведения разных типов спектроскопии требуются разные типы лазерных источников. Стандартным требованием для большого числа задач является узкополосность [1] – с шириной спектра порядка единиц мегагерц или даже в килогерцовом диапазоне – излучения при обеспечении достаточной мощности. Область применений узкополосных лазеров включает как задачи прикладной науки – к примеру, когерентное лидар-детектирование [2] и высокоточная метрология [3], так и фундаментальные физические проблемы, такие как изучение темной материи [4] и детектирование гравитационных волн [5]. В некоторых случаях это комбинируется с дополнительными условиями, например, для систем опроса систем волоконных датчиков на основе волоконных брэгговских решеток или измерения концентрации определенных газовых примесей в атмосфере на основе спектроскопии поглощения необходимо использовать источники с малой спектральной шириной с возможностью быстрой перестройки [6]. Существующие решения на базе полупроводниковых или волоконных лазеров страдают от таких недостатков, как большое время перестройки и ее небольшой диапазон, сложности с получением генерации на желаемых длинах волн, большое межмодовое расстояние и других.

В задачах спектроскопии высокого разрешения последнее, во многих случаях, лимитируется шириной линии генерации лазера [7]. Сужение последней позволяет улучшить разрешение, но существенно увеличивает сложность эксперимента.

Для увеличения спектрального разрешения недавно был предложен подход так называемой сверхразрешающей спектроскопии (СРС) [8]. Суть методики состоит в многократном измерении величины пропускания интересующего объекта с помощью узкополосного излучения низкоразрешающим спектральным прибором с последующей подпиксельной аппроксимацией. На основе собранной статистики измеряемый спектр восстанавливается с большим разрешением, чем разрешение исходного спектрального прибора. Ранее такая схема была реализована для случайных лазеров на основе взвеси наночастиц в красителе [8], а также для случайного волоконного эрбиевого лазера на основе массива волоконных брегговских решеток [9]. При этом первый из двух типов лазера имеет громоздкую схему и требует мощной импульсной накачки, а второй – имеет большое время перестройки между двумя последовательными модами генерации.

В данной работе мы рассматриваем волоконный лазер на вынужденном комбинационном рассеянии в волокне (ВКР-лазер) со случайной обратной связью

[1]e-mail: gorbunov_oa@nsu.ru

за счет обратного рэлеевского рассеяния. Мы проводим анализ требуемых параметров случайного лазера, которые позволили бы реализовать с его использованием схему СРС.

2. Методика. Случайный волоконный ВКР-лазер сразу при переходе порога генерации излучает узкую спектральную линию, которая стабильна лишь малое время, после которого узкополосная генерация возникает в другой части спектра [10, 11], такой лазер подходит для повышения эффективного разрешения спектрального прибора. Разрешение лимитируется неидеальностью спектрально-селективного элемента анализатора, который в каждом положении пропускает не строго единственную гармонику, а некоторый волновой пакет; ширина этого пакета и определяет предельное разрешение прибора. При этом процесс сканирования происходит последовательно (поточечно), и при прописывании стационарного узкого спектрального пика окажутся “засвечены” несколько близлежащих точек измеренного спектра, формируя функцию отклика прибора. Использование свертки спектров исследуемого объекта и сигнала волоконного лазера в узкополосном режиме делает первый нестационарным: на каждом шаге сканирования дифракционная решетка прибора может считывать только одну короткоживущую точку, определяемую положением возникшей моды; при переходе на следующий шаг мода бы уже успевала затухнуть, и прописывался бы нулевой спектр, позволяя обойти ограничение по функции отклика. Предельное разрешение после применения методики СРС в этом случае равно спектральному шагу прибора.

Наиболее очевидный выигрыш в спектральном разрешении предлагаемая методика позволяет достичь при использовании однопиксельных АОС, в которых используется сканирование угла освещения дифракционной решетки. Отраженное излучение от размещенной под разными углами дифракционной решетки попадает на единственный фотодетектор. В этом случае, как правило, шаг дискретизации значительно меньше разрешения, так как последнее лимитируется функцией отклика прибора, а шаг спектральной сетки должен быть, согласно теореме Котельникова–Шеннона, меньше кратно. Так, для распространенных АОС Yokogawa серии AQ6370 минимальный шаг сканирования составляет 1 пм, в то время как разрешение – не более 0.02 нм, т.е. в 20 раз больше. Выигрыш при адаптации предложенной методики может, соответственно, составить 13 дБ и даже более, за счет подпиксельной аппроксимации. Для иллюстрации на рис. 1 приведен спектр случайного волоконного лазера в узкополосном режиме, измеренный высокоразрешающим анализатором спектра APEX Technologies AP2050, и этот же спектр, измеренный с ограниченным разрешением, соответствующим аппаратной функции АОС Yokogawa в обычном режиме и с помощью предложенной нами методики. Видно, что аппаратная функция низкоразрешающего анализатора спектра искажает ширину узких пиков и не может разрешить близколежащие моды, но использование предложенной методики позволяет эффективно обойти эту проблему.

