

УДК 681.7.068

**К.К. Бобков<sup>1</sup>, Д.С. Липатов<sup>2</sup>, А.Н. Гурьянов<sup>2</sup>, М.Е. Лихачев<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН,  
Нижний Новгород, Россия

## **ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЙ ИТТЕРБИЕМ СВЕТОВОД С ПЬЕДЕСТАЛОМ**

В работе докладывается о созданном активном световоде, алюмофосфоросиликатная сердцевина которого была легирована оксидом иттербия (1.2 мол.%) и окружена германиевым пьедесталом. Создание пьедестала позволило обеспечить одномодовость сердцевины (длина волны отсечки второй моды 0,95 мкм), диаметр которой составлял около 13 мкм (при разнице показателей преломления 0,002). Световод имел величину поглощения слабого сигнала из первой отражающей оболочки 39 дБ/м на длине волны 976 нм. На основе созданного световода был реализован полностью волоконный усилитель импульсов с центральной длиной волны 1030 нм, длительностью 24 пс и частотой повторения 1,432 МГц до средней мощности 10,2 Вт, что соответствует рекордно-высокой пиковой мощности около 300 кВт.

**Ключевые слова:** световод с пьедесталом, высоколегированный иттербиевый световод, пиковая мощность, нелинейные эффекты.

**K.K. Bobkov<sup>1</sup>, D.S. Lipatov<sup>2</sup>, A.N. Guryanov<sup>2</sup>, M.E. Likhachev<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy  
of Sciences, Dianov Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia<sup>2</sup>G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High Purity Substances RAS,  
Nizhny Novgorod, Russia

## **HIGHLY-YB-DOPED FIBER WITH PEDESTAL**

We report on development of active optical fiber with aluminophosphorsilicate glass core doped with ytterbium oxide of 1.2 mol.% that was surrounded by a germanium glass pedestal. Due to the pedestal the core with diameter of 13  $\mu\text{m}$  supported only fundamental mode (the cut-off wavelength was estimated to be 0.95  $\mu\text{m}$ ). The fiber had a small-signal absorption from a first reflective cladding of 39 dB/m at 976 nm. Using a 23-cm piece of the fiber we amplified 24 ps 1030 nm 1.432 MHz pulses up to 10.2 W of average power in an all-fiber scheme. The obtained result corresponding to 300 kW of peak power that is record-high for an all-fiber schemes.

**Keywords:** optical fiber with pedestal, highly-ytterbium-doped fiber, high peak power, nonlinear effects.

### **Введение**

Достижение высокой пиковой мощности в волоконных системах невозможно без использования техники усиления чирпированных импульсов и применения световодов с большой площадью поля моды

(БПМ). Так, в работе [1] была продемонстрирована система, в которой фемтосекундные импульсы из задающего генератора с центральной длиной волны 1027 нм предварительно растягивались до длительности 3 нс, а затем усиливались в активном иттербиевом микроструктурированном световоде с диаметром сердцевины 108 мкм до пиковой мощности на уровне 1 МВт. Однако использование микроструктурированных световодов приводит к увеличению размеров системы (сам по себе световод представляет негнущийся стержень длиной 1,3 м) и наличие большого количества объемных оптических элементов, используемых для ввода и вывода излучения в микроструктурированный световод и требующих периодической юстировки. Этим недостатком лишены световоды-конусы: в работе [2] наш коллектив демонстрировал усиление импульсов длительностью 22 пс с центральной длиной волны 1064 нм до пиковой мощности 740 кВт при средней мощности 150 Вт в конусном световоде длиной 2,45 м и диаметром сердцевины на выходе 46 мкм. При этом световод-конус был намотан на катушку диаметром 19 см, а излучение сигнала вводилось в его тонкий конец полностью волоконным способом: волоконный выход предусилительного каскада подваривался к тонкому концу световода-конуса. Однако ранее нами было показано, что в конусных световодах для сигнала на длине волны 1030 нм уровень достижимой пиковой мощности будет значительно меньше уровня пиковой мощности для сигнала на длине волны 1064 нм в результате уменьшения порога вынужденного комбинационного рассеяния [3]. При использовании наиболее простой конструкции активных иттербиевых световодов – световодов со ступенчатым профилем показателя преломления – в полностью волоконной схеме достигнуть сравнимого уровня пиковой мощности, по нашим данным, не удалось. Связано это с тем, что для создания БПМ-световода, поддерживающего распространение только фундаментальной моды на рабочей длине волны, необходимо уменьшать разницу показателей преломления сердцевины-оболочка. В то же время уменьшить разницу показателей преломления без уменьшения концентрации оксида иттербия, обладающего положительной рефрактивностью, невозможно. А уменьшение концентрации иттербия приводит к уменьшению величины поглощения накачки, значит, к увеличению необходимой длины световода и, следовательно, уменьшению порога нелинейных эффектов. Решить эту проблему возможно, если вокруг активной сердцевины создать пьедестал, относи-

