

УДК 681.7.068.4

**К.К. Бобков¹, В.В. Вельмискин¹, А.Е. Левченко¹,
Д.С. Липатов², М.Е. Лихачев¹**

¹ Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН,
Нижний Новгород, Россия

ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИНЫ ИТТЕРБИЕВЫХ СВЕТОВОДОВ-КОНУСОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПИКОВОЙ МОЩНОСТИ

В работе приводятся результаты измерения максимально-достижимого уровня пиковой мощности в иттербиевом световоде-конусе относительно малой длины (от 1,7 до 2,7 м), обладающем большим поглощением излучения накачки из первой отражающей оболочки (25,5 дБ/м на длине волны 976 нм), при его использовании в финальном каскаде усилителя импульсов с центральной длиной волны 1065 нм и длительностью 7,6 пс.

Ключевые слова: импульсный волоконный лазер, иттербиевые световоды-конусы, нелинейные эффекты.

**K.K. Bobkov¹, V.V. Velmiskin¹, A.E. Levchenko¹,
D.S. Lipatov², M.E. Likhachev¹**

¹ Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russian Federation

² Institute of chemistry of high purity substances RAS,
Nizhny Novgorod, Russian Federation

OPTIMIZATION OF YB-DOPED TAPERED FIBER LENGTH TO ACHIEVE MAXIMUM PEAK POWER

We report on measurements of maximum achievable peak power level in relatively short-length (1.7-2.7 m) ytterbium-doped tapered-fibers with high coefficient of cladding radiation absorption (25.5 dB/m at 976 nm), used for final amplification of 7.6 ps pulses centered at 1065 nm.

Keywords: pulsed fiber laser, ytterbium-doped tapered fiber, nonlinear effects.

Введение

Достижение высокой пиковой мощности в импульсных волоконных иттербиевых лазерах требует использования световодов с большой площадью поля моды. К настоящему времени наиболее выдающиеся

с точки зрения пиковой мощности результаты были получены с использованием легированных оксидом иттербия микроструктурированных световодов-стержней. Так, в работе [1] с использованием такого световода была реализована лазерная система, генерирующая чирпированные импульсы длительностью несколько единиц нс с пиковой мощностью порядка 1 МВт, которые сжимались до длительности 480 фс, что соответствовало пиковой мощности ~3,8 ГВт. Однако на практике использование подобных систем затруднено из-за таких недостатков, как громоздкость (связанная с необходимостью использования прямого световода длиной около 1,5 м) и наличие большого количества юстируемых объемных оптических элементов (снижающих надежность). Как следствие, в настоящее время широко используются лишь полностью волоконные лазерные системы с относительно небольшой пиковой мощностью, лишенные вышеуказанных недостатков.

Одной из наиболее перспективных конструкций световодов с большой площадью поля моды, позволяющей создавать компактные полностью волоконные системы, являются иттербиевые световоды-конусы [2]. Идея световода-конуса заключается в том, что усиливаемое излучение вводится в тонкий одномодовый конец (диаметр сердцевинны ~10 мкм) и распространяется по длине световода с плавно увеличивающимся диаметром сердцевинны в сторону выходного конца с большой площадью поля моды. Достаточно медленное увеличение диаметра сердцевинны приводит к адиабатическому изменению фундаментальной моды: увеличение её размера происходит без возбуждения высших мод. В работе [2] сообщалось о создании одномодового (параметр $M^2 = 1,35$) пассивного световода-конуса с диаметром сердцевинны на выходе 117 мкм. Отсутствие доли мощности излучения в высших модах позволяет подавить такие негативные эффекты, как модовая нестабильность [3] и деградация моды [4]. Ранее в работе [5] нами демонстрировался усилитель чирпированных импульсов с выходным каскадом на основе иттербиевого световода-конуса с диаметрами сердцевинны/первой отражающей оболочки на выходном конце 62/450 мкм и длиной 2 м, в котором чирпированные импульсы с центральной длиной волны 1065 нм, шириной 7 нм, длительностью 28 пс и частотой следования 0,92 МГц были усилены до пиковой мощности 350 кВт, а затем сжаты на дифракционных решетках до длительности 315 фс, что соответствовало 22 МВт пиковой мощности. А при усилении не-