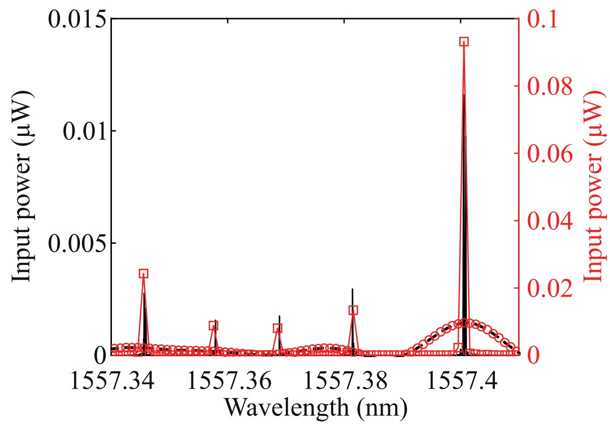

Рис. 1. (Цветной онлайн) Спектр случайного лазера, измеренный высокоразрешающим спектральным прибором (черная линия), низкоразрешающим спектральным прибором (красная линия с круглыми маркерами) и им же с применением предлагаемой методики (красная линия с квадратными маркерами)

Для многопиксельных спектральных анализаторов выигрыш будет менее значительным: в них в качестве чувствительного элемента используются линейки фотодетекторов с размером пикселя, определяемым угловой дисперсией дифракционной решетки. Тем не менее, в таких приборах выигрыш может быть получен, например, при увеличении количества фотодетекторов в линейке в два раза и последующей подпиксельной аппроксимации.

3. Требования к параметрам лазера. Мы проводим анализ возможности использования случайного для лазера для однопиксельного сканирующего АОС. В первую очередь, по аналогии с ранее описанной методикой [8, 12], необходимо убедиться, что прибор при измерении узкой моды успевает полностью прописать интервал, соответствующий своей разрешающей полосе. Это позволит за счет аппроксимации пика функций отклика точно определить положение центра спектра генерации. При максимальном разрешении 20 пм и шаге дискретизации 1 пм, максимальная скорость сканирования, соответствующая минимальной чувствительности, равна приблизительно 40000 точек в секунду или 25 мкс на запись одной точки. При более высоких значениях чувствительности скорость падает кратно. Функция отклика составляет 20 точек и прописывается за время около 0.5 мс.

На рисунке 2 вторая ось абсцисс показывает время, за которое АОС Yokogawa сканировал спектр в режиме наименьшей чувствительности (“NORMAL HOLD”). Видно, что полная функция отклика прописывается за время менее 0.5 мс, и мода за это время не успевает затухнуть – в противном случае наблюдался бы резкий скачок сигнала до уровня шумов.

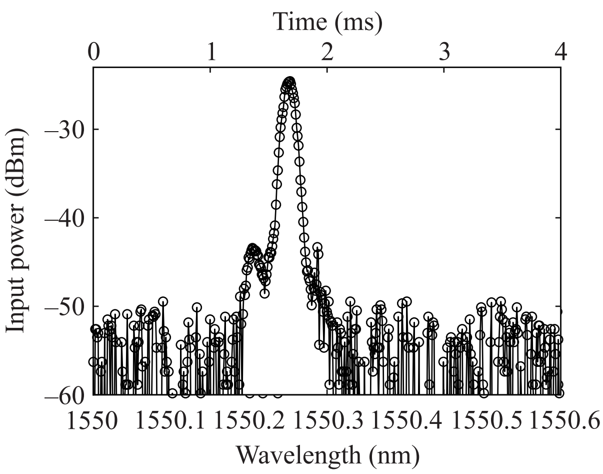

Рис. 2. Спектр лазера в узкополосном режиме с определением величины скорости сканирования

При этом в интервал, соответствующий ширине функции отклика, должна попадать только одна мода лазера. Действительно, в обратном случае в точках, удаленных от соседних мод на расстояние, меньше разрешающей способности, анализатор спектра будет регистрировать их суммарный сигнал (свернутый с функцией отклика), что не позволит восстановить истинную интенсивность. Для разрешающей способности в 20 пм интервал между модами должен составлять величину от 2.5 ГГц.

