

Новый способ управления выходной мощностью иттербиевого волоконного лазера

В.Г.Воронин, О.Е.Наний, А.А.Сусьян, В.И.Хлыстов

Предложен новый способ управления выходной мощностью линейно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера с двойной оболочкой. Способ основан на модуляции инверсной населенности излучением конкурирующего канала при модуляции потерь в нем. Определены статические зависимости выходной мощности рабочего канала от потерь в конкурирующем канале. Полученные результаты качественно объясняются в рамках стандартных теоретических моделей двухканального лазера.

Ключевые слова: двухканальный лазер, волокно, волоконный лазер, поляризация, порог генерации, модуляция.

1. Введение

Волоконные лазеры средней и высокой мощности представляют большой практический интерес, в частности для промышленных [1–3] и медицинских [4] применений, для накачки волоконных усилителей [5–7], для исследования нелинейно-оптических явлений в оптических волокнах и в качестве источников излучения для распределенных датчиков [8–12]. Этим объясняется неослабевающий интерес к исследованию их выходных характеристик [13–18]. Для многих применений требуются источники излучения с управляемой по заданному закону выходной мощностью – оптические сигнал-генераторы. Среди большого количества волоконных лазеров наибольшими КПД и выходной мощностью обладают иттербиевые лазеры, которые по этой причине наиболее перспективны для промышленных применений [19, 20].

Прямая модуляция выходного излучения путем модуляции мощности накачки ограничена частотами, равными обратному времени жизни возбужденного состояния: для иттербиевых волоконных лазеров $f_m = 1/T_1 \approx 1000$ Гц ($T_1 = 10^{-3}$ с [21]). Получение модулированного излучения при использовании маломощного управляющего лазера, генерирующего импульсы нужной формы, и последующее их усиление внешними усилителями ограничено высокочастотной модуляцией с частотами более 100 кГц и возможно только при условии сохранения постоянной средней мощности излучения. При низкочастотной модуляции передаточные характеристики отличаются очень сильной нелинейностью, связанной с эффектом насыщения из-за модуляции инверсной населенности усилителей. В телекоммуникационных усилителях, в частности, наблюдается переходный процесс, для борьбы с которым необходимо использовать специальные

системы стабилизации [22, 23]. Кроме того, в диапазоне частот $1 < f_m < 100$ кГц модуляция выходного излучения путем модуляции потерь лазера затруднена из-за возникновения переходных релаксационных процессов [24].

Таким образом, существует реальная потребность в разработке новых эффективных способов модуляции излучения иттербиевых волоконных лазеров средней и высокой мощности в диапазоне частот $1 < f_m < 100$ кГц. В настоящей работе предложена и экспериментально продемонстрирована возможность управления выходной мощностью линейно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера с двойной оболочкой путем модуляции потерь во втором конкурирующем канале, излучение которого поляризовано перпендикулярно излучению первого канала.

Сама по себе идея использования конкуренции каналов для модуляции была предложена довольно давно в работах [25–29], в которых рассматривалась конкуренция двух частично пространственно разделенных каналов с одним общим активным элементом. Возможность существенно увеличить эффективность модуляции и, что более существенно, устранить переходные релаксационные процессы, характерные для твердотельных лазеров, была экспериментально показана в [28, 29] для различных типов двухканальных лазеров.

Установленный в работах [14, 15] факт сосуществования в иттербиевых волоконных лазерах с двойной оболочкой двух линейно поляризованных конкурирующих каналов генерации позволил сделать предположение о возможности использования в них общего принципа управления мощностью излучения генерации одного канала путем модуляции потерь в другом канале. Следует отметить, что ранее было экспериментально показано [17], что неодимовый волоконный лазер с двумя типами поляризации по своим динамическим характеристикам может рассматриваться как двухмодовый лазер с двумя обобщенными поляризационными модами.

Таким образом, в настоящей работе была поставлена задача экспериментальной проверки гипотезы о возможности управления мощностью выходного излучения основного канала иттербиевого волоконного лазера путем модуляции потерь в конкурирующем канале генерации.

