

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭРБИЕВЫХ ВОЛОКОННЫХ ЛАЗЕРОВ С КОРОТКИМ РЕЗОНАТОРОМ

Смирнов А.М.^{1,2}, Базакуца А.П.¹, Бутов О.В.¹

¹ ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, г. Москва

² МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва

* E-mail: alsmir1988@mail.ru

DOI 10.24411/2308-6920-2019-16109

В работе представлены результаты экспериментального исследования особенностей генерации эрбиевых волоконных лазеров с коротким резонатором. Изучены их режимы генерации при непрерывной накачке на длине волны 976 нм. Исследована зависимость параметров и режимов генерации от длины резонатора, мощности накачки и внешней температуры.

Эрбиевые волоконные лазеры широко используются в современной волоконной оптике [1-3]. Особый интерес представляют одночастотные волоконные лазеры с узкой полосой генерации [4,5]. Оптический диапазон 1,5 мкм, характерный для эрбиевых лазеров, позволяет использовать их для оптических сенсоров [6,7], оптической телекоммуникации [8,9] и спектроскопии. Особенностью таких лазеров является высокая вероятность генерации стабильных импульсов. Параметры импульсного режима зависят как от состава и концентрации легирующих элементов в сердцевине волокна, так и от внешних параметров, таких как мощность накачки и рабочая температура.

Используемое в данной работе активное волокно было изготовлено из преформы с высокой концентрацией эрбия в сердцевине $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Er}_2\text{O}_3$ и нелегированной кварцевой оболочкой. Преформы были синтезированы плазмохимическим методом SPCVD [10]. Плазмохимический синтез позволил изготовить сильно легированное эрбием кварцевое волокно (поглощение на 1530 нм ≈ 180 дБ/м, 0,3 моль.% Er_2O_3). На основе данного световода были изготовлены три эрбиевых лазера по классической схеме Фабри-Перо с двумя брэгговскими зеркалами (FP-EDFL) с длиной резонатора 50 мм, 80 мм и 180 мм. Коэффициенты отражения выходного и глухого зеркал составили 0,55 и 0,95 соответственно. Брэгговские решетки записывались с использованием фазовой маски излучением эксимерного лазера ArF непосредственно в сердцевине активного волокна. Длина волны генерации волоконного лазера определялась периодом брэгговской решетки и составляла 1560 нм. Для стабилизации температурного режима генерации активная часть волокна с записанными решетками помещались в кювету с водой или жидким азотом.

В работе был получен как режим непрерывной генерации, так и режим импульсной генерации, соответствующей пассивной модуляции добротности. Установлена зависимость параметров и режимов генерации от длины резонатора, мощности накачки и температуры окружающей среды. При комнатной температуре формирование импульсного режима генерации характерно для лазеров, где в качестве активатора используются ионы эрбия с высокой концентрацией. Пассивная модуляция добротности в сильнолегированных эрбиевых лазерах реализуется за счет эффекта противоположного эффекту насыщения поглощения [13]. Образование ионных пар эрбия (мини-кластеров) приводит к усилению процесса ап-конверсии [14,15]. Поглощение растет при увеличении интенсивности поля, а не насыщается. Процессы ап-конверсии снижают эффективность накачки лазерной системы за счет ускоренной депопуляции верхнего рабочего уровня эрбия. Рост депопуляции приводит к падению эффективности и увеличению порога генерации лазера, а также к переходу на импульсный режим генерации [13].

Увеличение частоты следования импульсов (рис.1а) и одновременное уменьшение длительности импульсов (рис.1б) с увеличением мощности накачки было измерено для лазеров с длиной резонатора 50 мм, 80 мм и 180 мм при комнатной температуре. Зависимость пиковой выходной мощности от мощности накачки исследуемых лазеров представлена на Рис.1с. Полученные режимы зависят от трех параметров: концентрации ионных пар, времени жизни фотона и скорости накачки [14]. В нашем эксперименте мы варьировали время жизни фотона, изменяя длину резонаторов волоконных лазеров. Интенсивность поля растет с субнаносекундными временами, что следует из оценки времени жизни фотона в резонаторе для лазера FP-EDFL: $\tau_l = 2L/[c(1 - r_1 r_2)]$, где r_1 и r_2 коэффициенты отражения двух зеркал, а L -длина резонатора. Согласно теоретической модели, представленной в работе [13], с увеличением времени жизни фотона за счет увеличения длины резонатора увеличивается длительность импульса (рис.1б) и уменьшается частота следования импульсов (рис.1а).