Наконец, частота возникновения мод должна быть достаточно большой, чтобы позволить прописать максимум точек в исследуемом интервале частот. Разумеется, применение случайного лазера для СРС в любом случае требует накопления достаточно большого количества измерений, но оно должно оставаться в разумных пределах. Как ориентир можно взять объем буфера K, использованного в [8] – 10^4 измерений спектра. В этом случае, считая, что вероятность рождения моды в единицу времени в единичном спектральном интервале w однородна по спектру, получим, что стационарное среднее число мод в спектре равно $n = w\Delta\tau$, где Δ – ширина спектра, τ – время жизни моды. Действительно, в стационаре

$$\frac{dn}{dt} = w\Delta - \frac{n}{\tau} = 0, \qquad (1)$$

откуда следует искомое значение для числа мод.

Количество мод, зарегистрированных в процессе измерений, должно быть, по крайней мере, не меньше числа точек в исследуемом спектре. Последнее равно $\Delta \times \delta f^{-1}$, где δf – шаг дискретизации, равный 1 пм или 125 МГц, откуда получаем соотношение

$$K \times n = Kw\Delta\tau > \frac{\Delta}{\delta f}. \qquad (2)$$

Исходя из этих условий, могут быть сформулированы следующие требования на параметры излучения случайного лазера. Во-первых, время жизни моды должно быть достаточным для прописывания полной функции отклика, что составляет величину от 0.5 мс. Во-вторых, моды (точнее, группы мод, попадающие в шаг дискретизации прибора) должны быть разнесены на интервал порядка 2.5 ГГц. Наконец, из условия (2) можно вывести условие на плотность мод в единичном спектральном интервале:

$$\rho \equiv \frac{n}{\Delta} = \omega\tau > (K\delta f)^{-1} \simeq 0.8\,\text{ТГц}^{-1}. \qquad (3)$$

4. Наблюдаемые параметры случайного волоконного ВКР-лазера. Нами были детально изучены параметры узкополосного режима генерации случайного волоконного лазера на основе 32 км волокна SMF-28 с накачкой на 1.455 мкм, генерирующего излучение в области 1.55–1.56 мкм. Характерное время жизни мод было изучено нами ранее: в работе [13] на рис. 4b представлена гистограмма времен жизни мод в узкополосном режиме генерации, из которой видно, что наиболее вероятное время затухания моды составляет примерно 2 мс и ограничено влиянием нелинейных эффектов. Это значение соответствует требуемому для СРС. Кроме того, исследования показали зависимость времени жизни моды от дисперсии волокна [14]; таким образом, при необходимости время жизни может быть скорректировано применением волокон с разными значениями дисперсии и нелинейности.

Интервалы между модами в спектре зависят от мощности генерации. При увеличении накачки моды начинают эффективно взаимодействовать нелинейным образом, что приводит к росту их числа и уменьшению интервала между ними. На рисунке 3 показаны спектры случайного лазера при мощно-

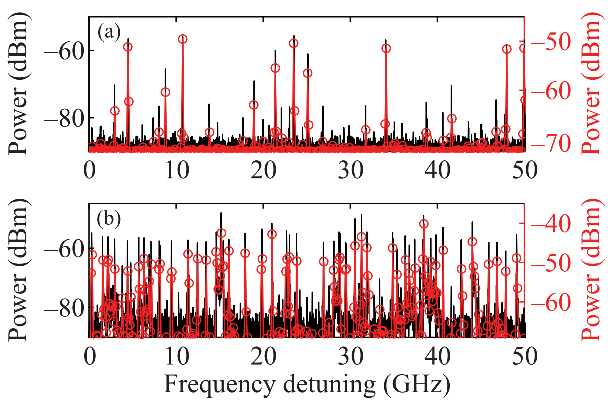

Рис. 3. (Цветной онлайн) Иллюстрация спектральных интервалов между модами при малой (a) и большой (b) мощности накачки. Черные линии соответствуют измерениям с высоким разрешением, красные – с низким