В.Г.Воронин, О.Е.Наний, А.А.Сусьян, В.И.Хлыстов. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: nanii10@rambler.ru, alexander.susyan@gmail.com

Поступила в редакцию 8 декабря 2008 г., после доработки – 16 октября 2009 г.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Активным элементом 4 лазера является волокно, состоящее из одномодовой сердцевины, внутренней оболочки из кварцевого стекла и внешней оболочки с меньшим, чем у внутренней оболочки, показателем преломления. Использовалось волокно с квадратным сечением внутренней оболочки, поскольку такая геометрия оптимальна для обеспечения эффективного поглощения излучения накачки сердцевиной и одновременно для снижения потерь излучения источника накачки на сварном соединении с круглым волокном [19]. Для накачки использовался лазерный диод 1 с выводом излучения через многомодовое волокно с диаметром сердцевины 100 мкм и числовой апертурой $NA = 0.22$. Мощность накачки могла достигать 5 Вт на длине волны $\lambda = 0.98$ мкм. Для защиты лазерного диода от излучения волоконного лазера использовался спектрально-селективный фильтр 2 на основе волокна с двойной оболочкой и сердцевиной, легированной самарием [30]. Такой спектральный селектор обеспечивает подавление на несколько порядков излучения волоконного лазера в спектральном диапазоне 1.03–1.30 мкм, при этом дополнительные потери для излучения накачки не превышают 0.5 дБ, поскольку оно распространяется, в основном, вне сердцевины, легированной самарием. Первым (глухим) зеркалом резонатора лазера служила брэгговская решетка 3, а вторым зеркалом – торец волокна 5, сколотого под углом 90° . Брэгговская решетка 3 [31] имела спектральную ширину 0.7 нм и фактически являлась фильтром, ограничивающим ширину спектра линии генерации лазера. Коэффициент отражения брэгговской решетки на $\lambda = 1081$ нм превышал 99 %.

На выходе волокна 5 излучение расходится под углом $\sim 14^\circ$, поэтому для его фокусировки используется линза 6. Линза установлена так, чтобы расстояние между ней и торцом волокна было немного меньше фокусного и пучок после линзы был слабо сходящимся.

Для разделения компонент поляризации выходного излучения лазера используется двулучепреломляющая поляризационная призма 7. Компонента, поляризованная вдоль обыкновенной оси призмы, распространяется без отклонения и, пройдя через оптический attenuатор 8, полупрозрачное зеркало 9 и светофильтры 10, попадает на фотодиод 12. А компонента, соответствующая необыкновенной оси, отклоняется на некоторый угол и, отра-

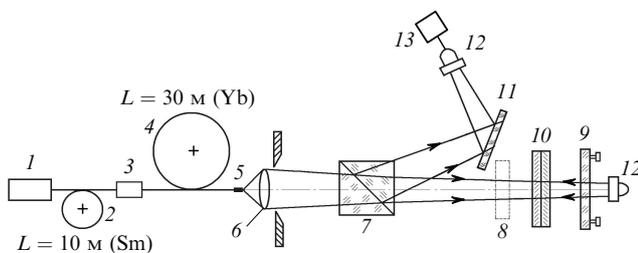


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

1 – лазерный диод; 2 – отрезок волокна, легированного самарием; 3 – брэгговская решетка; 4 – отрезок волокна, легированного иттербием; 5 – торец волокна; 6 – фокусирующая линза; 7 – поляризатор; 8 – оптический attenuатор; 9 – полупрозрачное зеркало; 10 – фильтры; 11 – зеркало ($R = 100\%$); 12 – фотодиоды; 13 – измеритель мощности.

