

УДК 53.05

К.К. Бобков, М.М. Бубнов, С.С. Алешкина, М.Е. Лихачев

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

**ПОСТЕПЕННАЯ ДЕГРАДАЦИЯ ОСНОВНОЙ МОДЫ
В ИТТЕРБИЕВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРАХ**

Впервые описывается эффект постепенной деградации качества выходного излучения импульсных иттербиевых лазеров малой средней мощности на основе световодов с большим диаметром поля основной моды и ступенчатым профилем показателя преломления, связанный с наведением длиннопериодной решетки показателя преломления в результате процесса фотопотемнения.

Ключевые слова: постепенная деградация основной моды, импульсный волоконный лазер, длиннопериодная решетка, фотопотемнение.

K.K. Bobkov, M.M. Bubnov, S.S. Aleshkina, M.E. LikhachevFiber Optics Research Center, the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation**GRADUAL FUNDAMENTAL MODE DEGRADATION
PROCESS IN YTTERBIUM DOPED PULSED FIBER LASERS**

We report on the experimental observation and investigation of gradual mode degradation process in low average power ytterbium-doped pulsed fiber lasers based on large mode area step-index fibers. The linkage of this process with long period refractive index grating caused by photodarkening process is revealed.

Keywords: gradual fundamental mode degradation, long-period grating, photodarkening, pulsed fiber lasers.

Введение

До недавнего времени в качестве основных факторов, ограничивающих предельную мощность волоконных лазеров и усилителей, рассматривались нелинейные процессы, такие как вынужденное рассеяние Манделштама-Бриллюэна, вынужденное комбинационное рассеяние и фазовая самомодуляция. Поэтому для повышения порога этих нежелательных процессов волоконные световоды для мощных усилителей изготавливались с большим размером поля основной моды (БПМ) [1]. Дополнительным преимуществом таких световодов оказалось более интенсивное поглощение накачки из оболочки, в результате чего стало

возможно уменьшить длину активного световода, что также способствовало возрастанию порога нелинейных эффектов.

Одновременно были разработаны световоды с большим размером поля моды более сложной структуры: фотонно-кристаллические световоды, световоды со спиральной сердцевиной, световоды с каналом утечки. Все вышеупомянутые световоды работали в квазиодномодовом режиме, обеспечивая вытекание (повышенное затухание) высших мод за счет особенностей своей конструкции. В результате удалось повысить выходную мощность волоконных лазеров до нескольких киловатт в непрерывном режиме [2] и до нескольких гигаватт – в импульсном режиме [3].

Недавно при исследовании характеристик мощных волоконных усилителей на базе световодов с двойной оболочкой был обнаружен эффект модовой нестабильности [4]. Сущность этого явления заключается в том, что при превышении некоторого порогового значения выходной мощности происходит деградация основной моды. Величина порога в зависимости от конструкции активного световода и условий работы находится в области 100–1500 Вт [5]. Вблизи порога временные флуктуации в профиле выходящего луча имеют квазипериодический характер с частотой 1–5 кГц и становятся более хаотичными при увеличении средней мощности [6].

Явление модовой нестабильности наблюдалось как в непрерывных, так и в импульсных лазерах и носило обратимый характер, т.е. при уменьшении мощности ниже пороговой восстанавливался одномодовый режим.

Природа модовой нестабильности объясняется возникновением в световоде длиннопериодной решетки показателя преломления, наводимой интерференцией основной моды и мод более высокого порядка [5]. Интерференция мод приводит к периодическому изменению показателя преломления вдоль оси световода вследствие локального изменения инверсии либо температуры. На сегодняшний день модовая нестабильность является основным лимитирующим фактором для мощных волоконных лазеров.

В настоящей работе рассматривается обнаруженный нами эффект медленной деградации выходного излучения, проявляющийся во время длительной эксплуатации импульсных иттербиевых усилителей сравнительно невысокой мощности. Данный эффект заключается в плавной перекачке энергии из фундаментальной моды в первую

высшую моду в течение относительно больших временных интервалов (50–1500 ч) и связывается нами с наведением длиннопериодной решетки показателя преломления в сердцевине световода в результате процесса фотопотемнения.

