

# Цельноволоконный эрбиевый лазер с диодной накачкой в режиме самомодуляции добротности\*

С.Х.Крус Висенте, М.А.Мартинес Гамес, А.В.Кириянов, Ю.О.Барменков, М.В.Андрес

*Создан и исследован волоконный эрбиевый лазер с диодной накачкой, работающий в режиме самомодуляции добротности. Лазер реализован в цельноволоконной конфигурации, включающей кусок активного высококонцентрированного эрбиевого волокна и два зеркала в виде волоконных брэгговских решеток, и не требует дополнительных внутрирезонаторных элементов для получения режима коротких импульсов. Анализ работы лазера позволяет заключить, что наиболее вероятным механизмом пассивной модуляции добротности резонатора является поглощение из возбужденного состояния в эрбии, приводящее к термоиндуцированному нелинейному изменению показателя преломления в эрбиевом активном волокне.*

**Ключевые слова:** волоконные эрбиевые лазеры, самомодуляция добротности, поглощение из возбужденного состояния, нелинейная тепловая линза.

## 1. Введение

Волоконные эрбиевые лазеры с модулированной добротностью (МД) в настоящее время широко применяются в системах телекоммуникации, для целей рефлектометрии и ряда медицинских задач, а также в распределенных волоконно-оптических датчиках.

Режим МД в лазерах, в том числе волоконных, может быть реализован как активными, так и пассивными способами. Среди активных методов МД в волоконных лазерах следует отметить использование волоконного модулятора интенсивности [1], модуляцию тока диодного лазера накачки [2], использование в качестве модулятора пары внутрирезонаторных фильтров Фабри – Перо, один из которых сканируемый по пропусканию [3], а также наиболее часто применяемый метод акустооптического модулятора внутри резонатора [4–7].

Практически во всех лазерах с активной МД резонатора модуляция реализуется в объемных (неволоконных) оптических элементах, что значительно усложняет их конструкцию. Поэтому в последнее время значительно возрос интерес к разработке пассивных методов МД в волоконных лазерах, в том числе и в эрбиевых. Такие лазеры имеют определенные преимущества перед лазерами с активной МД – это компактность, простота конструк-

ции, а также принципиальная возможность создания в цельноволоконном исполнении.

К настоящему времени сообщалось о нескольких подходах к реализации режима пассивной МД резонатора волоконного эрбиевого лазера. Это метод распределенного обратного рассеяния [8], метод, использующий эффект нелинейного отражения от капли жидкого галлия [9, 10], метод, в котором насыщение поглощения происходит в сложной полупроводниковой структуре СЕЗАМ [11], а также недавно продемонстрированный способ модуляции с помощью кристалла  $\text{Co}^{2+}:\text{ZnSe}$  [12, 13].

Каждый из вышеупомянутых методов пассивной МД в эрбиевом волоконном лазере имеет свои преимущества и недостатки. Говоря о недостатках, отметим, что все лазеры в работах [8–13] не являются цельноволоконными конструкциями, поэтому их сборка и настройка всегда представляет собой довольно сложную техническую задачу. Кроме того, у каждой из этих схем есть специфические недостатки. Например, иттербиевый лазер с пассивной МД за счет обратного ВРМБ [8] позволяет получать короткие и мощные (до 10 кВт) световые импульсы, но при условии, что пороговая мощность накачки довольно высока (около 2.5 Вт). При этом, как отмечают сами авторы [8], волоконный эрбиевый лазер, построенный по аналогичному принципу, работает чрезвычайно нестабильно. В лазерах [9–11] режим пассивной МД возникает также при высоких пороговых мощностях накачки: так, лазер, в котором используется эффект нелинейного зеркала в капле жидкого галлия, имеет порог 0.9 Вт, в то время как лазер с нелинейным зеркалом на основе СЕЗАМ-структуры – 2 Вт. Между тем насыщающийся поглотитель на основе галлиевого зеркала не технологичен, т. к. представляет собой каплю (галлий на открытом воздухе находится в жидком состоянии) и, следовательно, сильно подвержен внешним возмущениям. По-видимому, схема волоконного эрбиевого лазера с СЕЗАМ-структурой в качестве нелинейного элемента резонатора [11] к настоящему моменту является наиболее подходящей для реализации стабильного режима пассив-

\*Доложена на международной конференции «Оптика лазеров» (С.-Петербург, 30 июня – 4 июля 2003 г.).