чирпированных импульсов с центральной длиной волны 1065 нм, шириной 1,6 нм, длительностью 8 пс и частотой следования 0,92 МГц удалось достигнуть уровня пиковой мощности 0,76 МВт. В последнем случае дальнейшее увеличение пиковой мощности было ограничено эффектом вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). В той же работе приведены расчеты, показавшие, что величина порога ВКР растёт при увеличении длины световода-конуса. Проведенные эксперименты подтвердили предсказанную тенденцию, но длина имеющихся на тот момент световодов-конусов (около 2 м) не позволяла определить максимально достижимый порог нелинейных эффектов.

В данной работе изготовлен иттербиевый световод-конус длиной ~2,7 м и представлены результаты экспериментов по определению порога нелинейных эффектов в усилителе пикосекундных импульсов на основе разработанного световода-конуса.

Эксперимент

Заготовка световода-конуса, состоящая из активной сердцевины и двух отражающих оболочек (первая – из чистого кварцевого стекла, вторая – из фторированного кварцевого стекла), создана с помощью метода MCVD с осаждением всех лигандов из газовой фазы. Аналогично работе [5] в качестве матрицы активной сердцевины использовано стойкое к эффекту фотопотемнения фосфороалюмосиликатное стекло, что позволило ввести 2 вес.% оксида иттербия при разнице показателей преломления сердцевина/оболочка 0,003 (рис. 1, а). Для дополнительного уменьшения длины волны отсечки был создан депрессированный слой вокруг активной сердцевины, а для создания анизотропии в сердцевине в первую отражающую оболочку введены боросиликатные стержни. Конусный переход создавался в процессе вытяжки световода методом, разработанным в ИЦВО РАН [6, 7]. Реализованный световод-конус характеризуется большим поглощением малого сигнала из кварцевой оболочки (25,5 дБ/м на длине волны 976 нм) (рис. 1, б), диаметрами сердцевины/кварцевой оболочки на выходе 43/352 мкм и максимальной длиной 2,7 м при длине перехода 0,5 м (рис. 1, в).

Перед проведением экспериментов были проведены расчеты, аналогичные проведенным в предыдущей работе [5], для получения

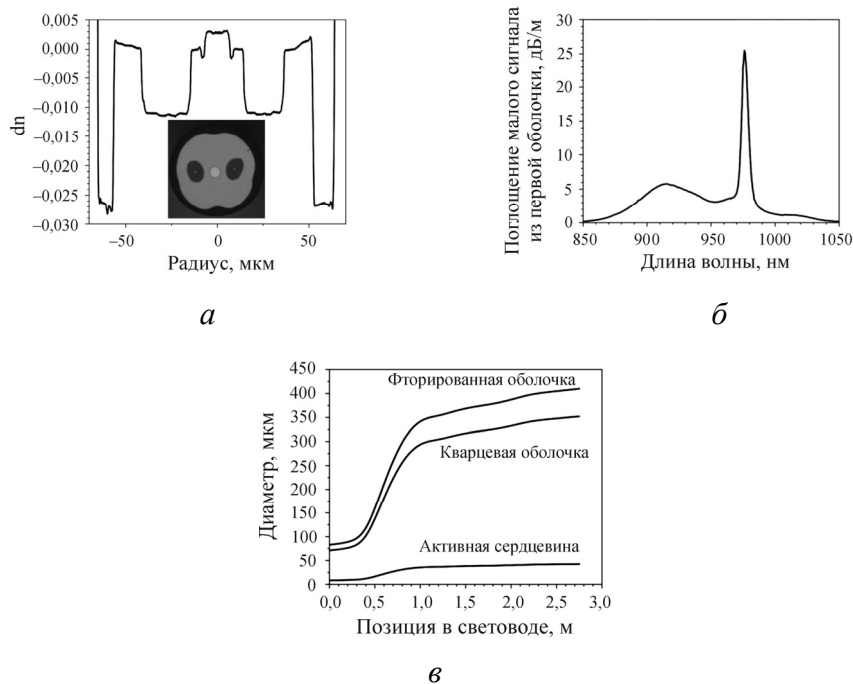


Рис. 1. Характеристики типичного созданного световода-конуса: *а* – профиль показателя преломления и фотография торца световода при диаметре сердцевинки 13 мкм, *б* – поглощение малого сигнала из кварцевой оболочки, *в* – зависимость диаметров сердцевинки/кварцевой оболочки/фторированной оболочки от длины