жившись от зеркала 11, попадает на измеритель мощности 13. Полупрозрачное зеркало 9 используется для того, чтобы направлять часть излучения обратно в резонатор лазера; тем самым оно образует дополнительный резонатор, или цепь обратной связи, для излучения той компоненты поляризации, которая формирует управляющий канал лазера. Рабочий, или основной, резонатор лазера, соответствующий ортогональной поляризации, образован брэгговским зеркалом и торцом активного волокна. Attenuатор 8 играет вспомогательную роль для настройки дополнительного резонатора, после чего извлекается из контура центрального пучка. Светофильтры 10 используются для внесения дополнительных потерь в этот контур.

Сигналы с фотоприемников 12 подаются на спектроанализатор и цифровой двухканальный запоминающий осциллограф АСК-3151 и вводятся в память компьютера.

3. Результаты эксперимента

Экспериментальные исследования показали, что динамика излучения иттербиевого лазера существенно зависит от мощности накачки, длины активного волокна и температуры.

При малом превышении накачки над порогом ($\alpha = 1 - 1.2$) наблюдаются пиковые режимы генерации (рис.2,а), причем частота появления пиков в канале с меньшими потерями существенно выше, чем в канале с ортогональной поляризацией. В диапазоне накачек $\alpha = 1.2 - 1.45$ имеет место режим самопроизвольных переключений поляризации [15] (рис.2,б), в котором средняя мощность излучения двух ортогонально поляризованных каналов периодически изменяется от максимального значения почти до нуля. Экспериментально измеренные зависимости частоты переключений от мощности накачки приведены на рис.3. Следует отметить, что наряду с относительно медленными переключениями средней мощности двух каналов продолжает наблюдаться амплитудная пиковая модуляция, частота которой растет с увеличением мощности накачки. При более высоких мощностях наблюдается стационарная генерация двух поляризационных каналов (рис.2,в,г).

Проведенные экспериментальные исследования показали существенное влияние потерь во внешней части резонатора управляющего канала на выходную мощность и динамику генерации основного канала. Изменяя пропускание нейтральных фильтров, можно управлять, в частности, частотой переключений и скважностью импульсов основного канала генерации в режиме самопроизвольных переключений (рис.2,б).

На рис.4 приведены статические зависимости выходной мощности основного канала от коэффициента пропускания (при двойном проходе) дополнительных нейтральных фильтров, установленных во внешней части резонатора управляющего канала, для двух значений мощности накачки, соответствующих стационарной двухканальной генерации (см. рис.2,в,г). С точки зрения практических приложений управление мощностями каналов интересно именно в этих – квазистационарных – режимах генерации лазера.

Из рис.4 также видно, что при $\alpha = 2.5$ крутизна зависимости мощности основного канала от пропускания нейтрального фильтра в управляющем канале меньше,

