

07;12

Наблюдение пассивной модуляции добротности в эрбиевом волоконном лазере при малых мощностях накачки

© А.А. Фотиади, Р.В. Киян, О.В. Шакин

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

Поступило в Редакцию 19 декабря 2000 г.

При мощности накачки менее 100 мВт нами наблюдался эффект пассивной модуляции добротности в эрбиевом волоконном лазере, обусловленный каскадным процессом рэлеевского рассеяния света и вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в волоконном резонаторе лазера. В режиме модуляции добротности лазер генерировал гигантские импульсы с длительностью менее 15 нс и пиковой мощностью, достигающей 200 Вт. Период следования импульсов составлял 300–500 мкс. Вывод о механизме, приводящем к модуляции добротности в лазере, был сделан по характерным особенностям осциллограмм лазерных импульсов, полученным с разрешением ~ 1 нс. Ранее этот эффект наблюдался только в мощных волоконных лазерах при мощности накачки ~ 2 Вт.

1. Введение. В последние годы широкое распространение получили волоконные лазеры на основе волокон, легированных ионами редкоземельных элементов. Наиболее успешно используются лазеры на основе иттербиевых (Yb) и эрбиевых (Er) легированных оптических волокон (длины волн излучения соответственно 1.0–1.2 и 1.52–1.58 μm) [1,2]. Один из возможных путей дальнейшего развития волоконных лазеров — создание новых волоконно-оптических конфигураций, в которых помимо механизма инверсной населенности для усиления света используются также другие механизмы преобразования световой энергии, например эффекты линейного и нелинейного рассеяния света в оптическом волокне [3,4].

Механизм пассивной модуляции добротности за счет эффектов встречного рэлеевского рассеяния (РР) и вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в волоконном лазере был предложен впервые в [5] в связи с изучением динамики мощного Yb-волоконного лазера [6]. При мощности накачки ~ 2 Вт Yb-лазер

генерировал гигантские импульсы с пиковой мощностью до 10 kW и длительностью менее 5 ns. Суть РР-ВРМБ механизма заключается в том, что рэлеевское рассеяние света, приводя к распределенной обратной связи в лазерном резонаторе, вызывает сужение линии генерации волоконного лазера и таким образом создает условие для развития каскадного ВРМБ в лазерном резонаторе. Лавинообразная динамика ВРМБ обуславливает формирование гигантских импульсов [7,8].

В нашем эксперименте режим пассивной модуляции добротности эрбиевого волоконного лазера был реализован при мощностях накачки, в ~ 50 раз меньших, чем в эксперименте [6]. При оптимальной геометрии лазера и накачке ~ 90 mW от полупроводникового лазерного диода лазер генерировал последовательность импульсов с длительностью менее 15 ns и пиковой мощностью, достигающей 200 W. Детальное изучение структуры лазерного излучения с помощью скоростного цифрового осциллографа (с разрешением ~ 1 ns) позволило выявить ряд особенностей тонкой структуры лазерных импульсов, однозначно указывающих на механизм их образования. В частности, было обнаружено, что гигантскому импульсу всегда предшествует импульс-предвестник с пиковой мощностью менее 5 W и длительностью 50–200 ns. Предвестник имеет характерный затянутый передний фронт и отстоит от гигантского импульса на время, равное или меньшее, чем время пробега света по линейному резонатору. При этом отношение этих времен было тем меньше, чем эффективнее модуляция добротности. Эти наблюдения находятся в полном согласии с РР-ВРМБ моделью [7,8].

2. Схема эксперимента. В нашем эксперименте известная ранее конфигурация волоконного лазера [6] была реализована с использованием эрбиевого волокна, накачиваемого на длине волны $0.980 \mu\text{m}$ одномодовым лазерным диодом. Максимальная выходная мощность лазера накачки в эксперименте не превышала 100 mW.

