

## НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ПОРОГОВУЮ МОЩНОСТЬ В ИТТЕРБИЕВЫХ КОНУСНЫХ ВОЛОКОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

✉ Е. К. Михайлов<sup>1</sup>, М. Е. Лихачев<sup>1</sup>, А. Е. Левченко<sup>1</sup>,  
В. В. Вельмискин<sup>1</sup>, Д. С. Липатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук,  
Научный центр волоконной оптики им. Е. М. Дианова, Москва, Россия*

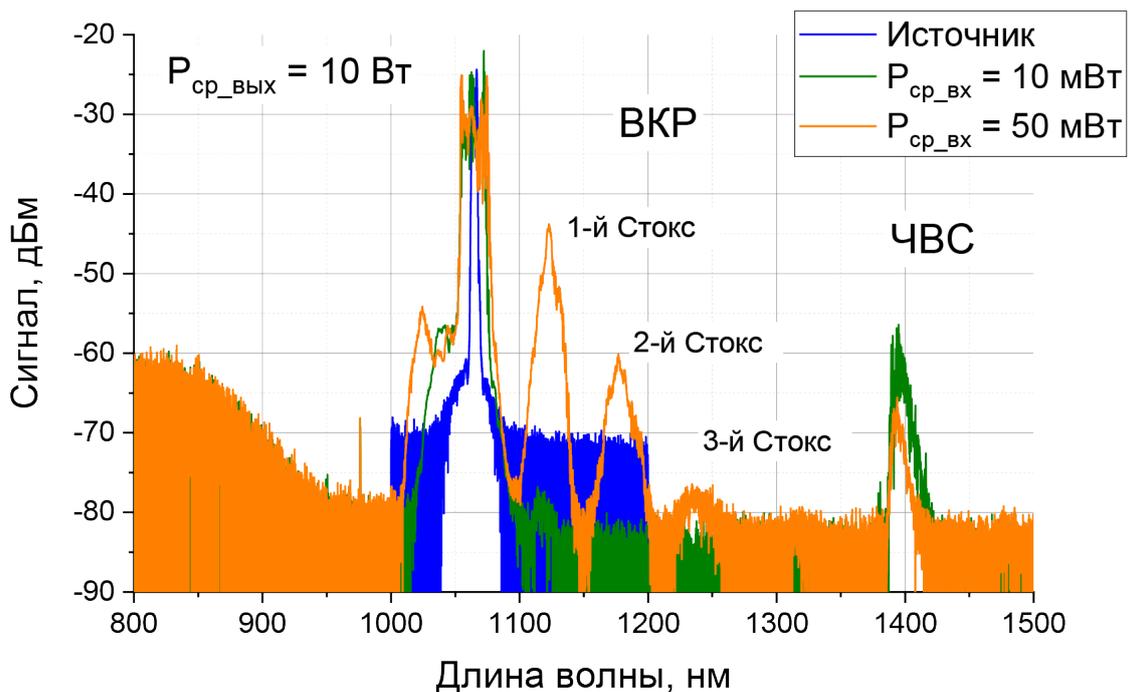
<sup>2</sup> *Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН, Нижний Новгород, Россия*

✉ egor.mikhailov@fo.gpi.ru

Волоконные световоды (ВС), легированные иттербием, являются центральным элементом волоконных усилителей ультракоротких импульсов с высокой пиковой мощностью, которые используются в высокоточной обработке материалов. В развитии волоконных усилителей существует устойчивая тенденция к увеличению пиковой мощности. Однако при увеличении пиковой мощности в ВС наблюдается развитие нелинейных эффектов, в связи с чем ключевой задачей при разработке новых усилителей становится увеличение порога возникновения упомянутых эффектов. Крайне перспективным подходом является изготовление световодов-конусов (СК), суть которого заключается в изменении диаметра световода относительно его длины. Благодаря подобной структуре световода обеспечивается адиабатическое увеличение поля фундаментальной моды без потери мощности на возбуждение высших мод. С помощью СК были одновременно достигнуты высокие значения пиковой и средней мощности [1], а также СК имеют низкие изгибные потери, что позволяет использовать их в компактных волоконных усилителях.

Из нелинейных эффектов вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) наиболее сильно проявлялось в СК, и именно оно являлось главным ограничивающим фактором при увеличении пиковой мощности [1, 2]. Однако с увеличением в СК порога возникновения ВКР нами периодически стало наблюдаться четырехволновое смешение (ЧВС), которое также ограничивало увеличение пиковой мощности. Это означает, что ЧВС — это следующий по порядку величины фактор, препятствующий дальнейшему увеличению пиковой мощности, возникновение и поведение которого в СК на данный момент является слабоизученным. В настоящей работе представлены результаты исследования ВКР и ЧВС при усилении импульсов разной мощности в отдельно взятом СК.

Структура СК была близка к представленной в [1, 2], а его длина составляла 1,7 м. В узкой части СК диаметр сердцевины был равен 8 мкм, в толстой — 40 мкм. К узкой части был приварен источник импульсов длительностью 8,9 пс, с частотой повторения 1,92 МГц и длиной волны 1064 нм. Накачка вводилась навстречу сигналу через толстый конец СК. Вводимая накачка разделялась с выходным сигналом с помощью дихроичного зеркала. Мощность накачки на длине волны  $975 \pm 0,5$  нм могла достигать до 100 Вт. В эксперименте менялась средняя мощность входного сигнала, в первом случае она составляла 10 мВт, а во втором — 50 мВт (120 и 610 Вт пиковой мощности соответственно). Сигнал в обоих случаях усиливался до 10 Вт средней мощности (610 кВт пиковой), после чего измерялись спектры излучения (см. рисунок). Важно отметить что качество пучка было близко к дифракционно ограниченному ( $M^2 < 1$ ).



Спектры излучения источника и сигналов с разной средней мощностью, усиленных до 10 Вт

Видно, что в первом случае ВКР почти отсутствует (менее 0,01 % от общей мощности), а во втором случае заметно развились 1-я, 2-я и 3-я стоксовы компоненты (~ 1,4 %). При этом ЧВС сильнее проявилось при большем входном сигнале (~ 0,01 % и 0,05 %), хотя доли мощности в этих компонентах примерно одного порядка в отличие от случая ВКР. Стоит отметить, что на спектре отсутствует коротковолновая компонента ЧВС из-за наличия в оптической схеме дихроичного зеркала. При больших мощностях на спектре наблюдался слабый пик на 860 нм, а глазом было заметно красное излучение, являющееся краем этого коротковолнового пика. Наблюдаемая зависимость порога ВКР от средней входной мощности сигнала ожидаема — уменьшение входной мощности фактически уменьшает сигнал в тонкой части СК, где площадь моды мала, что уменьшает нелинейный интеграл и увеличивает порог ВКР. В случае же ЧВС дополнительным фактором является выполнение условия фазового синхронизма, которое, по всей видимости, происходит только в толстой части СК. Поэтому нелинейный интеграл в тонкой части СК слабо влияет на порог появления ЧВС, которое в итоге практически не зависит от уровня входного сигнала.

### Список литературы

1. Bobkov K., Levchenko A., Kashaykina T. et al. Scaling of average power in sub-MW peak power Yb-doped tapered fiber picosecond pulse amplifiers // Opt. Express. 2021. Vol. 29. P. 1722–1735.
2. Bobkov K., Andrianov A., Koptev M. et al. Sub-MW peak power diffraction-limited chirped-pulse monolithic Yb-doped tapered fiber amplifier // Opt. Express. 2017. Vol. 25. P. 26958–26972.