

09

Резонансы накачки и высших стоксовых компонент в волоконных бриллюэновских лазерах и метод их настройки

© В.В. Спирин^{1,2}¹ Исследовательский центр CICESE,
22860 Энсенада, Мексика² Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: mr.vaspir@mail.ru*Поступило в Редакцию 21 июня 2016 г.*

Представлен алгоритм настройки волоконного бриллюэновского лазера, позволяющий одновременно обеспечить резонанс как накачки, так и высших стоксовых компонент. Предложенный источник излучения сочетает низкий уровень собственных шумов и низкий порог генерации, свойственные лазерам с двойным резонансом с преимуществами многочастотных оптических излучателей.

Вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в оптических волокнах активно используется при создании уникальных волоконных лазеров, в частности одночастотных лазеров и лазеров с модуляцией добротности [1–4]. Особое внимание исследователей в последние годы привлекают так называемые лазеры с двойным резонансом с относительно коротким, до 20 метров резонатором, в котором, однако, одновременно обеспечивается резонанс как для накачки, так и для первой стоксовой компоненты. Лазеры с двойным резонансом характеризуются низким порогом генерации и низким уровнем шумов излучения [5–7], что делает их привлекательными для целого ряда применений, таких как когерентная оптическая связь, интерферометрические датчики и микроволновая фотоника. Для стабильного одночастотного режима работы лазеров с двойным резонансом обычно необходимо использовать активные либо пассивные системы контроля [5–10].

С другой стороны, хорошо известно, что волоконные бриллюэновские лазеры успешно используются в качестве многочастотных источников излучения, обеспечивающих одновременную генерацию нескольких спектральных компонент.

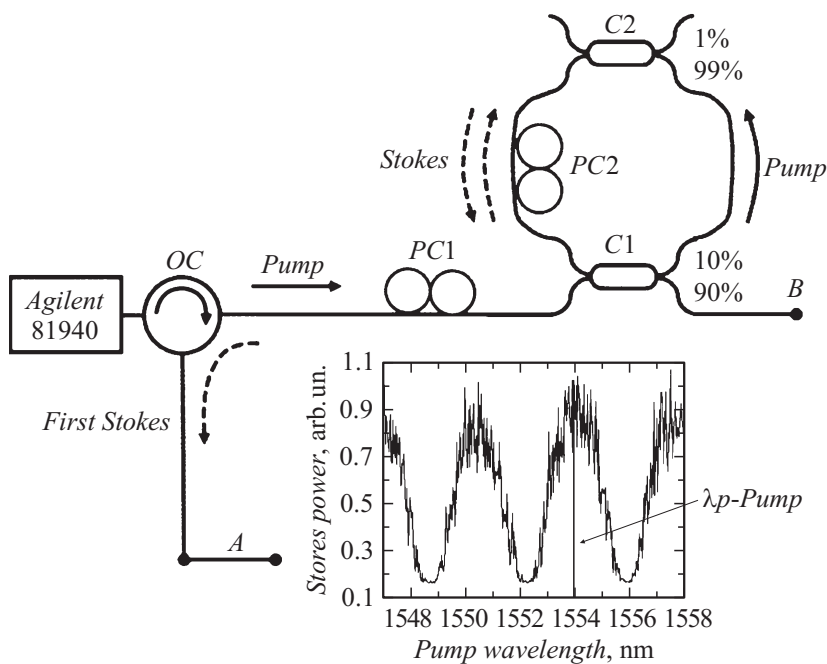


Рис. 1. Схема эксперимента: *OC* — оптический циркулятор, *PC* — контроллер поляризации, *C* — волоконный ветвитель.

В данной работе мы представляем алгоритм настройки, обеспечивающий одновременный резонанс накачки и высших стоксовых компонент в волоконных лазерах. Подобный бриллюэновский лазер с многочастотным резонансом, с одной стороны, имеет все достоинства лазеров с двойным резонансом, а с другой — может обеспечивать одновременную генерацию нескольких спектральных компонент.

Схема экспериментальной установки для настройки резонанса лазера с многочастотным резонансом представлена на рис. 1. Излучение перестраиваемого по длине волны лазера накачки Agilent 81940 с шириной линии излучения 100 КHz и мощностью до 25 mW вводится в волоконный резонатор длиной около 8 м, образованный стандартными волоконными компонентами на основе волокна SMF-28.

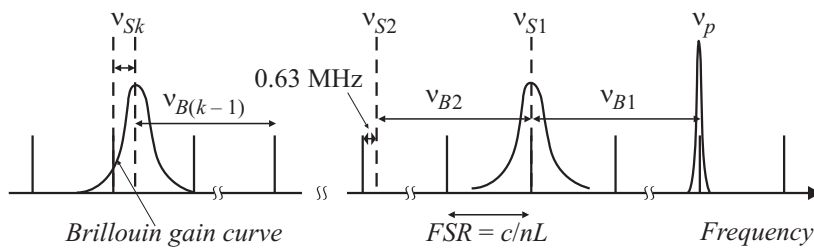


Рис. 2. Условия одновременного резонанса накачки и высших стоксовых компонент, ν_{Sk} — частота k -й стоксовой компоненты, соответствующая центру линии усиления.

При сканировании по длине волны накачки в интервале 1548–1558 nm на экране осциллографа, временная развертка которого синхронизирована с процессом сканирования, наблюдаются пики излучения первой стоксовой компоненты, соответствующие одновременно резонансу по накачке и стоксу.