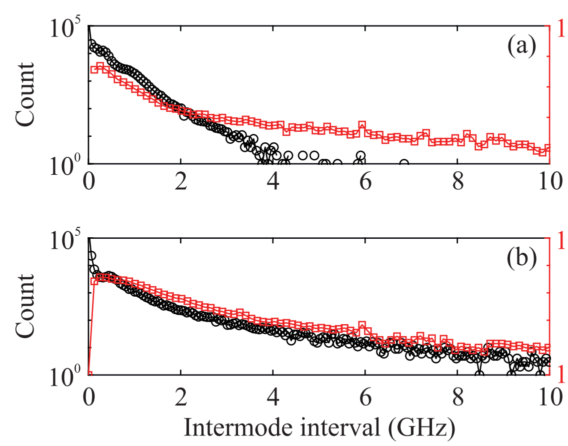

Рис. 4. (Цветной онлайн) Распределение спектральных интервалов между модами при малой (a) и большой (b) мощности накачки. Черные линии соответствуют измерениям с высоким разрешением, красные – с низким

сти накачки 33.0 дБм – сразу над порогом генерации (панель (a)), – и при увеличении мощности накачки до 33.4 дБм (панель (b)). Черные кривые измерены высокоразрешающим анализатором спектра с разрешением около 2.5 МГц (APEX Technologies AP2050), красные соответствуют усреднению по частоте дискретизации медленного прибора (Yokogawa AD6730) – 125 МГц. Видно, что при малых мощностях генерации интервалы между модами, регистрируемые OSA, составляют единицы ГГц, а во втором случае они менее гигагерца.

Более детально интервалы между модами можно изучить, построив их распределение в наблюдаемых спектрах. Для этого был набран массив из 50 спектров, измеренных высокоразрешающим анализатором спектра APEX, затем было выполнено усреднение каждого из спектров согласно характеристикам низкоразрешающего спектрального прибора Yokogawa. Измерения проводились при двух мощностях. В спектрах были выделены моды, интенсивность которых превышала средний уровень не менее, чем на 10 дБ, и интервалы между ними были распределены по гистограмме. На рисунке 4 приведены гистограммы как для исходно неусредненных спектров, так и для усредненных.

Распределение показывает, что значительное число мод располагается в спектре ближе, чем требуется для эффективной реализации СРС (интервал порядка 1 ГГц и более). Но нужно принять во внимание два момента. Во-первых, измерения проводились медленным прибором, и, фактически, не все из зарегистрированных мод являлись живущими одновременно. Во-вторых, для набора репрезентативной статистики учитывались и достаточно низкоинтенсивные моды (оценка нижнего порога по мощности моды – менее мкВт). Если поднять порог минимального уровня регистрации моды до 20 дБ от средней мощности, то распределение становится значительно шире (максимальные значения межмодового интервала – десятки ГГц), и большая часть мод разделена частотными интервалами, достаточными для эффективной реализации схемы спектроскопии сверхвысокого разрешения. При увеличении порога до 30 дБ практически все регистрируемые моды разделены интервалами от 1 ГГц, при этом они наиболее эффективны с точки зрения рассматриваемой задачи. Но их число в спектре слишком мало, – порядка 10, – что затрудняет набор достаточного буфера для построения гистограмм.

На рисунке 5 показано распределение плотности мод по спектру для мощности на пороге генерации (рис. 5a) и при переходе от узкополосной генерации к непрерывному спектру (рис. 5b).

Плотность мод, измеренная экспериментально, составляет величины порядка 0.1–1 ГГц$^{-1}$, что удовлетворяет условию (3) с запасом в два-три порядка. При большой мощности плотность мод возрастает до единиц ГГц$^{-1}$. Стоит отметить, что плотность достаточно неоднородна по спектру, что может приводить к несколько неоднородной чувствительности метода в зависимости от спектрального интервала. В максимуме усиления – около 1.557 мкм – наблюдается наибольшая плотность мод, при отстройках в 1 нм и более возникают провалы до нулевых значений. В целом, можно ожидать, что для измерений описанным методом достаточно будет буфера в 10^2–10^3 спектров.