Схема лазера показана на рис. 1. Лазер состоит из двух связанных волоконных резонаторов — кольцевого и линейного. Связь между резонаторами осуществляется через волоконный X-образный ответвитель 1 с коэффициентом деления 10/90. Кольцевой резонатор 2 изготовлен из отрезка стандартного одномодового волокна ~ 2 m. Линейный резонатор лазера состоит из брэгговской волоконной решетки 3 с 90%-ным отражением на длине волны $1.532 \mu\text{m}$, волоконного Er-усилителя 4 длиной ~ 7 m и отрезка стандартного одномодового волокна 5. WDM —

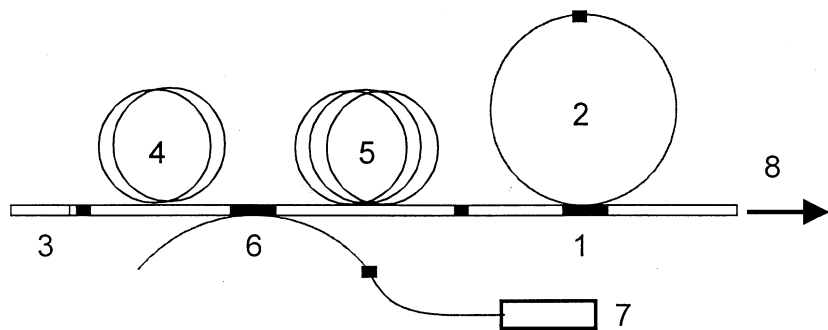


Рис. 1. Экспериментальная схема эрбиевого волоконного лазера: 1 — волоконный ответвитель с коэффициентом деления 10/90, 2 — кольцевой волоконный резонатор длиной ~ 2 м, 3 — брэгговская волоконная решетка с 90%-ным отражением на длине волны $1.532 \mu\text{m}$, 4 — волоконный Er-усилитель длиной 7 м, 5 — отрезок стандартного одномодового волокна (длиной 1 м для конфигурации с коротким резонатором и длиной 36 м для конфигурации с длинным резонатором), 6 — волоконный WDM-ответвитель, 7 — $0.98 \mu\text{m}$ одномодовый лазерный диод накачки, 8 — выходное излучение лазера.

ответвитель 6 включен в линейный резонатор между эрбиевым волокном 4 и волокном 5 для ввода излучения накачки 7.

Излучение на выходе лазера 8 регистрировалось германиевым фотодиодом. Сигнал с фотодиода оцифровывался и записывался запоминающим осциллографом для последующего анализа. Временное разрешение регистрирующей схемы составляло ~ 1 пс.

Динамика лазера была изучена для двух разных конфигураций, отличающихся длиной отрезка одномодового волокна 5, включенного в линейный резонатор. В конфигурации с коротким резонатором длина линейного резонатора составляла 8 м, в конфигурации с длинным резонатором — 44 м.

3. Результаты эксперимента. В ходе эксперимента мы наблюдали два качественно различных режима работы лазерной схемы, изображенной на рис. 1. В первом случае обратная связь в линейном резонаторе возникала благодаря 2–4%-му отражению от свободного торца волокна на выходе лазера. При мощности накачки 30–100 мВт генерация предста-

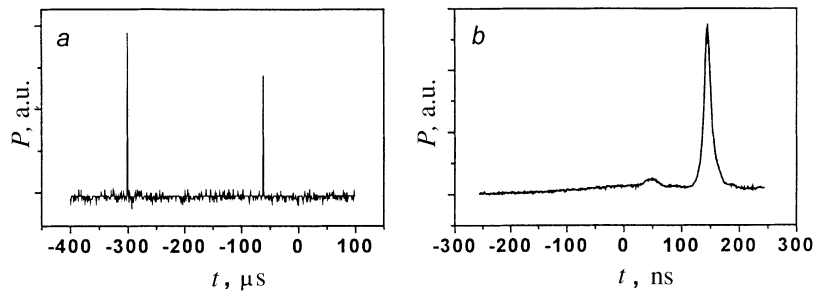


Рис. 2. Характерные осциллограммы лазерного излучения на выходе конфигурации с коротким линейным резонатором, при мощности накачки 80 мВт, в микросекундном (а) и наносекундном (б) временных масштабах.