тельно которого разница показателей преломления сердцевина-пьедестал будет достаточно малой, чтобы обеспечить одномодовый режим работы световода при большом диаметре сердцевины. В то же время относительно кварцевой оболочки разница показателей преломления сердцевина-оболочка может быть достаточно высокой. Так, в работе [4] был реализован световод, имеющий разницу показателей преломления сердцевина-пьедестал 0,0006, что при диаметре сердцевины 33 мкм обеспечивало маломодовый режим работы (нормированная частота составляла 4,2). Серцевина световода содержала оксид фосфора (~4,4 мол.%), оксид алюминия (~3,8 мол.%) и оксид иттербия (0,35 мол.%); пьедестал формировался за счет оксида германия (~1,5 мол.%). Оболочка световода была сошлифована до формы восьмигранника, что вкупе с соотношением диаметров сердцевина-оболочка приблизительно 1 к 7 дало поглощение слабого сигнала из оболочки ~22 дБ/м на длине волны 976 нм. С использованием реализованного световода длиной 0,77 м был создан усилитель излучения задающего генератора (MOPA – master oscillator power amplifier) с центральной длиной волны 1030 нм и длительностью 190 пс. Излучение усиливаемых импульсов и многомодовой накачки вводилось с помощью объемных элементов (линз и дихроичного зеркала). Световод был намотан на катушку диаметром ~40 см, что являлось компромиссным значением между эффективностью и качеством выходного излучения. Усиленные импульсы имели среднюю мощность 150 Вт, что соответствовало пиковой мощности 500 кВт.

В данной работе демонстрируется высоколегированный иттербием световод с пьедесталом, на основе которого была реализована полностью волоконная MOPA-схема.

### Эксперимент

Заготовка световода, состоящая из активной сердцевины, пьедестала и отражающей оболочки, создана с помощью метода MCVD с осаждением всех компонентов стекла из газовой фазы. Аналогично работе [4] в качестве матрицы активной сердцевины использовано стойкое к эффекту фотопотемнения алюмофосфоросиликатное стекло [5]. В сердцевину было введено 1,2 мол.% оксида иттербия (~0,8 ат.%) (рис. 1, а). Пьедестал вокруг сердцевины был образован фосфорогерманосиликатным стеклом. В реализованном световоде при диаметре сердцевины около 13 мкм от-

сечка второй моды относительно уровня пьедестала равнялась приблизительно 0,95 мкм (разница показателей преломления сердцевина-пьедестал составила 0,002), т.е. формально световод был одномодовым относительно пьедестала. В то же время из-за ограниченного размера пьедестала вторая мода удерживалась в нем (рис. 1, б), но в значительной степени теряла локализацию в области сердцевинины – доля мощности второй моды в сердцевине составляла около 51 против 88 % для фундаментальной моды. Как следствие, если усиление фундаментальной моды будет составлять 30 дБ, то вторая мода усилится всего на 17 дБ, тем самым обеспечив уменьшение доли второй моды в выходном излучении приблизительно в 20 раз (на 13 дБ). Вытянутый световод был покрыт отражающим полимером с числовой апертурой более 0,41. Для лучшего перемешивания излучения накачки в первой отражающей оболочке преформа была отполирована до формы квадрата и, как видно из рис. 1, в, вытянутый световод имел поперечное сечение, близкое к квадратному. Квадратное сечение, высокая концентрация оксида иттербия в сердцевине и относительно большое соотношение диаметра сердцевинины к диаметру оболочки (приблизительно 1 к 10) обеспечили рекордно высокую скорость поглощения слабого сигнала из первой отражающей оболочки: 9 дБ/м на длине волны 920 нм и 39 дБ/м на длине волны 976 нм (см. рис. 1, в). Таким образом, уже на длине 50 см можно ожидать практически полного поглощения излучения многомодовой накачки на длине волны 976 нм.