S.G.Cruz Vicente, M.A.Martinez Gamez, A.V.Kir'yanov, Yu.O.Barmenkov. Centro de Investigaciones en Optica A.C., Loma del Bosque, No. 115, Col. Lomas del Campestre, Leon 37150, Guanajuato, Mexico; e-mail: kiryanov@cio.mx

Yu.O.Barmenkov, M.V.Andres. Departamento de Fisica Aplicada – ICMUV, Universidad de Valencia, Dr. Moliner Ave., No. 50, Burjassot E46100, Spain

А.В.Кириянов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kiryanov@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 22 октября 2003 г., после доработки – 15 января 2004 г.

ной МД. Однако полупроводниковые СЕЗАМ-структуры – это дорогостоящие оптические элементы, что не всегда приемлемо. Кроме того, лазер, внутри волоконного резонатора которого находится кристалл  $\text{Co}^{2+} : \text{ZnSe}$  [12, 13], также довольно перспективен. Для него характерны простота конструкции и, главное, замечательно низкий порог генерации режима пассивной МД (около 8 мВт) при пиковой мощности импульсов в непрерывном пуге 0.7 мВт, их энергии 3.2 нДж и длительности 5.4 мкс (мощность диодной накачки 60 мВт). Однако и этот лазер имеет очевидные недостатки. Во-первых, режим МД в нем наблюдается в довольно узком диапазоне мощностей накачки (20–85 мВт), и это при том, что только вблизи некоторого оптимального уровня накачки (около 60 мВт) длительность импульсов такого лазера минимальна, а их энергия и пиковая мощность максимальны. С превышением накачки этого уровня параметры лазера резко ухудшаются, а затем режим МД вообще исчезает и лазер начинает работать в непрерывном режиме. Другим недостатком лазера [12] является долговременная нестабильность самого режима пассивной МД – импульсы в пуге всегда хаотически модулированы во времени [13].

Цель настоящей работы – экспериментальная реализация и исследование особенностей режима самомодуляции добротности (СМД) волоконного эрбиевого лазера с диодной накачкой в резонаторе цельноволоконной конструкции. Такой лазер, будучи предельно простым прибором, позволяет получать высокостабильные субмикросекундные импульсы в широком диапазоне мощностей диодной накачки. Мы также приводим экспериментальные данные, позволяющие предположить, что наиболее вероятным физическим механизмом СМД в данном лазере является поглощение из возбужденного состояния (ПВС) в эрбии, в результате которого в активном эрбиевом волокне возникает сильная термоиндуцированная нелинейная линза.

## 2. Эксперимент

Схема лазера представлена на рис.1. Его резонатор состоял из куска сильнолегированного эрбиевого волокна длиной от 30 до 200 см, к которому с обеих сторон были приварены отрезки световодов с волоконными брэгговскими решетками (ВБР). Каждая ВБР имела максимальный коэффициент отражения (на длине волны 1560 нм) от 85 до 95%. Активное эрбиевое волокно (молярная концентрация  $\text{Er}_2\text{O}_3$  0.23 %, диаметры сердцевинки и оболочки соответственно 2.7 и 125 мкм, числовая апертура 0.27, длина волны отсечки 1.04 мкм) накачивалось через WDM-мультиплексор коммерческим мало-мощным лазерным диодом, имеющим волоконный вы-

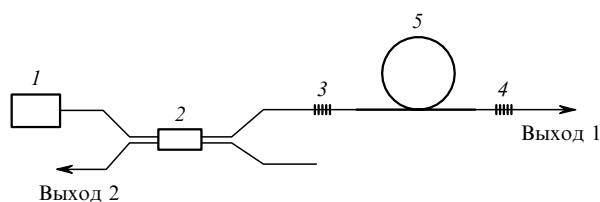


Рис.1. Схема волоконного эрбиевого лазера: 1 – диодный лазер накачки; 2 – WDM-мультиплексор; 3, 4 – ВБР-зеркала; 5 – эрбиевое волокно.