вляла собой непрерывный, модулированный шумом сигнал со средней мощностью $\sim 10\text{--}30$ мВт. Никаких регулярных пульсаций интенсивности лазера выше уровня шума в излучении лазера не наблюдалось. Центр линии генерации находился на длине волны $1.532\ \mu\text{m}$.

Качественно другое поведение лазера наблюдалось, когда отражение от свободного торца волокна на выходе лазера было подавлено, а обратная связь в линейном резонаторе обеспечивалась за счет естественного рэлеевского отражения света в кольцевом резонаторе. При повышении уровня накачки до ~ 90 мВт лазер самопроизвольно переходил в режим генерации непрерывной последовательности гигантских импульсов и интервалом между импульсами в пределах $\sim 300\text{--}500\ \mu\text{s}$. Флуктуации амплитуды импульсов при этом достигали величины $\sim 50\%$.

Импульсная генерация лазера наблюдалась и при меньших мощностях накачки. Типичная осциллограмма лазерных импульсов приведена на рис. 2. Правильный скос торца волокна под углом на выходе лазера, минимизирующий отражение, позволял снизить порог мощности накачки, при которой лазер переходил в режим самопроизвольной генерации импульсов, до ~ 70 мВт. Слабое акустическое воздействие на резонатор лазера позволяло получать импульсную генерацию лазера уже при мощности накачки ~ 30 мВт.

Следует отметить, что способ возбуждения пульсаций никак не влиял на характерные особенности импульсов генерации, которые определялись только конфигурацией лазера и уровнем мощности накачки. При

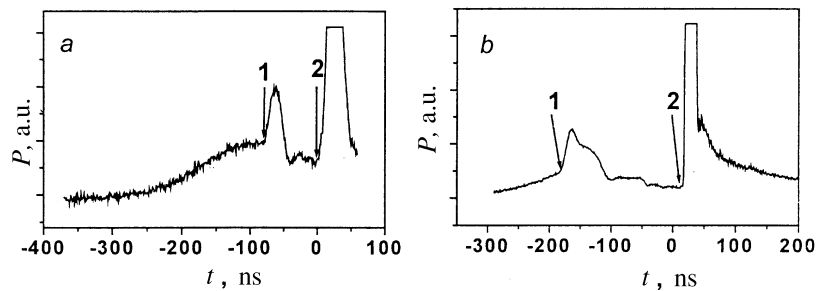


Рис. 3. Характерные осциллограммы тонкой структуры лазерного импульса на выходе лазера при мощности накачки 80 мВт для конфигурации с коротким (а) и длинным (б) линейным резонатором.

мощности накачки ~ 90 мВт в конфигурации с коротким линейным резонатором пиковая мощность импульсов достигала ~ 10 Вт, а их характерная длительность составляла ~ 40 – 50 нс, причем этот параметр был гораздо стабильней, чем другие характеристики импульсов. При той же мощности накачки в конфигурации с длинным линейным резонатором модуляция добротности была более эффективна, а лазерные импульсы интенсивнее и короче. Характерная длительность импульса составляла 10–20 нс, а пиковая мощность достигала 100–200 Вт.

Характерной особенностью динамики лазера, обусловленный механизмом РР–ВРМБ [5–8], является наличие предвестника — слабого импульса, предшествующего гигантскому импульсу. Такие предвестники наблюдались в лазерном излучении, регистрируемом на выходе лазера и хорошо видны на осциллограмме рис. 2, б. Пиковая мощность предвестника во всех экспериментах не превышала 5 Вт, а его характерная длительность составляла 50–200 нс.