зависимости порога ВКР от длины световода-конуса. Расчеты проводились с параметрами: входной сигнал – центральная длина волны 1065 нм, средняя мощность 10 мВт, частота повторения 1 МГц, длительность 8 пс; накачка – центральная длина волны 976 нм, числовая апертура 0,15. Для того чтобы установить, достаточно ли длина созданного конусного световода, при расчетах также исследовались световоды большей длины, где со стороны толстого конца конусного световода «добавлялся» отрезок световода с постоянными диаметрами сердцевинки, первой и второй оболочек. Величины диаметров были взяты равными параметрам толстого конца конусного световода длиной 2,7 м. Из полученных данных видно, что на длине 2,7 м величина порога ВКР практически достигает насыщения (рис. 2, сплошная кривая), при этом увеличение длины с 2 до 2,7 м позволяет повысить порог ВКР на ~90 кВт, а при увеличении длины с 2,7 до 4 м прирост мощности составляет всего ~50 кВт (пунктирная кривая на рис. 2). Та-

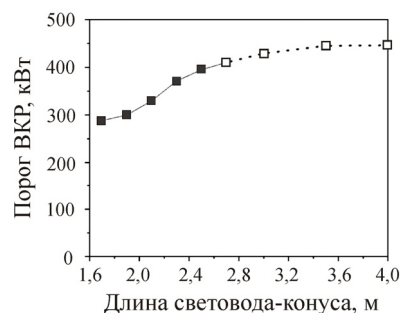


Рис. 2. Расчетная зависимость порога ВКР от длины световода-конуса

ким образом, ожидалось, что с использованием разработанного световода-конуса удастся достигнуть предельную для фиксированного выходного диаметра сердцевины (около 40 мкм) величину пиковой мощности.

Для проведения экспериментов была реализована стандартная схема двухкаскадного усилителя импульсов (рис. 3), состоящая из задающего генератора импульсов длительностью 6 пс с центральной длиной волны 1064 нм и частотой следования 0,92 МГц, которые предварительно усиливались до 10 мВт средней мощности в волоконном каскаде с вводом излучения в сердцевину активного световода, а затем подавались на вход световода-конуса. На входе в световод-конус спектральная ширина импульсов составляла 6,3 нм, а длительность – 7,6 пс. Длительность импульсов на выходе световода-конуса при мощности, соответствующей порогу нелинейных эффектов, составляла 8,5 пс. Излучение накачки от многомодового диода с центральной стабилизированной длиной волны 976 нм вводилось в толстый конец световода-конуса с помощью системы линз и зеркал через торец, сполитроированный