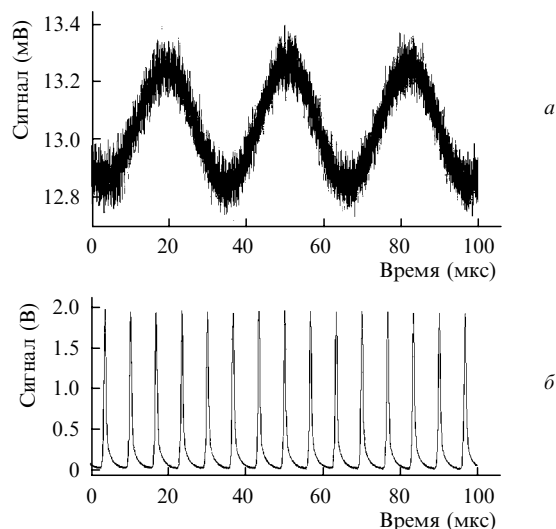


Рис.2. Временные диаграммы выходной интенсивности волоконного эрбиевого лазера при мощностях накачки 15 мВт (а) (режим свободной генерации, импульсы слабо промодулированы на частоте незатухающих релаксационных колебаний) и 150 мВт (б) (режим самомодуляции добротности). Длина активного волокна 77 см.

ход, с длиной волны излучения 980 нм и максимальной выходной мощностью 200 мВт. Полная длина нелегированных внутрирезонаторных «хвостов» волокна, содержащих ВБР, составляла 30 см.

Как оказалось, лазер описанной простейшей конфигурации, когда резонатор состоит только из куска активного волокна и пары зеркал в виде ВБР, при мощности накачки ниже 40 мВт работает в режиме свободной генерации, хотя необходимо отметить, что его выходная мощность и в этом случае слабо промодулирована на частоте релаксационных колебаний (рис.2,а). При больших мощностях накачки лазер стабильно работает в режиме генерации коротких импульсов в довольно широком диапазоне мощностей (рис.2,б). Так, например, при длине активного эрбиевого волокна 77 см и коэффициенте отражения каждого ВБР-зеркала 95% данный режим устанавливается при мощности накачки 45 мВт и наблюдается вплоть до максимально возможной в данном эксперименте мощности (200 мВт).

При переходе от режима свободной генерации в режим коротких импульсов при СМД форма спектра лазера существенно не менялась (рис.3), и его полуширина составляла менее 0.1 нм (разрешающая способность

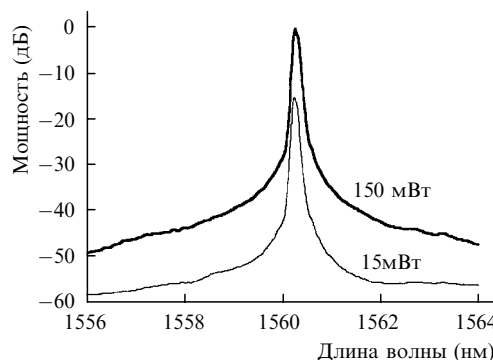


Рис.3. Спектры волоконного эрбиевого лазера при мощностях накачки 15 мВт (режим свободной генерации со слабыми самопульсациями) и 150 мВт (режим самомодуляции добротности). Длина активного волокна 77 см.

спектроанализатора). Отметим только, что максимум спектра генерации лазера соответствовал максимуму спектральной зависимости коэффициента отражения ВБР-зеркал (1560.5 нм для обеих решеток) и лишь слегка сдвигался в стоксовом направлении с ростом мощности накачки (менее 0.15 нм в диапазоне накачек 15–200 мВт).

Абсолютный КПД лазера, измеренный исходя из величины выходной мощности на обоих его выходах, не превышал 6%. При этом эффективность лазера падала при увеличении длины активного эрбиевого волокна в резонаторе (рис.4,а). Последнее обстоятельство может свидетельствовать о влиянии неких нелинейных процессов, происходящих в резонаторе лазера, которые могли бы отвечать и за возникновение самого режима СМД (см. разд.3). Отметим наконец, что долговременная нестабильность амплитуды коротких импульсов в цуге не превышала 2%–3%, при этом не отмечалось и сколь угодно заметного джиттера между импульсами в цуге (см. рис.2,а).