Тонкая временная структура излучения, предшествующая генерации гигантского импульса, была изучена для обеих конфигураций резонатора лазера. На рис. 3, а представлены осциллограммы импульсного излучения, полученные на выходе лазера с коротким линейным резонатором. На ней хорошо видна динамика формирования гигантского импульса, можно выделить несколько стадий развития процесса: сначала медленный рост с характерным временем ~ 70 нс, затем генерация малого импульса — предвестника (точка 1), затем провал и генерация гигант-

ского импульса (точка 2). Необходимо отметить, что перечисленные особенности присутствуют на всех осциллограммах, полученных для данной конфигурации лазера. Характерное время роста левее точки 1 несколько различно для разных реализаций, но всегда меньше, чем ~ 80 ns. Временной интервал между точками генерации предвестника 1 и генерации гигантского импульса 2 составляет ~ 80 ns, что соответствует времени двойного обхода светом линейного резонатора.

Похожая временная структура наблюдалась и в конфигурации с длинным линейным резонатором. Типичная осциллограмма лазерной генерации в этом случае представлена на рис. 3, *b*. В целом она повторяет характерные особенности временного поведения, отмеченные в базовой конфигурации (медленно растущая часть, предвестник и гигантский импульс). Однако в данном случае предвестник и гигантский импульс (точки 1 и 2 соответственно) разделены временным интервалом, который флуктуировал в пределах ~ 200 – 400 ns, но всегда был меньше, чем время двойного пробега света по линейному резонатору (~ 440 ns). Например, на осциллограмме, представленной на рис. 3, *b*, этот интервал составляет ~ 200 ns. Кроме того, было замечено, что временная задержка между предвестником и гигантским импульсом тем меньше, чем эффективнее модуляция добротности.

В целом по сравнению с экспериментальными данными, полученными для волоконных лазеров с большой мощностью накачки [5,6], динамика лазера с низким уровнем накачки существенно проще. Формирование импульса происходило медленнее, с четким разделением на различные стадии, которые могут быть классифицированы согласно РР–ВРМБ модели [7,8]. Также нами не были обнаружены свидетельства того, что другие нелинейные оптические эффекты, помимо ВРМБ, не влияют на динамику процесса.

4. Заключение. Таким образом, в нашем эксперименте механизм пассивной модуляции добротности за счет совместного процесса рэлеевского рассеяния и ВРМБ был успешно реализован в эрбиевом волоконном лазере при аномально малых мощностях диодной накачки. При мощности накачки 90 mW лазер генерировал последовательность импульсов с длительностью менее 15 ns и пиковой мощностью, достигающей 200 W. В эксперименте изучен ряд особенностей тонкой структуры лазерных импульсов, однозначно указывающих на механизм их образования. Описанный эффект может быть использован при создании новых лазерных источников света.

Детальное сравнение результатов экспериментального исследования с расчетами, выполненными на основе РР–ВРМБ модели, будет дано в последующих публикациях.

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

Список литературы

- [1] *Rare earth doped fiber lasers and amplifiers* / Ed. by M.J.F. Digonnet. Marsel Dekker Inc., 1993.
- [2] *Desurvire E.*, Erbium-doped fiber amplifiers. A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc., 1994. 770 p.
- [3] *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика / Пер. с англ. М.: Мир, 1996. 323 с.
- [4] *Kuzin E.A., Petrov M.P., Fotiadi A.A.* Phase conjugation by SMBS in optical fibers // *Optical phase conjugation* / Ed. by Gower, D. Proch. Springer-Verlag, 1994. P. 74–96.
- [5] *Chernikov S.V., Fotiadi A.A.* // Conference on Laser and Electro-Optics: 1997. Technical Digest Series. Optical Society of America, Washington, D.C.-Baltimore, USA, 1997. P. 477–478.
- [6] *Chernikov S.V., Zhu Y., Taylor J.R., Gapontsev V.P.* // *Opt. Lett.* 1997. V. 22. P. 298–301.
- [7] *Fotiadi A.A., Kiyani R.V., Chernikov S.V.* // *Laser Optics'98: Fundamental Problems of Laser Optics.* SPIE Proceedings. 1999. V. 3685. P. 52–57.
- [8] *Fotiadi A.A., Kiyani R.V.* // *Ioffe Institute Prize Winners 1997.* Ioffe Physico-Technical Institute. St. Petersburg, 1998. P. 43–48.