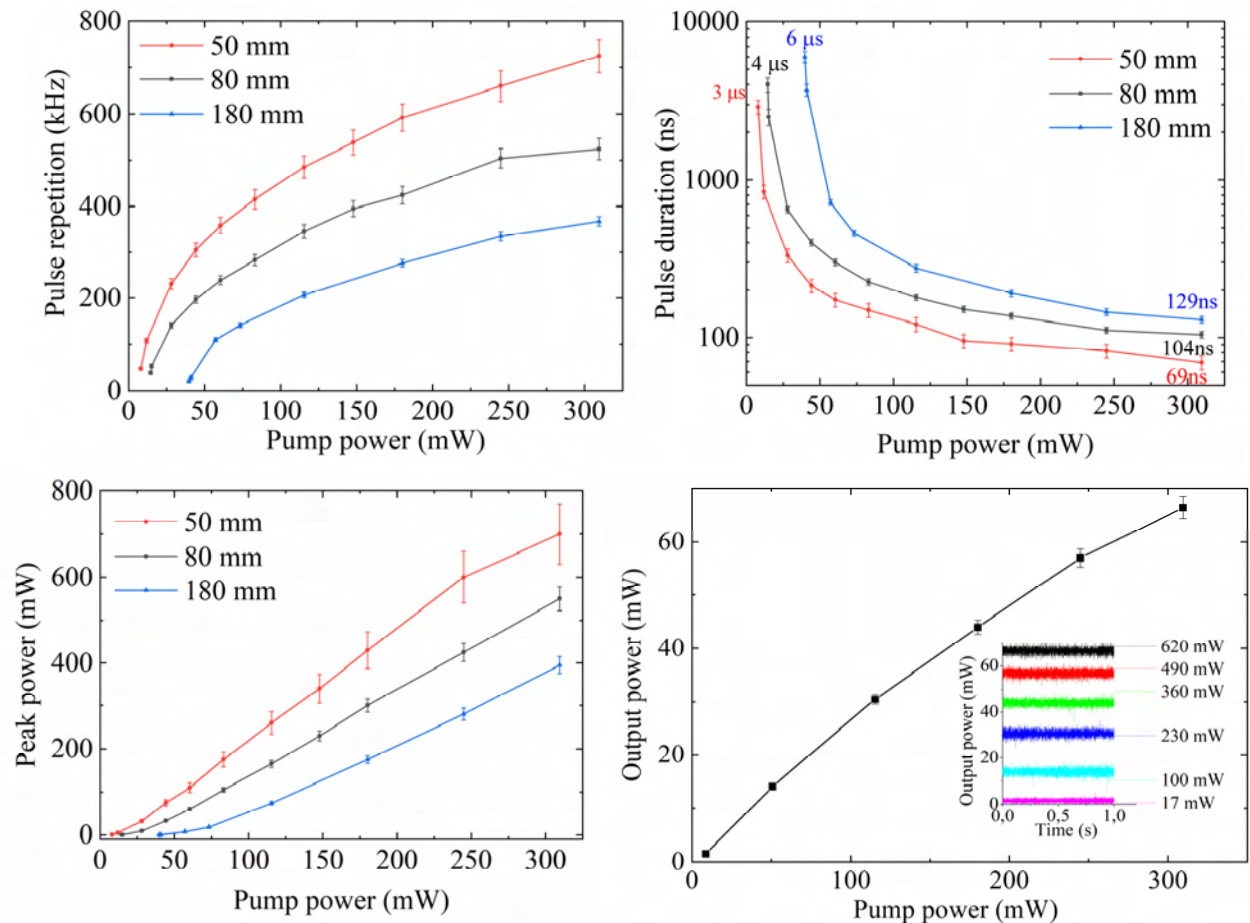


Рис. 1. Зависимость частоты (а), длительности (б) и пиковой выходной мощности (с) импульсов волоконных лазеров от мощности накачки при 300 К. d) Зависимость выходной мощности непрерывной генерации волоконного лазера с длиной резонатора 50 мм от мощности накачки при 77 К

При температуре жидкого азота 77 К был реализован стабильный режим непрерывной генерации сильно легированного эрбиевого волоконного лазера (рис. 1d). Теоретически было показано [13], что этот эффект может быть объяснен уменьшением процесса ап-конверсии в ионных кластерах эрбия и, следовательно, увеличением времени жизни верхнего рабочего состояния, влияющего на переход к импульсному режиму. Замедление процессов ап-конверсии связано с энергетическим рассогласованием в этом процессе, который возможен при взаимодействии с фононами. При низких температурах энергия фононов уменьшается, что приводит к переключению с импульсного режима на непрерывный режим генерации волоконного эрбиевого лазера.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект 17-07-01388).

Литература

1. A. Bellemare, *Progress in Quantum Electronics* 27, 211-266 (2003)
2. J.D. Bradley et al, *Laser & Photonics Reviews* 5, 368-403 (2011)
3. J. R. Weber, et al *Nature* 393, p. 769 (1998).
4. K. Iwatsuki, et al, *Electronics Letters* 26, pp. 2033-2035 (1990)
5. O.V. Butov, et al, *JOSA B* 34, A43-A48 (2017)
6. O.V. Butov, et al, *PIERS Spring, St Petersburg, Russia, 22–25 May, 1594 - 1597* (2017)
7. Y. Gong, et al, *IEEE Photonics Technology Letters* 21, 1725-1727 (2009)
8. R.A. Pérez-Herrera, et al, *Journal of Lightwave Technology* 27, 2563-2569 (2009)
9. U. Keller, *Nature* 424, 831 (2003)
10. S. Kim, et al, *Optics letters* 39, 2986-2989 (2014)
11. K.M. Golant, *XXI International Congress on Glass* (2007)
12. A. Kholodkov, et al, *Optical materials* 27, 1178-1186 (2005)
13. A.M. Smirnov, et al, *ACS Photonics* 5, 5038-5046 (2018)
14. F. Sanchez, et al, *Phys. Rev. A* 48, 2220-2229 (1993)
15. W. Loh, *Optics letters* 21, 734-736 (1996)