Интересным фактом является то, что режим СМД в лазере возникал только тогда, когда длина куска активного эрбиевого волокна превышала 40 см, для более коротких волокон режим свободной генерации не сменялся режимом МД во всем доступном диапазоне мощностей накачки. На рис.4,б показана зависимость частоты релаксационных колебаний (в режиме свободной генерации) и

частоты повторения коротких импульсов в непрерывном цуге (в режиме СМД) от мощности накачки. Ясно виден довольно резкий переход из непрерывного режима (при слабой модуляции на релаксационной частоте) в режим с МД – он наблюдается вблизи мощности диодной накачки 40–50 мВт для кусков эрбиевого волокна длиной более 40 см. Заметим, что при увеличении и уменьшении мощности накачки никаких гистерезисных явлений в выходных параметрах лазера зафиксировано не было. Кроме того, высокая частота релаксационных осцилляций в лазере (еще до появления режима СМД) сама по себе является следствием довольно высоких внутрирезонаторных потерь (которые, скорее всего, обусловлены ПВС в эрбии, см. разд.3). Наконец, из рис.4,в видно, что сразу после установления в лазере режима СМД длительность генерируемых импульсов быстро уменьшается с ростом накачки, а затем, начиная с мощностей порядка 100 мВт, остается практически неизменной (700–800 нс) при ее дальнейшем росте.

Несмотря на то что данный лазер имеет сравнительно небольшую эффективность (это связано с наведением в резонаторе в ходе развития генерации дополнительных нелинейных потерь, см. разд.3), простота его конструкции и высокая стабильность коротких импульсов генерации (по сравнению с другими волоконными лазерами с пассивной МД [7–13]) позволяют надеяться на его применение в качестве задающего генератора для ряда практических приложений.

Отметим, что данный лазер является первым высокостабильным цельноволоконным источником коротких импульсов, режим работы которого существенно отличается от режима работы известных до сего времени волоконных эрбиевых лазеров с самомодуляцией выходного излучения [14–16].

### 3. Обсуждение результатов

Анализ возможных нелинейных эффектов, способных привести к описанным выше особенностям динамики рассматриваемого лазера, позволяет заключить, что доминирующим и наиболее реальным физическим механизмом возникновения СМД в лазере является поглощение из возбужденного состояния в эрбии [17]. Это дополнительное и зависящее от момента в развитии лазерной генерации поглощение приводит, в свою очередь, к существенному и неоднородному по сечению волокна тепловыделению, т.е. к возникновению внутри активного эрбиевого волокна термоиндуцированной нелинейной линзы.

Действительно (см. рис.4,а), рост выходной мощности лазера заметно насыщается с ростом накачки, что может свидетельствовать об уменьшении эффективного рабочего объема активной среды. На наш взгляд, это связано с двумя основными факторами.

Первый фактор – это истощение излучения накачки при его распространении вдоль активного, сильно легированного эрбием волокна, что должно вести к перепоглощению излучения генерации в невозбужденной части световода (часть, примыкающая к зеркалу 4 (Выход 1) на рис.1). Заметим попутно, что эрбиевое волокно является по сути трехуровневой лазерной средой, для которой перепоглощение излучения генерации может быть весьма существенным. Несомненно, данный фактор может отражаться на лазерной динамике, однако, как показало