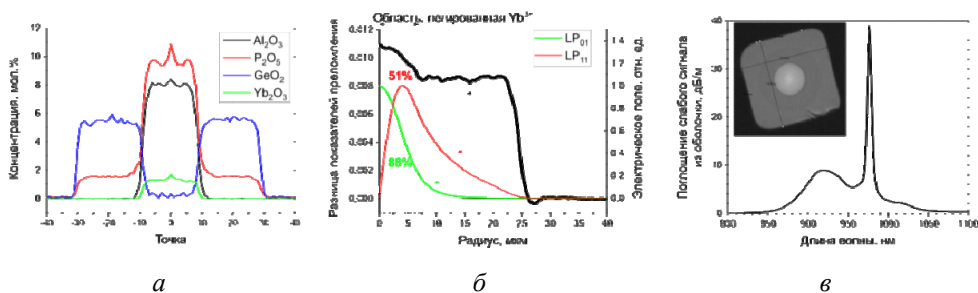


Рис. 1. Характеристики созданного световода: а – распределение легирующих добавок по сечению; б – профиль показателя преломления и распределение интенсивности для фундаментальной и первой высшей мод на длине волны 1030 нм; в – спектр поглощения слабого сигнала из оболочки и фотография торца световода

Для проведения экспериментов была реализована стандартная схема усилителя излучения задающего генератора (рис. 2). В качестве задающего генератора использовался самодельный источник 6 пс им-

пульсов с частотой повторения 27,2 МГц и центральной длиной волны 1030 нм на основе нелинейного кольцевого зеркала. Импульсы из источника предварительно предусиливались, растягивались в отрезке световода Flexcore длиной 25 м до длительности 24 пс (для этого использовались поляризационный делитель пучка и фарадеевское зеркало – таким образом, импульсы дважды проходили через волоконный растяжитель, и за счет поворота оси поляризации фарадеевским зеркалом обеспечивалось сохранение поляризации растягиваемых импульсов), прореживались акустооптическим модулятором до частоты 1,432 МГц, предусиливались до средней мощности 10 мВт и вводились в исследуемый световод с пьедесталом (FUT – fiber under test) длиной 23 см вместе с многомодовым излучением накачки с помощью волоконного объединителя сигнала и накачки. Маломощные предусилительные каскады были реализованы на основе созданных в НЦВО РАН иттербиевых световодов типа PANDA с диаметрами сердцевинны/оболочки 6/125 мкм с вводом одномодового излучения накачки в сердцевину через волоконный объединитель длин волн. Стоит отметить, что вся схема, кроме волоконного растяжителя, фарадеевского зеркала и исследуемого световода с пьедесталом, создана с использованием световодов типа PANDA, и на входе в FUT импульсы имели коэффициент экстинкции 22 дБ. Во избежание развития паразитной генерации выходной торец FUT полировался под углом 8 градусов.

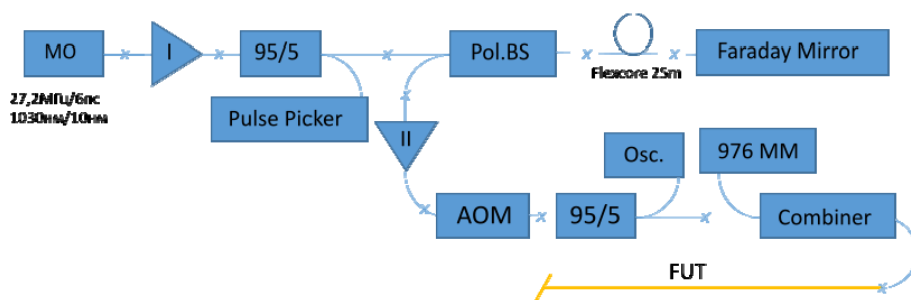


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: MO – задающий генератор; I, II – первый и второй маломощные каскады усиления; 95/5 – волоконный ответвитель; pulse picker – селектор импульсов; Pol. BS – поляризационный делитель пучка; Faraday Mirror – пигтелированное фарадеевское зеркало; AOM – акустооптический модулятор; Osc. – осциллограф; Combiner – объединитель излучения сигнала и накачки; 976 ММ – диод многомодовой накачки с центральной стабилизированной длиной волны 976 нм; FUT – исследуемый световод с пьедесталом

## Результаты

Несмотря на достаточно малую длину FUT, эффективность преобразования излучения накачки в сигнал составила 64 % (рис. 3, *а*). При этом увеличение средней мощности было ограничено появлением вынужденного комбинационного рассеяния и достигло 10,2 Вт, в то время как спектр усиливаемых импульсов изменился незначительно (рис. 3, *б*). Параметр качества выходного пучка  $M^2$  на выходе FUT не превышал 1,26, что свидетельствует о режиме работы, близком к одномодовому. Таким образом, при относительно небольшом диаметре поля моды (~11,5 мкм), но малой длине FUT удалость достичь пиковой мощности около 300 кВт, что является рекордным результатом для полностью волоконных систем на длине волны 1030 нм. Стоит отметить, что возможно дальнейшее уменьшение разницы показателей преломления сердцевина-пъедестал (за счет увеличения показателя преломления пьедестала), а сердцевина и диаметр поля моды могут быть увеличены до 20 мкм. Как следствие, это позволит увеличить величину пиковой мощности до суб-МВт уровня, не уступающего продемонстрированному в системах с микроструктурированным световодом и световодом-конусом.

