

07;12

## Двунаправленный кольцевой волоконный лазер с $90^\circ$ фарадеевским вращателем в качестве фазового невзаимного элемента. Ч. II: эксперимент

© Р.В. Киян, А.А. Фотиади, О.В. Шакин

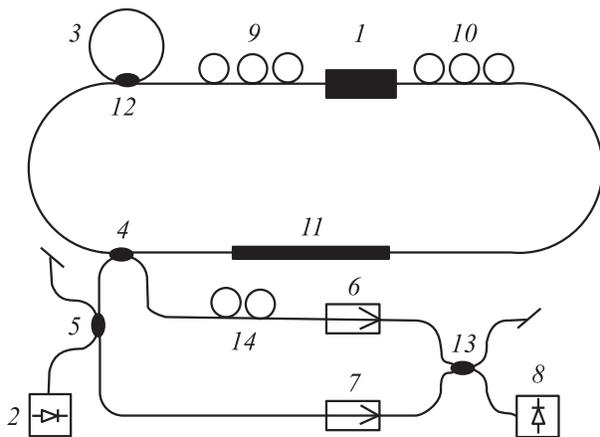
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 23 октября 2002 г.

В окончательной редакции 19 декабря 2002 г.

Приведены результаты экспериментального исследования кольцевого двунаправленного E<sub>g</sub>-волоконного лазера с  $90^\circ$ -ным фарадеевским вращателем в резонаторе. Реализованы ранее теоретически предсказанные два режима двунаправленной генерации пары противоположно распространяющихся мод с комплексно-сопряженными и с орто-сопряженными состояниями поляризации. В обоих режимах получена устойчивая двунаправленная генерация только одной продольной моды лазерного резонатора в каждом направлении. В первом случае достигнута существенная стабилизация невзаимного частотного сдвига между противоположно распространяющимися модами, обусловленного фарадеевским вращателем.

**1. Введение.** Для создания кольцевого лазерного гироскопа на основе E<sub>g</sub>-волоконного кольцевого двунаправленного лазера необходимо подавить эффект захвата частот противоположно распространяющихся мод, который обусловлен паразитным обратным рассеянием в резонаторе лазера, и достичь стабильной двунаправленной генерации только одной продольной моды в каждом направлении со стабильной, зависящей только от угловой скорости вращения резонатора, разницей частот противоположно распространяющихся мод [1]. Связь противоположно распространяющихся мод вследствие обратного рассеяния усиливается в E<sub>g</sub>-волоконном лазере из-за значительного однородного уширения линии усиления ионов E<sub>g</sub> в матрице кварцевого стекла [2]. Данная проблема была успешно решена использованием  $45^\circ$ -ного фарадеевского вращателя в резонаторе лазера [3,4]. Однако невзаимный частотный сдвиг между противоположно распространяющимися модами, обуслов-



**Рис. 1.** Ег-волоконный кольцевой двунаправленный лазер: 1 —  $90^\circ$ -ный фарадеевский вращатель; 2 — 980 nm полупроводниковый лазер накачки; 3 — кольцевой волоконно-оптический фильтр; 4,5 — 1550/980-nm спектрально-селективные волоконные ответвители; 6,7 — оптические изоляторы; 8 — фотоприемник; 9,10,14 — поляризационные элементы; 11 — усиливающая среда; 12,13 — волоконно-оптические ответвители.

ленный  $45^\circ$ -ным фарадеевским вращателем, существенно зависит от взаимного двулучепреломления лазерного резонатора. Это обуславливает сильную чувствительность невязимного частотного сдвига ко всякого рода внешним возмущениям, приводящим к флуктуациям взаимного двулучепреломления лазерного резонатора. Теоретически было показано, что данная проблема может быть решена использованием  $90^\circ$ -ного фарадеевского вращателя в качестве невязимного элемента [5].