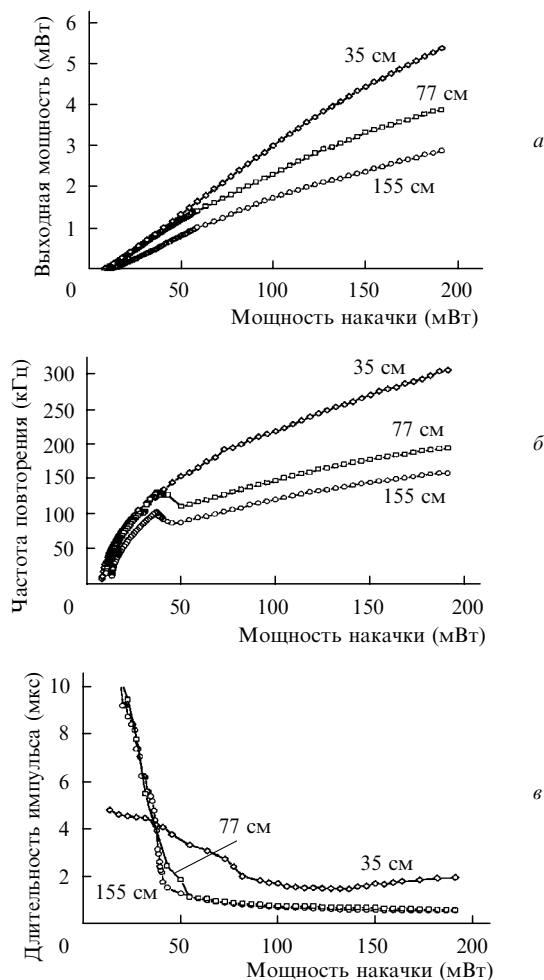


Рис.4. Зависимости выходной мощности (а), частоты повторения (б) и длительности импульсов (в) от мощности накачки для различных длин активного эрбиевого волокна.

моделирование эффекта, это не приводит к установлению в трехуровневом лазере с непрерывной накачкой режима СМД.

Другим фактором, ответственным за уменьшение объема поля в рассматриваемом лазере, может стать образование внутри активного волокна нелинейной линзы – в основном из-за его нагрева (причем неоднородного по сечению). Сам же нагрев волокна является следствием двух специфических процессов увеличения потерь: стоксовых, которые определяются отношением длин волн накачки и генерации, и потерь, связанных с ПВС в эрбии как на длине волны накачки, так и на длине волны генерации [17, 18]. Короткоживущие (по сравнению с временем жизни рабочего лазерного уровня ионов эрбия) верхние состояния сами по себе могут быть причиной самомодуляции в лазере [19], но, и это более важно, ПВС также является весьма мощным источником дополнительного тепловыделения и потерь в активной среде [20].

Исследование последнего из упомянутых механизмов четко показывает, что именно он играет доминирующую роль в установлении режима СМД в данном лазере. Проведенное моделирование соответствующих балансных уравнений для волоконного эрбиевого лазера хорошо объясняет все основные его особенности: переход из режима свободной генерации в режим МД, зависимости частоты повторения коротких импульсов и их длительности от мощности накачки и т. д. (изложение результатов моделирования лазера и подробное их сравнение с данными эксперимента выходят, ввиду большого объема, за рамки настоящей работы и будут опубликованы отдельно [21]).

Мы же приведем лишь дополнительные экспериментальные данные, которые, как нам кажется, могут служить дополнительным подтверждением предложенной выше идеи о роли ПВС в эрбиевом волокне и обусловленной этим поглощением нелинейной тепловой линзы в волоконном резонаторе в качестве одного из механизмов установления режима СМД.

На рис.5 показаны зависимости расходимости лазерного пучка (непосредственно на выходе ВБР-зеркала 4 длиной 0.8 см, см. рис.1) от длины эрбиевого волокна и от уровня накачки. Из представленных поперечных распределений интенсивности, измеренных на малом (2 см) расстоянии от соответствующего ВБР-зеркала, виден заметный рост расходимости выходного пучка при уве-

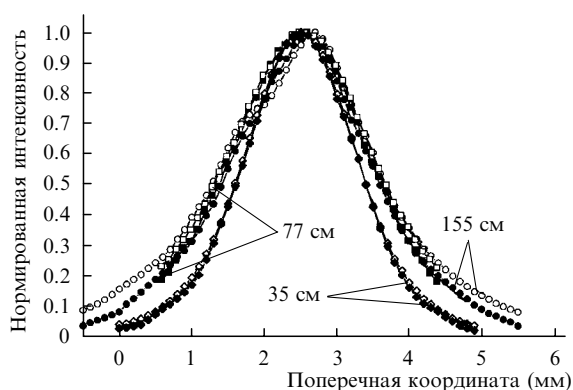


Рис.5. Распределения интенсивности выходного лазерного пучка ( $\lambda = 1560$  нм), измеренные на расстоянии 2 см от выходного ВБР-зеркала 4 (Выход 1), для различных длин активного эрбиевого волокна при мощности накачки 30 мВт (темные точки) и 180 мВт (светлые точки).