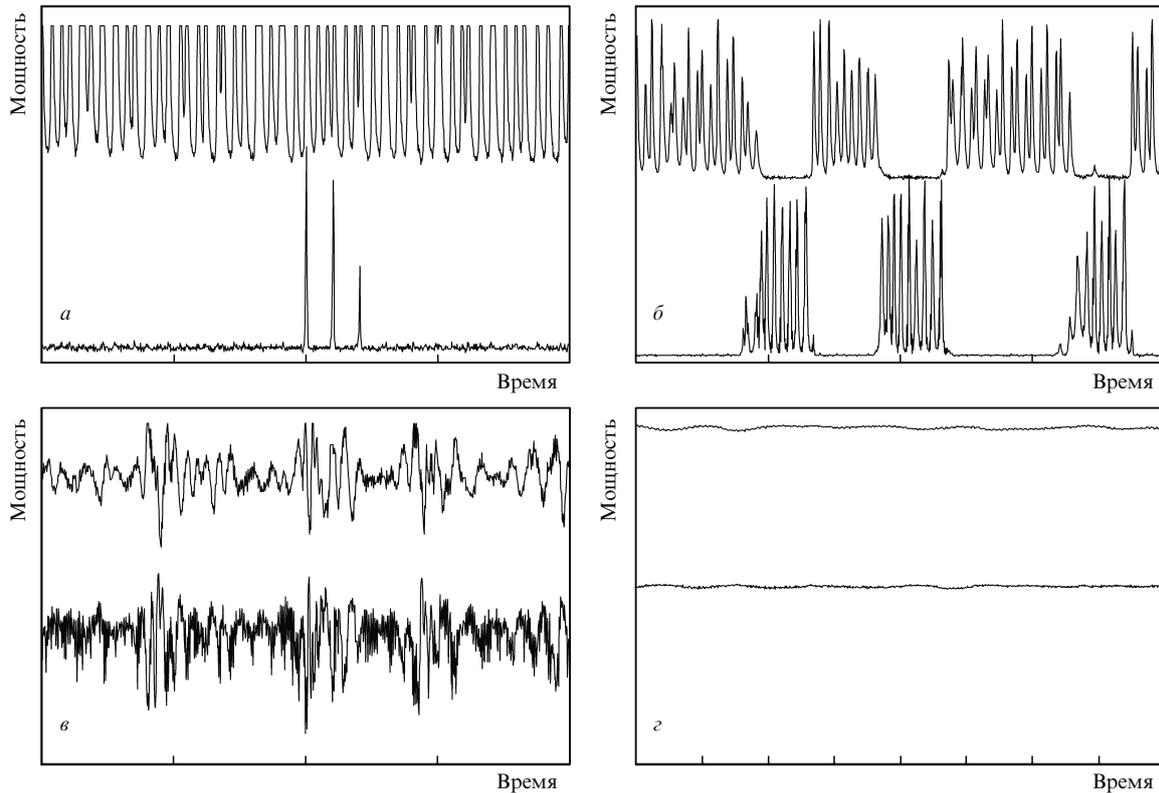


Рис.2. Временные зависимости мощности излучения двух ортогонально поляризованных каналов генерации для четырех уровней накачки: $\alpha = 1.15$ (а), 1.19 (б), 1.47 (в) и 1.9 (г). Скорость развертки 0.5 мс/дел. Верхний трек – управляющий канал, нижний трек – основной канал.

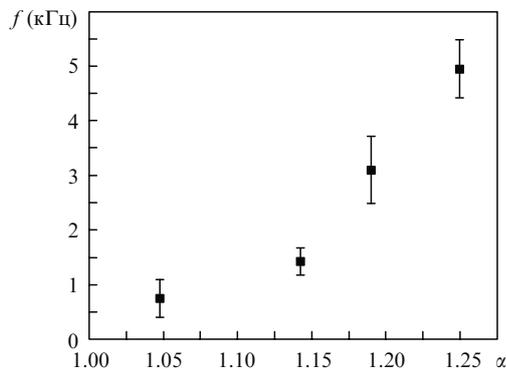


Рис.3. Зависимость частоты переключений генерации от превышения мощности накачки над порогом.

чем при $\alpha = 1.55$. Следовательно, эффективность модуляции выходной мощности, определяемая как отношение разности двух значений выходной мощности лазера к соответствующей разности коэффициентов пропускания светофильтров 10 , снижается с увеличением мощности накачки. Однако принципиальным является тот факт, что возможность управления мощностью основного канала без внесения в него каких-либо потерь сохраняется и при достаточно больших превышения накачки над порогом.

4. Обсуждение результатов

Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты, подтвердившие возможность управления мощностью рабочего канала иттербиевого волоконного лазера путем модуляции потерь в управляющем канале, можно качественно объяснить с помощью простейшей