1. Эксперимент

Экспериментальная установка состояла из задающего генератора, двух полностью волоконных предусилительных каскадов с расположенным между ними акусто-оптическим модулятором, финального каскада усиления на базе исследуемого активного световода с большим полем моды и оборудования для наблюдения за изменением характеристик выходного излучения (рис. 1). В качестве задающего генератора использовался волоконный лазер фирмы Finium, излучающий поляризованные импульсы с максимумом на длине волны 1030 нм, длительностью 13 пс и частотой следования 20 МГц при средней мощности 2,5 мВт. Далее эти импульсы усиливались, прореживались до частоты 2 МГц и затем снова усиливались для получения достаточного затравочного сигнала для финального усилительного каскада. Спектральная ширина импульсов на входе в БПМ световод составляла 2 нм.

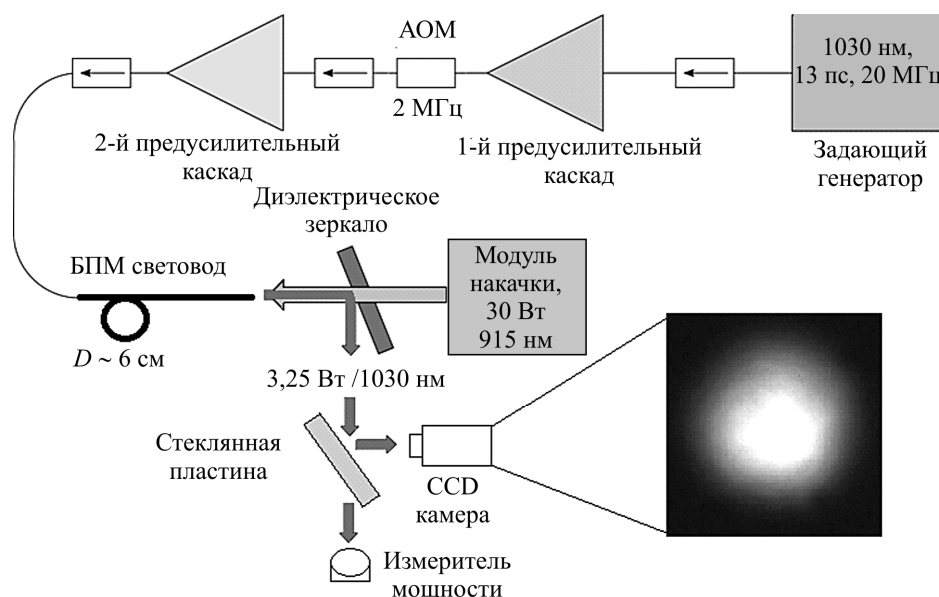


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и распределение интенсивности излучения на выходе БПМ световода в начале эксперимента

Финальный каскад усиления был реализован на поддерживающих поляризацию иттербиевых БПМ световодах с двойной обложкой. В первой серии экспериментов исследовался коммерчески доступный световод Yb1200-25/250DC-PM фирмы nLight (образец 1, таблица), во второй серии экспериментов использовался специально изготовленный для этой работы фосфороалюмосиликатный иттербиевый световод (образец 2, таблица). Особенностью данного световода была повышенная стойкость к эффекту фотопотемнения – монотонному наведению избыточных оптических потерь в процессе работы иттербиевого лазера или усилителя [7]. В области рабочих длин волн иттербиевого усилителя эти световоды были маломодовыми (длина волны отсечки первой высшей моды обоих световодов значительно превышала 1000 нм). Поэтому с целью реализации одномодового режима работы исследуемые образцы во время эксперимента были намотаны на алюминиевую катушку с диаметром ~60 мм. Световоды наматывались на катушку в один слой без перехлестов с тем, чтобы избежать искажения моды на микроизгибах, перегибе световода и т.п. Катушка также выполняла функцию теплоотвода и дополнительно охлаждалась до комнатной температуры при помощи радиатора. Выходной конец световода приклеивался к алюминиевой пластине, которая также играла роль радиатора охлаждения.