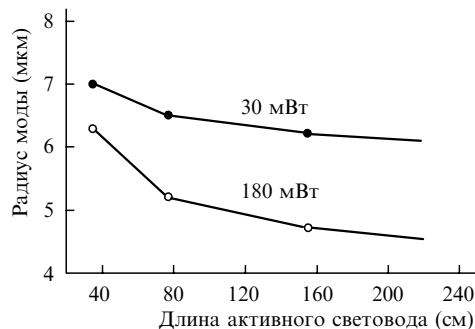


Рис.6. Зависимость радиуса лазерного пучка внутри волоконного резонатора от длины активного эрбиевого волокна (для мощности накачки 30 и 180 мВт).

личении как длины активного эрбиевого волокна, так и мощности накачки. Мы полагаем, что указанный эффект связан с самофокусировкой пучка, приводящей к увеличению числовой апертуры световода, или к эффективному уменьшению диаметра моды волокна.

Соответствующие данные приведены на рис.6, где изображены зависимости радиуса лазерного пучка внутри волоконного резонатора от длины активного отрезка световода для мощности накачки 30 и 180 мВт. Можно предположить, что указанное поведение расходимости лазерного пучка связано с влиянием нелинейной, индуцированной ПВС линзы внутри активного эрбиевого волокна. В то же время, поскольку расходимость излучения лазера при его распространении по отражающей брэгговской решетке длиной 0.8 см, записанной в отрезке неактивного волокна, существенно меняется, рассмотренные выше экспериментальные закономерности лишь косвенно свидетельствуют в пользу данной гипотезы.

Роль ПВС как возможного источника нелинейных потерь в эрбиевом волоконном лазере мы проверили также в серии внрезонаторных экспериментов (рис.7). Для этого отрезки эрбиевого волокна различной длины накачивались излучением двух непрерывных лазеров с соответствующими длинам волн накачки и генерации в описанном лазерном эксперименте (см. рис.1–5). Из рис.7 можно сделать вывод, что существует сильная нелинейная зависимость коэффициента пропускания эрбиевого волокна (для обеих длин волн) от входной мощности и длины световода. Прогибы в кривых пропускания для этих длин волн («динамическое затемнение» волокна) могут возникнуть в результате потерь, вызванных ПВС (хотя и в этом случае не исключен вклад в эффективное изменение пропускания волокна более сложного процесса – нелинейного изменения числовой апертуры волокна под действием тепловой линзы).

#### 4. Заключение

Мы показали, что в простейшей конфигурации волоконного эрбиевого лазера с волоконными брэгговскими решетками в качестве зеркал наблюдается высокостабильный в широком диапазоне мощностей накачки режим самомодуляции добротности резонатора. При этом лазер излучает непрерывную последовательность коротких импульсов субмикросекундной (около 750 нс) длительности с частотами повторения от 100 до 300 кГц. Экспериментально исследованы особенности динамики лазера, в частности его переход из режима свободной генера-

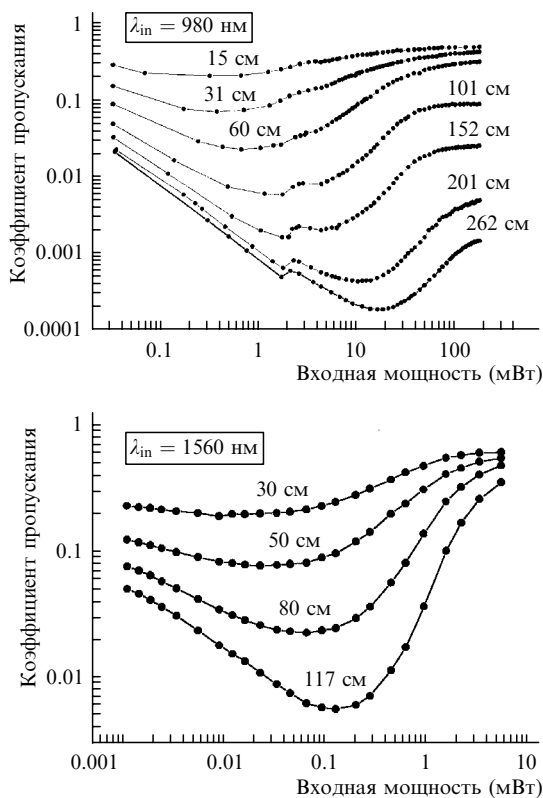


Рис. 7. Зависимости коэффициента пропускания эрбиевого волокна различной длины от мощности входного непрерывного излучения с длиной волны 980 (а) и 1560 нм (б).