**2. Эксперимент.** На рис. 1 схематически показан Ег-волоконный лазер, использованный в эксперименте. Резонатор лазера изготовлен из стандартного одномодового оптического волокна. В качестве фазового невязимного элемента в резонатор лазера был установлен  $90 \pm 1^\circ$ -ный фарадеевский вращатель (1). Двулучепреломление лазерного резонатора изменяли с помощью двух волоконно-оптических поляризационных элементов РС-1 (9) и РС-2 (10). Для селекции продольных мод лазерного резонатора в резонатор установлен фильтр в виде короткого кольцевого волоконно-оптического резонатора 3. Данный резонатор

также изготовлен из стандартного одномодового оптического волокна и связан с лазерным резонатором через 50/50 волоконно-оптический ответвитель. Свободная спектральная зона волоконно-оптического кольцевого фильтра составляла около 900 нм. В качестве усиливающей среды использовали отрезок Er-оптического волокна длиной 11 см ( $\text{Er}^{3+}$ -концентрация — около 2000 ppm). Накачка активированного оптического волокна осуществлялась через спектрально-селективный волоконный ответвитель WDM-1 (4). Этот же ответвитель был использован в качестве выхода для излучения, распространяющегося в лазерном резонаторе. Для обеих волн, распространяющихся по часовой стрелке и против нее, коэффициент ответвления лазерного излучения составлял около 1%. Второй спектрально-селективный волоконно-оптический ответвитель WDM-2 (5) использован для того, чтобы связать полупроводниковый лазер накачки со спектрально-селективным ответвителем WDM-1 (4). Длина волны излучения накачки была около 980 нм.

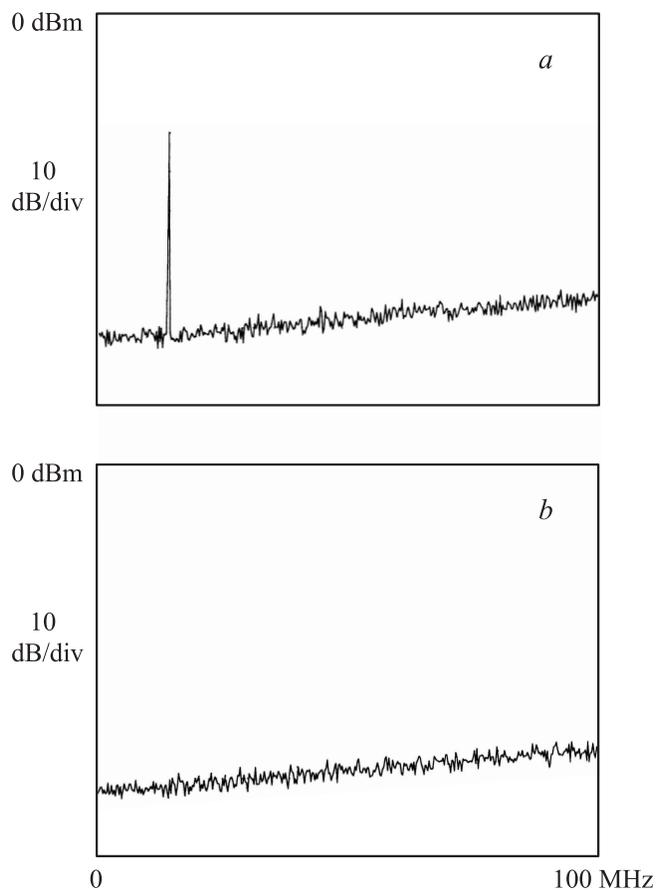
В обоих выходных плечах лазера установлены поляризационно-независимые волоконно-оптические изоляторы, которые предотвращали влияние обратного рассеяния вне лазерного резонатора на работу лазера. Выходное лазерное излучение, соответствующее модам, распространяющимся по часовой стрелке и против нее, смешивалось с помощью 50/50 волоконно-оптического ответвителя для того, чтобы получить сигнал оптических биений между этими модами. Состояние поляризации в одном из выходных плеч изменяли с помощью поляризационного элемента PC-3 (14). Это позволяло добиться одинаковых состояний поляризации в обоих выходных плечах в точке смешивания выходных излучений (50/50 волоконно-оптический ответвитель). Смешанное выходное излучение направляли на фотоприемник, выход которого соединен с радиочастотным спектроанализатором.