Характеристики иттербиевых БПМ световодов и условия их эксплуатации

Образец	Øс/Øоб, мкм	Состав стекла сердцевины	Концентрация			NA _{сердц}	λ _{отсечки} , нм	Время работы, ч	Выходная пиковая мощность, кВт
			Al ₂ O ₃ , мол. %	P ₂ O ₅ , мол. %	Yb ₂ O ₃ , вес. %				
1	25/250	Al ₂ O ₃ /Yb ₂ O ₃ /SiO ₂	0,9	–	1,5	0,07	2000	70	115
2	15/125	Al ₂ O ₃ /P ₂ O ₅ /Yb ₂ O ₃ /SiO ₂	2,6	4,3	1,5	0,08	1400	1500	212

Излучение накачки из лазерного диода (Милон-лазер, PUMA-915-35) с длиной волны 915 нм и мощностью ~30 Вт вводилось навстречу усиленному сигналу через выходной торец БПМ световода с помощью объемных элементов (линз и диэлектрических зеркал).

Во время эксперимента происходил непрерывный контроль средней мощности (с помощью термоэлектрического измерителя мощно-

сти) и распределения интенсивности (с помощью CCD-камеры) на выходе из БПМ световода.

2. Результаты

В ходе эксперимента, проводившегося непрерывно в течение 70 ч, контролировались выходная мощность лазера и форма моды на выходе. Результаты, представленные на рис. 2, помимо характерного уменьшения средней выходной мощности, вызванного явлением фотопотемнения (заключающемся в росте потерь в сердцевине иттербиевого световода под действием излучения накачки), показывают изменение распределения интенсивности выходного излучения. В начале эксперимента распределение интенсивности выходного излучения было близко к гауссовому распределению фундаментальной моды LP_{01} благодаря реализованному квазиодномодовому режиму работы усилителя. Однако с течением времени наблюдалось плавное изменение распределения интенсивности, в конечном итоге приведшее к значительному качественному изменению модового состава выходного излучения. Эксперимент был остановлен, когда на выходе усилителя было зарегистрировано распределение интенсивности, характерное для первой высшей моды LP_{11} . Особо стоит подчеркнуть, что при повторе эксперимента с новым (ранее не использовавшимся) образцом 1 наблюдаемое изменение формы моды на выходе воспроизводилось.

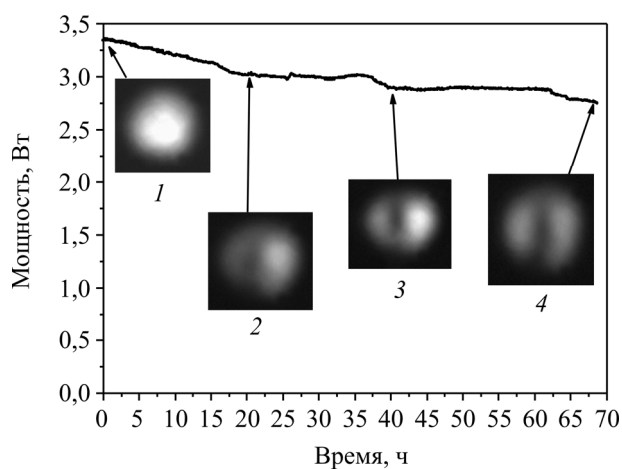


Рис. 2. Типичная временная зависимость средней выходной мощности и распределения интенсивности для образца 1

Во время проведения исследований на выходном конце световода 1 наблюдалась характерная зеленая кооперативная люминесценция ионов Yb^{3+} . В начале эксперимента интенсивность люминесценции была одинакова на всей длине регистрируемого участка, однако приблизительно через 15 ч появилась модуляция интенсивности люминесценции по длине с периодом приблизительно 1,5 мм (рис. 3, *а* – фотография световода, *б* – зависимость интенсивности люминесценции по длине световода). При дальнейшем проведении эксперимента приблизительно через 60 ч модуляция интенсивности кооперативной люминесценции исчезла. Наблюдаемый эффект можно объяснить интерференцией основной и первой высшей моды. В начале эксперимента в наблюдаемой части световода распространяется только основная мода (рис. 2, вставка 1). Приблизительно через 15 ч в световоде наблюдается суперпозиция основной и первой высшей моды (рис. 2, вставка 2), интерференция которых вызывает модуляцию интенсивности кооперативной люминесценции, однако через 60 ч в световоде наблюдается только высшая мода (рис. 2, вставка 4) и поэтому интерференционная картина исчезает.