ции (с небольшой модуляцией излучения на частоте релаксационных колебаний) в режим пассивной (полной) модуляции добротности, а также зависимости частоты повторения и длительности коротких импульсов от мощности накачки и длины активного волокна. Рассмотрены возможные физические механизмы, ответственные за установление в лазере режима самомодуляции добротности. Анализ показал, что наиболее важным из механизмов является самонаведение внутри эрбиевого волокна нелинейной термоиндуцированной линзы, возникновение которой обусловлено поглощением из возбужденного состояния ионов эрбия (их концентрация в нашем волокне значительна). Это поглощение и приводит к мощному тепловыделению внутри активного волокна.

Исследование проведено при финансовой поддержке CONACYT (Мексика) (гранты № 32195-Е и 34626-Е), CONCYTEG (Гуанахуато, Мексика) (грант № 0304-K117-040) и Министерства образования, культуры и спорта (Испания) (грант № SAB2001-0077). Авторы также благодарят С.Унгер (Институт высоких физических технологий, Йена, Германия) за предоставленные образцы эрбиевого волокна, Н.Н.Ильичева (Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Москва, Россия) и А.Мартинеса-Риоса (Центр оптических исследований, Леон, Мексика) за плодотворные обсуждения.

1. Chandonet A., Larose G. *Opt. Engng.*, **32**, 2031 (1993).
2. Okhotnikov O.G., Salsedo J.R. *Electron. Lett.*, **30**, 702 (1994).
3. Sousa J.M., Okhotnikov O.G. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **11**, 1117 (1999).
4. Lees G.P., Taverner D., Richardson D.J., Dong L., Newson T.P. *Electron. Lett.*, **33**, 393 (1997).
5. Roy P., Pagnoux D., Mouneu L., Midavaine T. *Electron. Lett.*, **33**, 1317 (1997).
6. Chen Z.J., Grudinin A.B., Porta J., Minelly J.D. *Opt. Lett.*, **23**, 454 (1998).
7. Offerhaus H.L., Broderick N.G., Richardson D.J., Sammut R., Caplen J., Dong L. *Opt. Lett.*, **23**, 1683 (1998).
8. Chernikov S.V., Zhu Y., Taylor J.R., Gapontsev V.P. *Opt. Lett.*, **22**, 298 (1997).
9. Petropoulos P., Offerhaus H.L., Richardson D.J., Dhanjal S., Zheludev N.I. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3619 (1999).
10. Libatique N.J.C., Tafoya J.D., Feng S.H., Mirell D.J., Jain R.K. *Trends Opt. Photon. Ser.*, **34**, 417 (2000).
11. Paschotta R., Haring R., Gini E., Melchior H., Keller U., Offerhaus H.L., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **24**, 388 (1999).
12. Filippov V.N., Starodumov A.N., Kir'yanov A.V. *Opt. Lett.*, **26**, 343 (2001).
13. Kir'yanov A.V., Filippov V.N., Starodumov A.N. *J. Opt. Soc. Am. B*, **19**, 353 (2002).
14. Sanchez F., Le Boudec P., Francois P.-L., Stephan G. *Phys. Rev. A*, **48**, 2220 (1993).
15. Colin S., Contesse E., Le Boudec P., Stephan G., Sanchez F. *Opt. Lett.*, **21**, 1987 (1996).
16. Rangel-Rojo R., Mohebi M. *Opt. Commun.*, **137**, 98 (1997).
17. Desurvire E. *Erbium-doped fiber amplifier - Principles and applications* (New-York – Chichester – Brisbane – Toronto – Singapore: Wiley & Sons, 1994).
18. Yamada T., Tokoro K., Maeda Y. *Mater. Sci. Engng B*, **81**, 171 (2001).
19. Chen Y.-F., Lee J.-L., Hsieh H.-D., Tsai S.-W. *IEEE J. Quantum Electron.*, **38**, 312 (2002).
20. Kliewer M., Powell R.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 1850 (1989).
21. Kir'yanov A.V., Il'ichev N.N., Barmenkov Yu.O. *Laser Phys. Lett.*, **1** (2004) (in press).