Поскольку оптические элементы, установленные в лазерный резонатор, обладают паразитными поляризационно-зависимыми потерями, в зависимости от настройки поляризационных элементов 9 и 10 возможно было получить однонаправленную или двунаправленную генерацию. Во всех случаях лазер генерировал в диапазоне 1.53 мкм. Прежде всего настройкой кольцевого волоконно-оптического фильтра была получена генерация нескольких продольных мод лазерного резонатора, так что в спектре оптических биений выходного лазерного излучения присутствовали частоты, соответствующие биениям между продольными

модами лазерного резонатора. Таким образом, была измерена свободная спектральная зона лазерного резонатора. Она составила 28.930 МГц. Точность измерения ограничена спектральной шириной линии биений продольных мод, которая была около 3 кГц.

Два качественно различных режима двунаправленной одномодовой генерации были получены настройкой поляризационных элементов 9 и 10.

В обоих режимах противоположно распространяющиеся лазерные моды имели сравнимые интенсивности, так что сигнал биений между этими модами можно было наблюдать с помощью осциллографа с контрастом около 50%. В одном из этих режимов изменение настройки поляризационных элементов 9 и 10 приводило к плавному, непрерывному изменению частоты сигнала биений между противоположно распространяющимися модами в интервале примерно от 100 кГц до  $\Delta\nu/2$ . Как было получено в теоретическом анализе [5], это соответствует режиму генерации ортогонально-сопряженных противоположно распространяющихся мод лазерного резонатора. Спектр сигнала биений между противоположно распространяющимися модами, полученный в данном режиме генерации, показан на рис. 2, а. Частота биений составляет 9.071 МГц. Настройка поляризационных элементов 9 и 10 также позволяла получить одномодовую двунаправленную генерацию с частотой биений между противоположно распространяющимися модами 14.464 МГц, которая с точностью измерения свободной спектральной зоны лазерного резонатора совпадает с частотой  $\Delta\nu/2$ . Соответствующий спектр биений противоположно распространяющихся мод показан на рис. 3, а. В данном режиме генерации частота биений не изменялась, даже если настройка поляризационных элементов 9, 10 изменялась в довольно широких пределах. В этом режиме генерации изменение настройки 9 или 10 приводило только к изменению интенсивностей противоположно распространяющихся мод и, как следствие, к изменению амплитуды сигнала биений. В работе [5] было показано, что такое поведение наблюдается в случае, если лазер генерирует противоположно распространяющиеся моды с комплексно-сопряженными состояниями поляризации. На рис. 2 показаны радиочастотные спектры, полученные в режиме генерации для каждой из противоположно распространяющихся мод. Данные спектры в обоих случаях идентичны, поэтому показаны спектры для одного случая, и были записаны, когда излучение только одного из двух выходов лазера



**Рис. 2.** Радиочастотные спектры сигнала биений между противоположно распространяющимися модами лазерного резонатора в режиме генерации пары орто- и комплексно-сопряженных противоположно распространяющихся мод (*a*). Радиочастотные спектры излучения каждой из мод, распространяющихся по часовой стрелке и против нее (*b*, *c* соответственно). Для всех спектров время сканирования 604.8 ms, разрешение 9100 Hz.

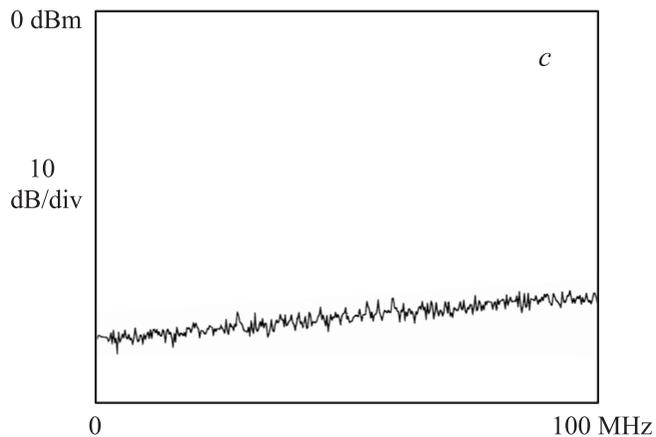
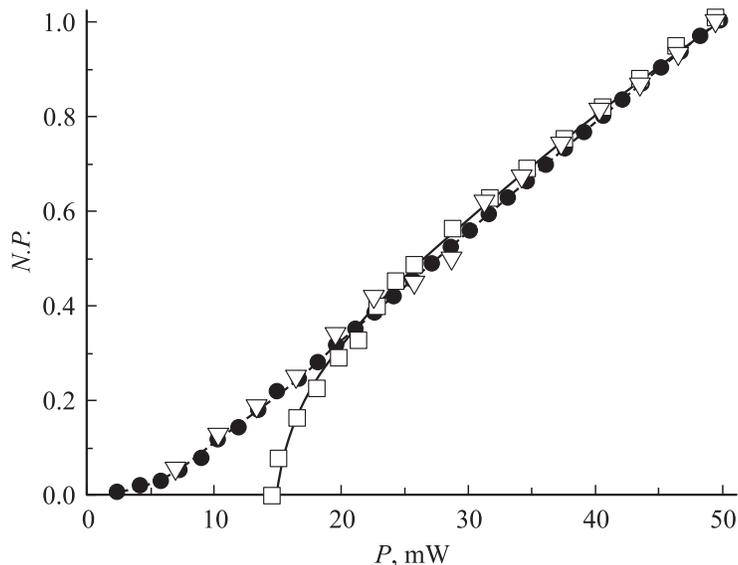