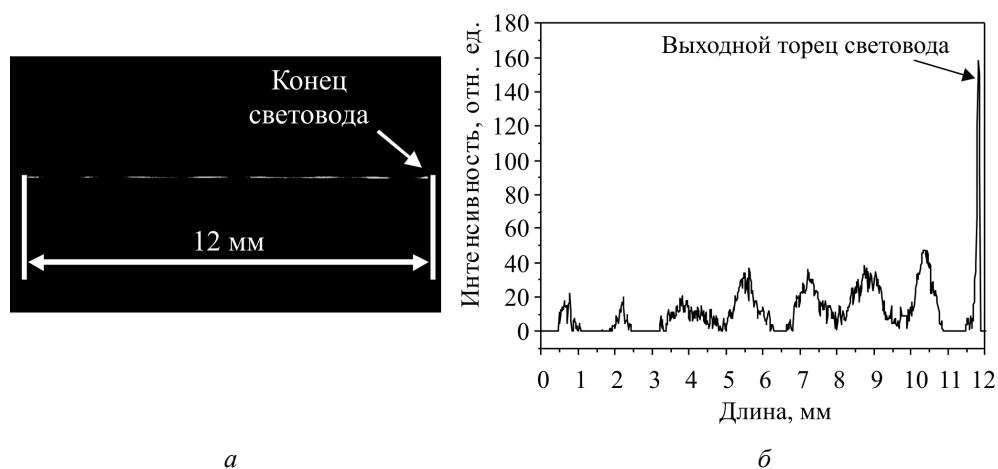


Рис. 3. Модуляция кооперативной люминесценции:
а – фотография выходного конца световода; *б* – распределение интенсивности кооперативной люминесценции по длине световода

При проведении аналогичного эксперимента с образцом 2 также наблюдался эффект ухудшения качества моды, однако скорость ухудшения качества выходного излучения была на два порядка меньше и полная конверсия основной моды в моду LP_{11} произошла через 1500 ч.

В ходе последующих исследований было обнаружено, что искажение моды на выходе световода наблюдается и после выключения лазера накачки. В частности, при возбуждении деградировавшего световода 2 основной модой LP_{01} на длине волны 1030 нм на выходе регистрируется первая высшая мода LP_{11} (рис. 4, *а*), а при возбуждении световода модой LP_{11} регистрируется мода LP_{01} (рис. 4, *б*).

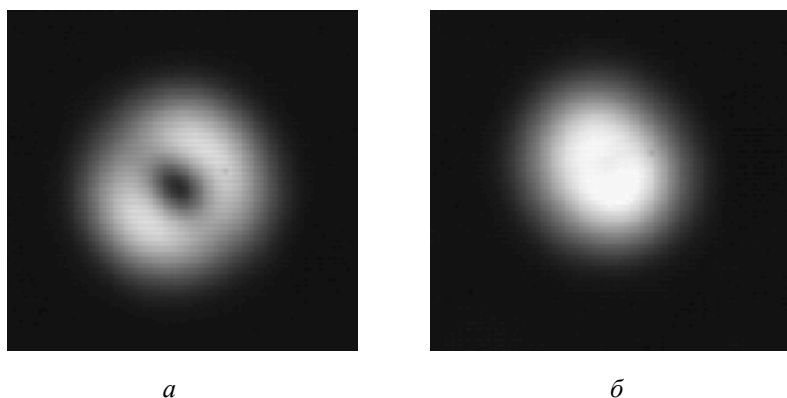


Рис. 4. Распределение интенсивности выходного излучения при селективном возбуждении в деградировавшем световоде: *а* – моды LP_{01} ; *б* – моды LP_{11}

С целью анализа данного световода был измерен спектр пропускания фундаментальной моды, для чего ввод и вывод сигнала в световод 2 осуществлялся через одномодовый световод. Для измерения был выбран конечный участок (со стороны, где вводилась накачка и выводился сигнал) деградировавшего световода 2 длиной 5 см. Необходимость выбора малой длины световода была обусловлена высокой интенсивностью полосы поглощения ионов иттербия, край которой не позволял регистрировать изменения спектра в области 1030 нм при больших длинах световода. Проведенные измерения выявили наличие характерных пиков повышенных потерь (рис. 5). При возбуждении исследуемого отрезка световода основной модой LP_{01} на длинах волн, совпадающих с максимумами полос (1030 нм, 1100 нм), на выходе наблюдалась мода LP_{11} , а при возбуждении на длинах волн, совпадающих с минимумами спектра поглощения (1050 нм, 1150 нм), на выходе наблюдалась частично искаженная основная мода. Достаточно очевидно, что наблюдаемые пики связаны с наведением длиннопериодной решетки, обеспечивающей перекачку энергии из фундаментальной моды LP_{01} в моду LP_{11} .