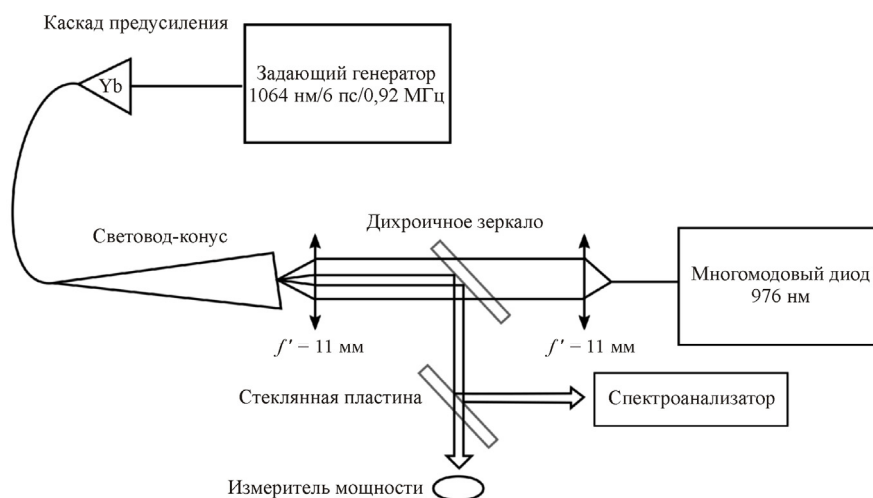


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

под углом 8 град для предотвращения развития паразитной генерации. Толстый конец фиксировался на трехкоординатном столике таким образом, чтобы компенсировать отклонение пучка сигнала от оси световода-конуса вследствие угловой полировки. Величина порога нелинейных эффектов оценивалась по спектру выходного сигнала: за порог принималась такая величина мощности усиливаемых импульсов, при которой доля мощности в компонентах, связанных с нелинейными эффектами, составляла 1 % от общей выходной мощности.

Результаты

В ходе экспериментов было обнаружено, что величина пиковой мощности усиливаемых импульсов в реализованном конусном световоде ограничена не ВКР, а четырехволновым смещением (ЧВС), приводящим к появлению излучения в области 850 и 1400 нм, доля мощности в которых значительно превышала долю мощности в первом Stokes ВКР (1 % против 0,1 % соответственно) (рис. 4). На рис. 5 приведена зависимость порога нелинейных эффектов от длины световода-конуса. Как видно из рисунка, полученная кривая стремится к величине пиковой мощности ~ 1 МВт, повторяя форму кривой, полученной в результате расчетов. При этом абсолютные значения расчетных и экспериментальных порогов не совпадают чуть более, чем в два раза. Стоит отметить, что подобное расхождение является нормальным, так как при моделировании не учитывалось радиальное распределение

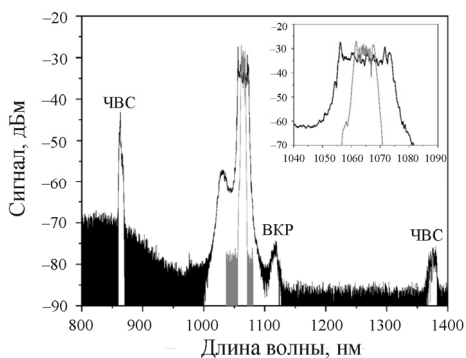


Рис. 4. Спектр сигнала на входе (серым цветом) и выходе (черным цветом) световода-конуса длиной 2,7 м

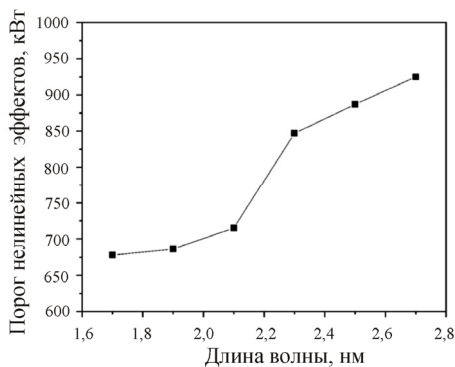


Рис. 5. Экспериментально полученная зависимость порога ВКР от длины световода-конуса при средней мощности входного сигнала 10 мВт

концентрации ионов иттербия, инверсии и электрического поля, что может вносить заметный вклад в финальный результат. Таким образом, увеличение длины световода-конуса с 1,7 до 2,7 м позволяет поднять уровень пиковой мощности с 680 до 930 кВт (на ~35 %). Необходимо отметить, что в настоящей работе исследовался конусный световод с относительно небольшим, по сравнению с нашей предыдущей работой [5], выходным диаметром сердцевины. Можно ожидать, что при увеличении выходного диаметра сердцевины до 62 мкм (аналогично работе [5]) порог нелинейных эффектов удастся еще увеличить до уровня, заметно превышающего 1 МВт.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что в созданном нашим коллективом иттербиевом световоде-конусе длиной 2,7 м порог нелинейных эффектов достигает величины 930 кВт, что является рекордно-высокой величиной среди конусных световодов. Как показывают теоретические расчеты, дальнейшее увеличение длины не приведет к значительному росту пиковой мощности, поэтому для увеличения порога нелинейных эффектов необходимо использовать конусные световоды с большим выходным диаметром сердцевины. Также было обнаружено, что ограничивающим фактором для достижения большой пиковой мощности может служить не только вынужденное комбинационное рассеяние, но и четырехволновое смешение.