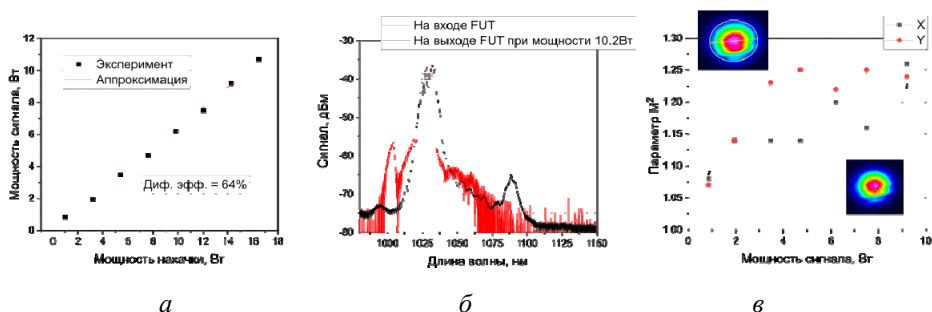


Рис. 3. Характеристики усилителя: *а* – эффективность преобразования накачки в сигнал; *б* – спектр импульсов на входе в FUT и на выходе при средней мощности 10,2 Вт; *в* – измеренный параметр  $M^2$  и распределение интенсивности выходного излучения на вставках

## Заключение

Был создан иттербиевый световод с активной сердцевиной диаметром 13 мкм и фосфорогерманосиликатным пьедесталом вокруг сердцевины. Длина волны отсечки в сердцевине относительно пьеде-

стала составила 950 нм. Световод имел большую величину поглощения слабого сигнала из оболочки 39 дБ/м на длине волны 976 нм, что позволило создать усилитель на основе полученного световода длиной всего 23 см, при этом эффективность преобразования накачки в сигнал составила 64 %. На выходе из световода с пьедесталом импульсы с центральной длиной волны 1030 нм, длительностью 24 пс и частотой повторения 1,432 МГц имели среднюю мощность 10,2 Вт, что соответствует пиковой мощности около 300 кВт. Продемонстрированный результат является рекордным для полностью волоконных систем.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-19-00347.*

### **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. Scaling of average power in sub-MW peak power Yb-doped tapered fiber picosecond pulse amplifiers / K. Bobkov, A. Levchenko, T. Kashaykina, S. Aleshkina, M. Bubnov, D. Lipatov, A. Laptev, A. Guryanov, Y. Leventoux, G. Granger, V. Couderc, S. Février, M. Likhachev // *Opt. Express.* – 2021. – Vol. 29, no. 2. – P. 1722–1735.
3. 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.
4. Ultra-low NA step-index large mode area Yb-doped fiber with a germanium doped cladding for high power pulse amplification / R. Sidharthan, D. Lin, K.J. Lim, H. Li, S.H. Lim, D.J. Richardson, S. Yoo // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45, no. 14. – P. 3828–3831.
5. Large-Mode-Area Highly Yb-doped Photodarkening-Free Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub>-Based Fiber / M. Likhachev, S. Aleshkina, M. Bubnov, E. Dianov, D. Lipatov, A. Guryanov // *CLEO/Europe-EQEC.* – 2011. – Paper CJ.P.24.

## 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. Bobkov K., Levchenko A., Kashaykina T., Aleshkina S., Bubnov M., Lipatov D., Laptev A., Guryanov A., Leventoux Y., Granger G., Couderc V., Février S., Likhachev M. Scaling of average power in sub-MW peak power Yb-doped tapered fiber picosecond pulse amplifiers. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, no. 2, pp. 1722-1735.
3. 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.
4. Sidharthan R., Lin D., Lim K.J., Li H., Lim S.H., Richardson D.J., Yoo S. Ultra-low NA step-index large mode area Yb-doped fiber with a germanium doped cladding for high power pulse amplification. *Opt. Lett.*, 2020, vol. 45, no. 14, pp. 3828-3831.
5. Likhachev M., Aleshkina S., Bubnov M., Dianov E., Lipatov D., Guryanov A. Large-Mode-Area Highly Yb-doped Photodarkening-Free Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub>-Based Fiber. *CLEO/Europe-EQEC*, 2011, Paper CJ.P.24.

Получено 22.09.2021