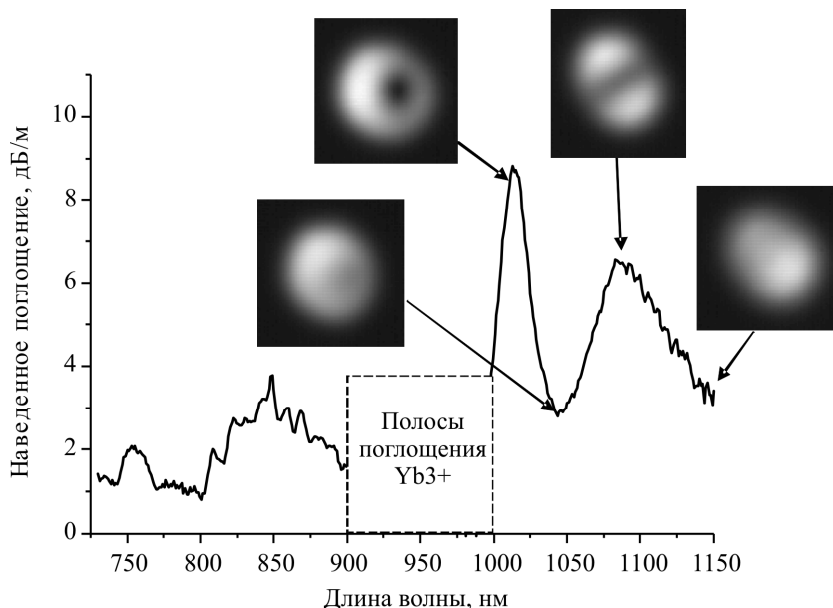


Рис. 5. Спектр наведенного поглощения в последних 5 см исследуемого световода 2 (пунктирным квадратом закрыта область поглощения ионов Yb^{3+}) и распределение интенсивности выходного излучения на некоторых длинах волн при возбуждении на входе в световод фундаментальной моды LP_{01}

Известно, что величина наведенных в результате процесса фотопотемнения потерь может быть значительно уменьшена при облучении деградировавшего световода излучением с длиной волны около 500 нм [7]. В наших экспериментах в отрезок деградировавшего световода 2 длиной 5 см с помощью микрообъектива в течение 60 мин вводилось излучение полупроводникового лазера с длиной волны 533 нм и мощностью 6 мВт. В результате этого облучения пик наведенного поглощения на длине волны 1100 нм практически исчез (рис. 6). До облучения на выходе этого световода при возбуждении его основной модой на длине волны 1100 нм наблюдалась высшая мода LP_{11} , а после облучения основная мода сохранялась.

3. Обсуждение

По всей видимости, постепенная деградация формы моды в БПМ световодах при длительной работе в качестве финального каскада усиления объясняется частичной/полной перекачкой мощности излучения из основной моды LP_{01} в первую высшую моду LP_{11} на длиннопериод-