Рис. 2 (продолжение).

направляли на фотоприемник. Данные спектры вместе со спектрами биений между противоположно распространяющимися модами подтверждают, что в обоих режимах имела место одномодовая двунаправленная генерация.

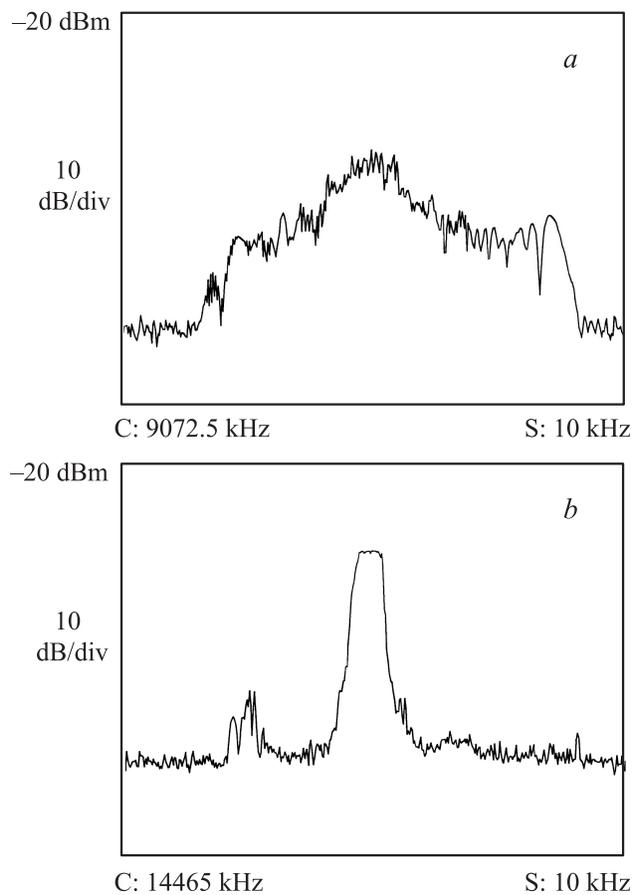
На рис. 3 показаны зависимости амплитуды сигнала биений между противоположно распространяющимися модами лазерного резонатора от мощности излучения накачки. На этом же рисунке показана зависимость полной выходной мощности лазера (сумма выходных мощностей противоположно распространяющихся мод) от мощности излучения накачки. Все зависимости на рис. 3 нормированы на значения соответствующего параметра, полученные при максимальной мощности накачки. В случае когда лазер генерировал пару комплексно-сопряженных противоположно распространяющихся мод, пороговая мощность излучения накачки для сигнала биений между этими модами совпадает с пороговой мощностью лазерной генерации. Такое совпадение объясняется тем, что моды с комплексно-сопряженными состояниями поляризации испытывают в резонаторе лазера одинаковые потери независимо от того, какие поляризационно-зависимые потери присутствуют в резонаторе. Поэтому пороги лазерной генерации одинаковы для противоположно распространяющихся мод. Напротив, если лазер генерирует противоположно распространяющиеся моды с орто-сопряженными состояниями поляри-



**Рис. 3.** Нормированные зависимости полной выходной мощности лазера (кружки), амплитуд сигнала биений между противоположно распространяющимися орто-сопряженными (квадраты) и комплексно-сопряженными (треугольники) модами от мощности излучения накачки, введенного в активное волокно.