5. Заключение. В данной работе мы сформулировали требования к источнику узкополосного стоха-

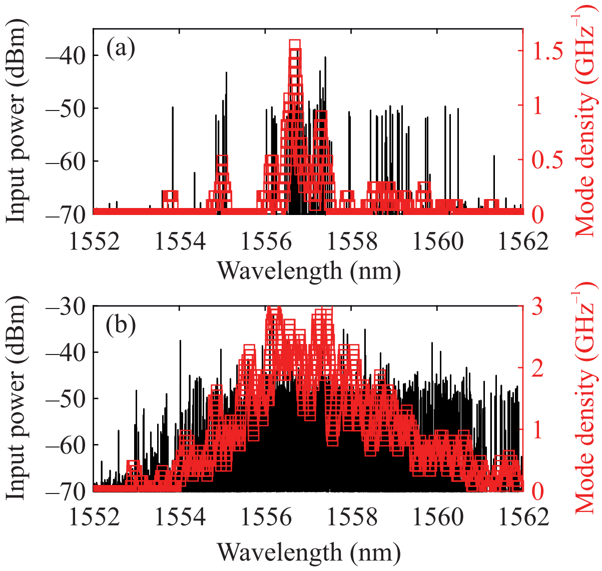

Рис. 5. (Цветной онлайн) Распределение плотности мод по спектру для (a) малой и (b) большой мощности генерации

стически перестраиваемого излучения для его применений в схемах сверхразрешающей спектроскопии с однопиксельным АОС. Мы экспериментально изучили параметры случайного волоконного ВКР-лазера с обратной связью за счет рэлеевского рассеяния и показали, что такой лазер может быть использован как источник для задач сверхразрешающей спектроскопии. При этом, однако, необходимо обеспечить работу лазера в благоприятных режимах, так как его параметры могут выходить за рамки допустимых.

Финансирование работы. Работа поддержана грантом Российского научного фонда 24-12-00432 (https://rscf.ru/project/24-12-00432/).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. S. Fu, W. Shi, Y. Feng, L. Zhang, Z. Yang, S. Xu, X. Zhu, R. A. Norwood, and N. Peyghambarian, Journal of the Optical Society of America B **34**(3), A49 (2017).
2. C. Besson, A. Dolfi-Bouteyre, G. Canat, N. Cezard, B. Augere, A. Durecu, L. Lombard, M. Valla, and A. Hallermeyer, Doppler LIDAR Developments for Aeronautics. Aerospace Lab **12**, 1 (2016).
3. S. S. Sane, S. Bennetts, J. E. Debs, C. C. N. Kuhn, G. D. McDonald, P. A. Altin, J. D. Close, and N. P. Robinset, Opt. Express **20**, 8915 (2012).
4. M. S. Safronova, D. Budker, D. DeMille, D. F. J. Kimball, A. Derevianko, and C. W. Clark, Rev. Mod. Phys. **90**, 025008 (2018).
5. D. P. Kapasi, J. Eichholz, T. McRae, R. L. Ward, B. J. J. Slagmolen, S. Legge, K. S. Hardman, P. A. Altin, and D. E. McClelland, Opt. Express **28**, 3280 (2020).
6. V. Cardin, D. Robin, S. Boudreau, G. Rousseau, S. Ayotte, M. C. V. Riendeau, and P. Larochelle, Proc. SPIE 12905, Novel In-Plane Semiconductor Lasers XXIII, 129050F, San Francisco, California, United States (2024).
7. P. Micke, T. Leopold, S. A. King, E. Benkler, L. J. Spieß, L. Schmoeger, M. Schwarz, J. R. Crespo Lopez-Urrutia, and P. O. Schmidt, Nature **578**, 60 (2020).
8. A. Boschetti, A. Taschin, P. Bartolini, A. K. Tiwari, L. Pattelli, R. Torre, and D. S. Wiersma, Nat. Photonics **14**(3), 177 (2020).
9. Y. Bliokh, E. I. Chaikina, I. D. Vatnik, and D. V. Churkin, J. Opt. Soc. Amer. B **36**(2), 408 (2019).
10. P. Tovar, G. Temporao, and J. P. von der Weid, Opt. Express. **27**(21), 31001 (2019).
11. I. D. Vatnik, O. A. Gorbunov, and D. V. Churkin, Photonics **10**(11), 1225 (2023).
12. Y. Zhang, S. Wang, C. Zheng, and W. Zhang, ACS Photonics **10**(8), 2670 (2023).
13. I. D. Vatnik, O. A. Gorbunov, and D. V. Churkin, Photonics **11**(1), 2 (2024).
14. O. A. Gorbunov, I. D. Vatnik, and D. V. Churkin, Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing **61**(1), 19 (2025).