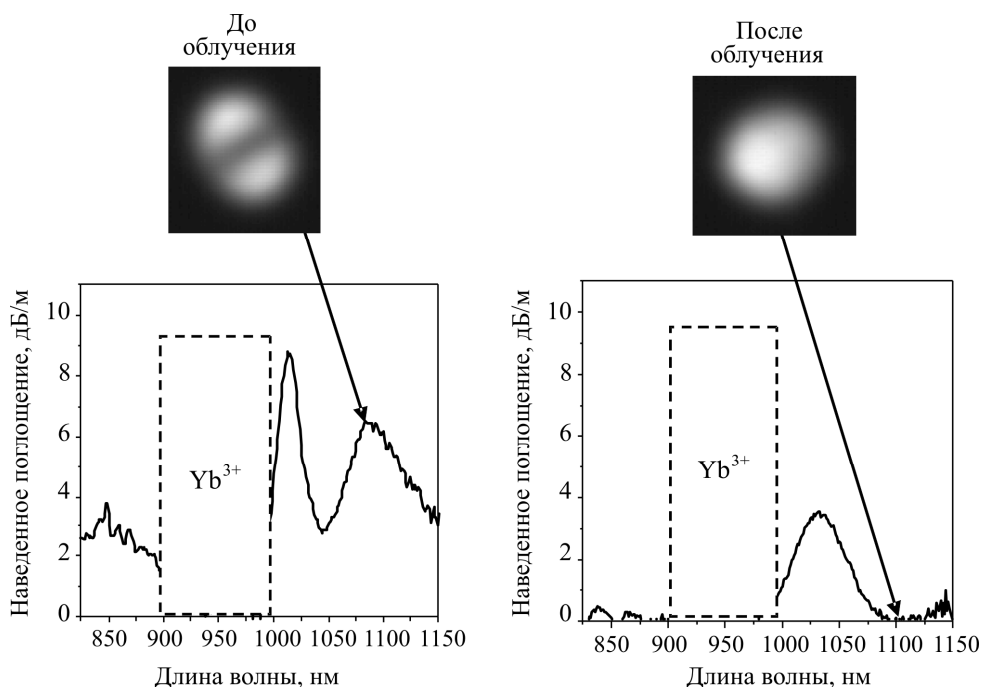


Рис. 6. Спектр наведенного поглощения 5 см отрезка деградировавшего образца 2 до и после облучения излучением с длиной волны 533 нм. Распределение интенсивности до и после облучения при возбуждении основной моды на длине волны 1100 нм

ной решетке показателя преломления (ДРПП), наведенной в сердцевине световода в ходе локального процесса фотопотемнения. Подчеркнем, что ранее было показано [8], что в ходе процесса фотопотемнения возможно увеличение показателя преломления в области 1080 нм на 10^{-5} , и при наличии периодического изменения потерь вследствие фотопотемнения также периодически будет меняться наведенный показатель преломления по длине световода. Необратимость эффекта деградации выходного излучения вызвана относительной стабильностью дефектов, наведенных в ходе процесса фотопотемнения. Данный эффект, по сути, аналогичен эффекту модовой нестабильности [5], с той принципиальной разницей, что в случае модовой нестабильности ДРПП возникает вследствие температурных вариаций по длине световода, а в наблюдаемом нами эффекте – вследствие периодической вариации оптических потерь, наведенных фотопотемнением. Как следствие, характерные времена появления ДРПП различаются в этих про-

цессах на порядки (микросекунды – в случае модовой нестабильности и десятки часов – в случае наблюдаемого нами эффекта).

В пользу предположения о ключевой роли фотопотемнения в наблюдаемом эффекте говорят два факта. Во-первых в фосфооралюмосиликатном световоде 2 скорость и интенсивность фотопотемнения почти на два порядка меньше, чем в случае алюмосиликатного световода фирмы nLight [7]. При этом, как видно из эксперимента, скорость наведения ДРПП в этом световоде также оказывается на два порядка меньше, чем в световоде 1.

Вторым аргументом в пользу того, что именно фотопотемнение приводит к появлению ДРПП, являются проведенные исследования спектров наведенного поглощения в деградировавших световодах. В спектре наведенных потерь для фундаментальной моды (см. рис. 5) на всем зарегистрированном диапазоне длин волн просматривается структура, характерная для длиннопериодной решетки показателя преломления. Чтобы убедиться в связи наведенного поглощения и, следовательно, процесса деградации основной моды с процессом фотопотемнения, деградировавшие образцы были облучены нами излучением лазера с длиной волны 533 нм. Известно, что дефекты, наведенные в результате фотопотемнения, могут быть разрушены воздействием излучения с длиной волны в области 500 нм [9]. В результате облучения деградировавшего образца 2 удалось практически полностью избавиться от наведенного поглощения, существенно снизить интенсивность ДРПП и практически подавить перекачку излучения из основной моды в первую высшую моду (см. рис. 6). Таким образом, доказана связь процесса постепенной деградации основной моды с процессом фотопотемнения.