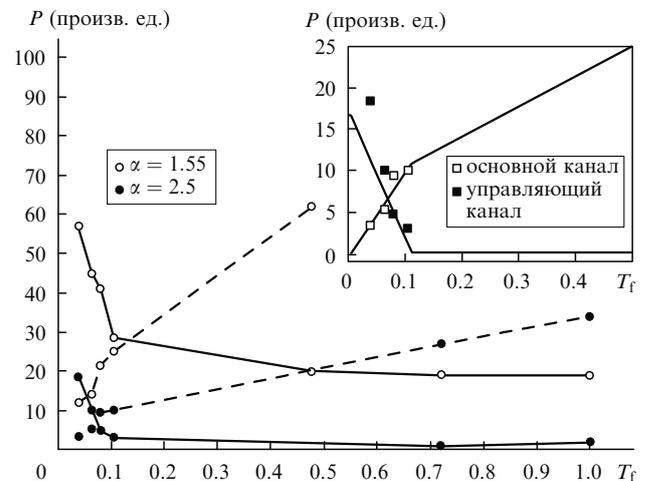


Рис.4. Зависимости мощностей основного (штриховые линии) и управляющего (сплошные линии) каналов генерации от коэффициента пропускания T_f дополнительных фильтров внутри внешней части резонатора при $\alpha = 1.55$ и 2.5 . На вставке изображены теоретические зависимости (сплошные линии) и экспериментальные точки для $\alpha = 1.55$.

модели двухканального лазера [17, 32]. Вместе с тем для описания пиковых режимов и режимов переключений (рис.2,а и б) необходимо использовать модель, в которой учитывается взаимодействие каналов в поглощающей области активного волокна [33].

Физический механизм модуляции выходной мощности обоих каналов двухканальных лазеров при модуляции потерь только в одном из них был установлен ранее в работе [32] на основе анализа феноменологической системы уравнений, учитывающей конкурентное взаимодействие каналов генерации в активной среде. Примени-

мость модели двухканального лазера к описанию поляризационной динамики волоконного неодимового лазера с двумя поляризациями была показана еще раньше в [17].

К сожалению, получить количественное совпадение теории и эксперимента при использовании приближения двухканальной генерации не удастся. Одна из причин этого заключается в том, что резонатор управляющего канала является составным: торец активного волокна и внешнее полупрозрачное зеркало 9 образуют дополнительный резонатор, оказывающий существенное влияние на модовый состав излучения управляющего канала. При изменении пропускания светофильтров 10 внешнего резонатора в нашем эксперименте неизбежно происходит изменение структуры мод. Более того, само наличие связанных резонаторов в управляющем канале существенно прореживает структуру мод этого канала. Для получения количественного согласия между теорией и экспериментом следует учесть модовую структуру рабочего и управляющего каналов, что неизбежно приведет к увеличению числа связанных уравнений и усложнит теоретический анализ.

С другой стороны, в эксперименте и при практическом использовании предложенного метода модуляции мощности излучения рабочего канала следует по возможности устранить отражения от торца волокна в управляющем канале. Это должно обеспечить повышение эффективности модуляции и стабильности излучения лазера.

В теоретической модели двухканального лазера [17, 32] коэффициенты кросс-насыщения являются параметрами, не зависящими от мощности накачки. Однако существуют экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что с ее ростом они могут изменяться [34]. Причиной этого может быть сильная пространственная неоднородность распределения накачки в продольном направлении. Поскольку иттербиевый волоконный лазер работает по квазитрехуровневой схеме, то при малых превышениях накачки над порогом в активном волокне существует область поглощения, наличие которой существенно изменяет динамику генерации лазера. С увеличением мощности накачки резонатор сильнее просветляется – излучение проникает глубже, что приводит к изменению распределения инверсной населенности, которое может вызвать изменения коэффициентов кросс-насыщения.

5. Заключение

В работе предложен новый способ управления выходной мощностью линейно поляризованного излучения иттербиевого волоконного лазера, заключающийся в модуляции потерь в управляющем канале. Главное достоинство предлагаемого метода – отсутствие дополнительных элементов в рабочем канале генерации и нахождение модулятора в управляющем канале. Экспериментально измерены статические зависимости выходных мощностей каналов генерации от потерь, вносимых в управляющий канал. Анализ этих характеристик позволяет утверждать, что предлагаемый метод дает возможность эффективно управлять выходной мощностью иттербиевого волоконного лазера.