Действительно, длина резонатора L определяет величину межмодового интервала резонатора $FSR = c/nL$, где c — скорость света в вакууме, а n — коэффициент преломления сердцевины волокна SMF-28, равный 1.468 для длины волны 1550 nm [11]. Как показано на рис. 2, двойной резонанс наблюдается, когда бриллюэновский сдвиг для первой стоксовой компоненты, соответствующий максимуму усиления, равняется некоторому целому числу m межмодовых интервалов FSR:

$$\nu_{B1} = \frac{\nu_p 2nV_A}{c} = mFSR, \quad (1)$$

где ν_p — оптическая частота накачки, $V_A = 5740$ m/s [12] — скорость гиперзвука в оптическом волокне.

При соблюдении этого условия порог ВРМБ значительно снижается и мощное стоксово излучение регистрируется в пункте A уже при 5 mW мощности накачки (рис. 1). Расстояние между пиками зависит от длины резонатора и равняется примерно 3.5 nm для использованного в эксперименте 8-метрового резонатора.

В соответствии с уравнением (1) при сканировании мы наблюдаем несколько пиков, соответствующих двойному резонансу на различных частотах или длинах волн накачки, что соответствует различным

значениям параметра m в уравнении (1). Для накачки бриллюэновского лазера может быть выбрана любая длина волны, соответствующая максимуму пика, например 1554 nm ($m = 425$). Таким образом, алгоритм настройки резонанса в данном случае сводится к предварительному сканированию данного резонатора и выбору подходящей длины волны накачки. С другой стороны, как нами было показано в работе [12], длина резонатора L также может быть изменена таким образом, чтобы обеспечить двойной резонанс на любой, заранее выбранной длине волны накачки.

Рассмотрим условия резонанса для высших стоксовых компонент. При длине волны накачки, равной 1554 nm, первый бриллюэновский сдвиг ν_{B1} точно соответствует $m = 425$ межмодовых дистанций FSR . То есть, если накачка совпадает с одной из мод резонатора, то и максимум бриллюэновского усиления в оптическом волокне для первой стоксовой компоненты также совпадает с одной из мод резонатора. Однако, поскольку бриллюэновский сдвиг зависит от частоты накачки, последнее условие не выполняется абсолютно точно для последующих сдвигов.

Действительно, сдвиги между высшими стоксовыми компонентами, соответствующие максимуму усиления с учетом того, что генерация стоксовых компонент происходит на собственных модах резонатора, могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} \nu_{B2} &= (\nu_P - mFSR)2nV_A/c, \\ \nu_{Bk} &= (\nu_P - m(k-1)FSR)2nV_A/c, \end{aligned} \quad (2)$$

где k — номер стоксовой компоненты, ν_{Bk} — бриллюэновский сдвиг между $(k-1)$ - и k -стоксовыми компонентами, соответствующий максимуму усиления.

Уже для второй стоксовой компоненты максимум усиления не совпадает с положением соответствующей моды резонатора (рис. 2). Усиление несколько уменьшается, однако генерация по-прежнему происходит на соответствующей моде резонатора. Анализ уравнений (2) показывает, что для высших стоксовых компонент эта разница линейно увеличивается с возрастанием порядка стоксовой компоненты примерно на 0.63 MHz для каждой последующей стоксовой компоненты.

Однако, принимая во внимание, что ширина линии бриллюэновского усиления в оптическом волокне составляет около 30 MHz, можем

заклучить, что рассматриваемый алгоритм обеспечивает резонансные условия до 23-й стоксовой компоненты включительно. Отметим, что рассматриваемый алгоритм позволяет обеспечить резонансные условия даже для несколько большего числа стоксовых компонент, если длина волны накачки выбрана не точно соответствующей оптимальным условиям усиления для первой стоксовой компоненты, а несколько меньшей, но в пределах бриллюэновской линии усиления.

Таким образом, рассматриваемый алгоритм настройки обеспечивает работу лазера, сочетающего в себе достоинства бриллюэновского лазера с двойным резонансом и многочастотного источника излучения с одновременной генерацией более 20 стоксовых компонент.

Работа была выполнена при поддержке проекта N 265517 CONACYT, Мексика. Автор также выражает благодарность одному из инициаторов работ по данной тематике С.А. Кукушкину.

Список литературы

- [1] *Agrawal G.P.* Nonlinear Fiber Optics. Fourth Ed. Elsevier Inc., 2006. 529 p.
- [2] *Cowle G.J., Stepanov D.Yu.* // Opt. Lett. 1996. V. 21. P. 1250–1252.
- [3] *Fotiadi A.A., Mégret P.* // Opt. Lett. 2006. V. 31. P. 1621–1623.
- [4] *Spirin V.V.* et al. // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 8328–8335.
- [5] *Geng J.H., Staines S., Wang Z.L.* et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2006. V. 18. P. 1813–1815.
- [6] *Norcia S.* et al. // Opt. Lett. 2003. V. 28. P. 1888–1890.
- [7] *Molin S., Baili G., Alouini M.* et al. // Opt. Lett. 2008. V. 33. P. 1681–1683.
- [8] *Spirin V.V., Lopez-Mercado C.A., Megret P., Fotiadi A.A.* // Laser Phys. Lett. 2012. V. 9. P. 377–380.
- [9] *Liu Yi.* et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2014. V. 26. P. 169–172.
- [10] *Chen X.* et al. // Appl. Phys. B. 2012. V. 107. P. 791–794.
- [11] Corning optical fiber, <http://www.corning.com/opticalfiber/index.asp>
- [12] *Spirin V.V.* et al. // Opt. Lett. 2013. V. 38. P. 2528–2530.