Данная работа была поддержана программой Президиума Российской академии наук (направление № 6: Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом; проект 5.7).

Список литературы

1. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power / T. Eidam, J. Rothhardt, F. Stutzki, F. Jansen, S. Hädrich, H. Carstens, C. Jauregui, J. Limpert, A. Tünnermann // Opt. Express. – 2011. – Vol. 19, no. 1. – P. 255–260.
2. Double clad tapered fiber for high power applications / V. Filippov, Yu. Chamorovskii, J. Kerttula, K. Golant, M. Pessa, O.G. Okhotnikov // Opt. Express. – 2008. – Vol. 16, no. 3. – P. 1929–1944.

3. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power / T. Eidam, S. Hanf, E. Seise, T.V. Andersen, T. Gabler, C. Wirth, T. Schreiber, J. Limpert, A. Tünnermann // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35, no. 2. – P. 94–96.

4. Постепенная деградация основной моды в иттербиевых импульсных волоконных лазерах // К.К. Бобков, М.М. Бубнов, С.С. Алешкина, М.Е. Лихачев // *Прикладная фотоника.* – 2015. – № 2(3). – 287–298.

5. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier / K. Bobkov, A. Andrianov, M. Koptev, S. Muravyov, A. Levchenko, V. Velmiskin, S. Aleshkina, S. Semyonov, D. Lipatov, A. Guryanov, A. Kim, M. Likhachev // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25, no. 22. – P. 26958–26972.

6. A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length / V.A. Bogatyrev, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, A.S. Kurkov, P.V. Mamyshv, A.M. Prokhorov, S.D. Rumyantsev, V.A. Semenov, S.L. Semenov, A.A. Sysoliatin, S.V. Chernikov, A.N. Gur'yanov, G.G. Devyatikh, S.I. Miroshnichenko // *J. Lightwave Technol.* – 1991. – Vol. 9, no. 5. – P. 561–566.

7. Bogatyryov V.A., Sysoliatin A.A. An efficient method to produce fibers with outer diameter varying along the length // *Proc. SPIE.* – 2001. – Paper 4204.

References

1. Eidam T., Rothhardt J., Stutzki F., Jansen F., Hädrich S., Carstens H., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power. *Opt. Express*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 255-260.

2. Filippov V., Chamorovskii Yu., Kerttula J., Golant K., Pessa M., Okhotnikov O.G. Double clad tapered fiber for high power applications. *Opt. Express*, 2008, vol. 16, no. 3, pp. 1929-1944.

3. Eidam T., Hanf S., Seise E., Andersen T. V., Gabler T., Wirth C., Schreiber T., Limpert J., Tünnermann A. Femtosecond fiber CPA system emitting 830 W average output power. *Opt. Lett.*, 2010, vol. 35, no. 2, pp. 94-96.

4. Bobkov K.K., Bubnov M.M., Aleshkina S.S., Likhachev M.E. Gradual fundamental mode degradation process in ytterbium doped pulsed fiber lasers. *Applied Photonics*, 2015, 2(3), pp. 287-298.

5. Bobkov K., Andrianov A., Koptev M., Muravyov S., Levchenko A., Velmiskin V., Aleshkina S., Semyonov S., Lipatov D., Guryanov A., Kim A., Likhachev M. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier. *Opt. Express*, 2017, vol. 25, no. 22, pp. 26958-26972.

6. Bogatyrev V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Kurkov A.S., Mamyshv P.V., Prokhorov A.M., Romyantsev S.D., Semenov V.A., Semenov S.L., Sysoliatin A.A., Chernikov S.V., Gur'yanov A.N., Devyatykh G.G., Miroshnichenko S.I. A single-mode fiber with chromatic dispersion varying along the length. *J. Lightwave Technol.*, 1991, vol. 9, no. 5, pp. 561-566.

7. Bogatyryov V.A., Sysoliatin A.A. An efficient method to produce fibers with outer diameter varying along the length. *Proc. SPIE. 2001*, paper 4204.

Получено 11.11.2018