Заключение

В данной статье впервые описывается эффект постепенной и необратимой деградации выходного излучения импульсных иттербиевых лазеров малой средней мощности на основе БПМ световодов. Обнаружено, что данный эффект связан с наведением в сердцевине активного иттербиевого световода длиннопериодной решетки показателя преломления, на которой фундаментальная мода LP_{01} перекачивается в первую высшую моду LP_{11} . Показано, что ДРПП возникает в результате изменения показателя преломления, вызванного вариацией величины оптических потерь вследствие фотопотемнения по длине исследуемого световода.

дуемых световодов. Данные вариации, в свою очередь, связаны с интерференцией мод LP_{01} и LP_{11} : в пучностях интерференционной картины происходит обеднение инверсной населенности, в узлах же высокая инверсная населенность остается постоянной, что приводит к наведению дефектов, вызывающих фотопотемнение.

Авторы выражают благодарность Дианову Евгению Михайловичу, научному руководителю НЦВО, и Семенову Сергею Львовичу, директору НЦВО, за проявленный интерес к работе и всестороннюю поддержку. Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 14-19-01572.

Список литературы

1. Large-mode-area double-clad fibers for pulsed and CW lasers and amplifiers / D. Machewirth [et. al.] // Proc. SPIE. – 2004. – Vol. 5335. – P. 140–150.
2. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power / Y. Jeong [et. al.] // Opt. Express. – 2004. – Vol. 12 (25). – P. 6088–6092.
3. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power / T. [Eidam et. al.] // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19. – P. 255–260.
4. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power / T. Eidam [et. al.] // Opt.Lett. – 2010. – Vol. 35 (2). – P. 94–96.
5. Smith V., Smith J. Review of models of mode instability in fiber amplifiers // Optical Society of America. – 2013. – Vol. 19 (11) – P. 10180–10192.
6. Kuznetsov M. [et. al.] Low-threshold mode instability in Yb^{3+} -doped few-mode fiber amplifiers // Optical Society of America. – 2014. – Vol. 22 (24). – P. 29714–29725.
7. Large-Mode-Area Highly Yb-doped Photodarkening-Free Al_2O_3 - P_2O_5 - SiO_2 -Based Fiber / M. Likhachev [et. al.] // CLEO/Europe-EQEC. – 2011. – Paper CJ. – P. 24.
8. Refractive index change in ytterbium-doped fibers induced by photodarkening and thermal bleaching / C. Ye [et. al.] // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49 (30). – P. 5799–5805.
9. Guzman Chave D. [et. al.] Reversible photo-darkening and resonant photo-bleaching of Ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation // Laser Physics Letters. – 2007. – Vol. 4 (10). – P. 734–739.

References

1. Machewirth D. [et. al.] Large-mode-area double-clad fibers for pulsed and CW lasers and amplifiers. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5335, pp. 140-150.
2. Jeong Y. [et. al.] Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Opt. Express*, 2004, vol. 12 (25), pp. 6088-6092.
3. Eidam T. [et.al.] Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, pp. 255-260.
4. Eidam T. [et. al.] Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power. *Opt. Lett.*, 2010, vol. 35 (2), pp. 94-96.
5. Smith V., Smith J. Review of models of mode instability in fiber amplifiers. *Optical Society of America*, 2013, vol. 19 (11), pp. 10180-10192.
6. Kuznetsov M. [et. al.] Low-threshold mode instability in Yb^{3+} -doped few-mode fiber amplifiers. *Optical Society of America*, 2014, vol. 22 (24), pp. 29714-29725.
7. Likhachev M. [et. al.] Large-Mode-Area Highly Yb-doped Photo-darkening-Free $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ -Based Fiber. *CLEO/Europe-EQEC*, 2011, paper CJ, p. 24.
8. Ye C. [et. al.] Refractive index change in ytterbium-doped fibers induced by photodarkening and thermal bleaching. *Applied Optics*, 2010, vol. 49 (30), pp. 5799-5805.
9. Guzman Chave D. [et. al] Reversible photo-darkening and resonant photo-bleaching of Ytterbium-doped silica fiber at in-core 977-nm and 543-nm irradiation. *Laser Physics Letters*, 2007, vol. 4 (10), pp. 734-739.

Получено 5.10.2015