зации, потери, испытываемые противоположно распространяющимися модами, различны (в общем случае), если в резонаторе лазера присутствуют поляризационно-зависимые потери. Резонатор лазера обладает паразитными поляризационно-зависимыми потерями, поэтому пороги лазерной генерации противоположно распространяющихся мод с орто-сопряженными состояниями поляризации различны. Это позволяет разделить режимы генерации пары противоположно распространяющихся мод с комплексно-сопряженными состояниями поляризации или орто-сопряженными состояниями поляризации.

Лазер был подвергнут воздействию воздушного потока, что приводило к случайным флуктуациям двулучепреломления лазерного резонатора. Измерения с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо показали, что в обоих обсуждаемых режимах генерации флуктуации двулучепреломления приводят к непрерывному изменению частот обе-



**Рис. 4.** Радиочастотные спектры сигнала биений между противоположно распространяющимися модами лазерного резонатора в режиме генерации пары орто-сопряженных (*a*) и комплексно-сопряженных (*b*) противоположно распространяющихся мод (время сканирования 40 ms; разрешение 37 Hz; 1000 видеоусреднений). Мощность излучения накачки, введенного в активное волокно, 26 mW (*C* — центр, *S* — диапазон).

их генерируемых мод, хотя время от времени наблюдались и скачки продольных мод. Однако влияние флуктуаций двулучепреломления на частотную разницу между противоположно распространяющимися модами различно. На рис. 4, *a* и *b* показаны радиочастотные спектры сигналов биений между противоположно распространяющимися модами в двух режимах: режиме генерации пары противоположно распространяющихся орто-сопряженных и комплексно-сопряженных мод соответственно. Спектры записаны в режиме видеоусреднения с 1000 усреднений каждый. В случае если лазер генерирует пару противоположно распространяющихся мод с орто-сопряженными состояниями поляризации, величина флуктуации частоты биений между модами составляет около 7 kHz. В случае когда лазер генерирует пару противоположно распространяющихся мод с комплексно-сопряженными состояниями поляризации, аналогичные флуктуации двулучепреломления лазерного резонатора приводят к флуктуациям частоты биений между модами, не превышающим 800 Hz. Данный результат демонстрирует значительное уменьшение чувствительности невязимого частотного сдвига между противоположно распространяющимися модами к флуктуациям двулучепреломления лазерного резонатора. В спектре, показанном на рис. 4, *b*, присутствуют слабые боковые пики со сдвигом около  $\Delta\nu/2$ , обусловленные неточностью угла вращения  $90^\circ$ -ного фарадеевского элемента. Эти пики являются результатом биений между генерируемыми лазером противоположно распространяющимися комплексно-сопряженными модами и ближайшими продольными модами, генерация которых сильно подавлена.

**3. Заключение.** Результаты исследования Eг-волоконно-оптического кольцевого двунаправленного лазера с  $90^\circ$ -ным фарадеевским вращателем, использованным в резонаторе в качестве фазового невязимого элемента, подтверждены теоретически. Достигнуты два различных режима генерации: одномодовая двунаправленная генерация противоположно распространяющихся мод с орто-сопряженными и с комплексно-сопряженными состояниями поляризации. В последнем режиме генерации было достигнуто значительное подавление чувствительности невязимого частотного сдвига между противоположно распространяющимися модами к флуктуациям двулучепреломления лазерного резонатора.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 00-02-16903.

## Список литературы

- [1] *Chow W.W., Gea-Banacloche J., Pedrotti L.M., Sanders V.E., Schleich W., Scully M.O.* // *Reviews of Modern Physics*. 1985. V. 57. P. 61–104.
- [2] *Desurvire E.* *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*. A Wiley-Interscience publication. 1994. P. 225–244.
- [3] *Kiyan R., Kim S.K., Kim B.Y.* *Proceedings of the OFS-11*. Sapporo. Japan. May 21–24. 1996. Paper Th3-45. P. 598–601.
- [4] *Kiyan R., Kim S.K., Kim B.Y.* // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1996. V. 8. P. 1624–1626.
- [5] *Киян Р.В., Фотиади А.А., Шакин О.В.* // *Письма в ЖТФ*. 2003. Т. 29. В. 9. С. 24–28.