Принцип управления мощностью рабочего канала путем модуляции потерь управляющего канала качественно можно объяснить на основе феноменологической модели двухканального твердотельного лазера, учитывающей конкуренцию каналов в активной среде. Однако при наличии сложного составного резонатора в управляющем канале необходим учет изменения его модового состава, что делает упрощенную двухканальную модель непригодной для количественного сравнения экспериментальных и теоретических результатов. По всей видимости, количественное согласие между теорией и экспериментом будет достигнуто при учете многомодовой структуры излучения каждого канала.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-4408.2008.2.

1. Gapontsev V., Krupke W. *Laser Focus World*, **38**, 83 (2002).
2. Mahrlé A., Lütke M., Beyer E. *Proc. IMechE.C.*, **224** (2009).
3. Sparkes M., Gross M., Celottj S., et al. *J. Laser Appl.*, **20** (1), 59 (2008).
4. Гапонцев В.П., Минаев В.П., Савин В.И., Самарцев И.Э. *Квантовая электроника*, **32**, 1003 (2002).
5. Bour D.P., Dinkel N.A., Gilbert D.B., Fabian K.B., Harvey M.G. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **2**, 153 (1990).
6. Becker P.C., Olsson N.A., Simpson J.R. *Erbium Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology* (San Diego: Acad. Press, 1999).
7. Дианов Е.М. *УФН*, **174**, 1139 (2004).
8. Shatalin S., Treschikov V., Rogers A. *Appl. Opt.*, **37**, 5600 (1994).
9. Juarez J.C., Maier E.W., Kyoo Nam Choi, Taylor H.F. *J. Lightwave Technol.*, **23**, 2081 (2005).
10. Maier E.W. *Buried Fiber Optic Intrusion Sensor. Master of Science* (Texas A&M University, 2004).
11. Shubin Jiang, Brak Ph. *Laser Focus World*, **40**, 91 (2004).
12. Hadelé O., Ibsen M., Zervas M.N. *Appl. Opt.*, **40**, 3169 (2001).
13. Дианов Е.М., Буфетов И.А. *Lightwave Russian Edition*, **4**, 44 (2004).
14. Воронин В.Г. и др. *Вестник моск. ун-та. Сер. Физика, астрономия*, **2**, 46 (2002).
15. Воронин В.Г., Наний О.Е., Ся Яньвэнь. *Квантовая электроника*, **37**, 339 (2007).
16. Воронин В.Г. и др. *Вестник моск. ун-та. Сер. Физика, астрономия*, **5**, 35 (2005).
17. Bielawski S., Derozier D., Glorieux P. *Phys. Rev. A*, **46**, 2811 (1992).
18. Zeghlache H., Boulnois A. *Phys. Rev. A*, **52**, 4229 (1995).
19. Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34**, 881 (2004).
20. Gray S. et al. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **15**, 37 (2009).
21. Буфетов И.А. и др. *Квантовая электроника*, **36**, 189 (2006).
22. Борисов М.А. *Lightwave. Russian Edition*, **4**, 34 (2005).
23. Desurvire E. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications* (New York: A Wiley-Interscience publ., 1994).
24. Ханнин Я.И. *Основы динамики лазеров* (М.: Наука, 1999).
25. Каминский А.А. *Лазерные кристаллы* (М.: Наука, 1975).
26. Каминский А.А. *Изв. АН СССР. Сер. Неорг. матер.*, **10**, 2230 (1974).
27. Зенченко С.А., Лешкевич С.В., Портнягин А.И., Пучек С.П., Филиппов С.Ф. *Квантовая электроника*, **17**, 841 (1990).
28. Корниенко Л.С., Наний О.Е., Шелаев А.Н. *Квантовая электроника*, **15**, 1833 (1988).
29. Надточеев В.Е., Наний О.Е. *Квантовая электроника*, **16**, 680 (1989).
30. Грух Д.А., Курков А.С., Раздобреев И.М., Фотиади А.А. *Квантовая электроника*, **32**, 1017 (2002).
31. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005).
32. Наний О.Е. *Квантовая электроника*, **23**, 17 (1996).
33. Ся Яньвэнь. *Канд. дис.* (М., НИИЯФ МГУ, 2007).
34. Dong J., Shirakawa A., Ueda K. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 109 (2007).