

УДК 621.373.8

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АКТИВНОМ КОНИЧЕСКОМ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ С ДВОЙНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Козляков М.С. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Одноблюдов М.А. (Университет ИТМО)

Введение. Волоконные источники излучения с высокой пиковой мощностью, узкой шириной линии и импульсами наносекундной длительности приобрели значительную популярность в сфере когерентных лидарных систем [1]. Одной из перспективных конфигураций для достижения таких характеристик лазерного излучения являются волоконные лазерные системы, основанные на схеме задающий генератор - усилитель мощности (ЗГУМ), использующие в качестве основного волоконного усилителя коническое волокно с двойной оболочкой (КВДО) [2]. В отличие от других альтернатив, применяемых исключительно в лабораторных условиях, данная конструкция позволяет создать компактную и надежную систему, способную работать в импульсном режиме с широким диапазоном длительностей импульсов и высокой пиковой мощностью.

Масштабирование пиковой мощности наносекундных импульсов в волоконных усилителях в основном ограничивается нелинейным эффектом вынужденного рассеяния Манделштама-Бриллюэна (ВРМБ). Одним из подходов к увеличению порога ВРМБ является использование волокон с большой площадью моды, таких как цилиндрическое волокно с двойной оболочкой (ЦВДО) и КВДО [3,4]. Благодаря уменьшению плотности электрического поля, такие волокна позволяют достичь более высокой пиковой мощности. Изменение размера сердцевины волокна также приводит к сдвигу спектра усиления ВРМБ [5]. Сравнение влияния геометрии волокна на увеличение порога ВРМБ для усилителей с большой площадью имеет практическое значение. Однако, пределы энергии импульса и пиковой мощности в усилителе определяются не только геометрией волокна, но и параметрами импульсов от задающего генератора, такими как длительность импульса и ширина спектральной линии [6]. Поэтому для усилителей КВДО и ЦВДО анализ возможности достижения высокой пиковой мощности и подавления ВРМБ необходимо проводить с использованием одного и того же задающего генератора с одинаковыми параметрами излучения. Из этого задачи работы состоят в проведении сравнительного анализа и определении пределов возможностей каждого усилителя.

Основная часть. Для реализации задающего лазера использовался лазерный диод и два каскада предварительного усиления. В качестве задающего генератора использовался лазерный диод с распределенной обратной связью, имеющий ширину линии 5 МГц и генерирующий излучение на длине волны 1064 нм. Для достижения частоты следования импульсов 10 кГц и перестройки длительности импульса от 10 до 100 нс, использовался разработанный драйвер с функцией предварительного формирования импульсов. Первый предусилитель был выполнен на основе активного волокна, легированного иттербием длиной 1,5 метра с диаметром сердцевины 6 мкм. Второй предусилитель имел диаметр сердцевины 10 мкм и длину 1,8 метра.

Исследовались два типа усилителей. Первый усилитель имел длину 1,5 м и основан на цилиндрическом активном волокне с двойной оболочкой, легированным иттербием с диаметром сердцевины 20 мкм. Второй усилитель имел длину 2,3 м и основан на коническом волокне с двойной оболочкой, легированном иттербием. Диаметр сердцевины этого волокна плавно изменяется по длине от 10 до 50 мкм. Соотношение диаметров оболочки и сердцевины составляет 1:10. Ввод накачки, и выход усиленного излучения осуществляется с широкой стороны с помощью системы линз и дихроичного фильтра [3]. Коническая структура волокна позволяет значительно сместить порог ВРМБ.

В ходе исследования проведен сравнительный анализ пиковой мощности при различных длительностях импульса. Наибольшая достигнутая пиковая мощность была получена при 10 нс и составила 18,4 кВт с энергией импульса 184 мкДж для КВДО, в то время как для ЦВДО пиковая мощность была 10,3 кВт с энергией импульса 103 мкДж. Для длительности импульса 100 нс было получена пиковая мощность 1 кВт с энергией импульса 100 мкДж для КВДО и 0,512 кВт и 51,5 мкДж для ЦВДО. С увеличением длительности наносекундных импульсов пороговая пиковая мощность уменьшается. Полученные результаты показали, что использование КВДО усилителя позволяет достичь пиковую мощность почти в два больше на каждой из длительностей, по сравнению с ЦВДО.

После усиления ширина спектральной линии сохранилась без значительного уширения, а контрастом сигнала с пьедесталом составил 27 дБ. В обоих случаях профиль пучка лазерного излучения сохранил одномодовую структуру после усиления, а параметр M^2 составил 1,2 для усилителя КВДО и 1,26 для ЦВДО.

Усилитель КВДО имеет ряд преимуществ перед усилителем ЦВДО. Более высокая пиковая мощность в КВДО достигается за счет увеличения порога ВРМБ. Смещение пика усиления ВРМБ происходит из-за изменения диаметра сердцевины волокна.

Из проведенного анализа видно, что схема ЗГУМ на основе конического волоконного усилителя с двойной оболочкой позволяет достичь примерно двукратного увеличения энергии импульса и пиковой мощности по сравнению с ЦВДО, сохраняя при этом дифракционно-ограниченное качество луча и узкую ширину линии.

Выводы. Проведено сравнительное исследование усиления узкополосного одномодового наносекундного сигнала разной длительности в волоконных усилителях на основе волокон с разной геометрией ЦВДО и КВДО. Оба усилителя продемонстрировали форму импульса без уширения, узкую спектральную полосу и отличное качество пучка ($M^2 = 1,2$ и $1,26$). Однако увеличенный порог ВРМБ в усилителе КВДО по сравнению с ЦВДО демонстрирует пиковую мощность 18,4 кВт и энергию импульса 184 мкДж для длительности импульса 10 нс и пиковую мощность 1 кВт и энергию импульса 100 мкДж для длительности импульса 100 нс, что почти в два раза больше, чем в ЦВДО усилителе. Таким образом, усилитель на основе КВДО перспективен для использования в компактных наносекундных источниках для приложений дистанционного зондирования.

Список использованных источников:

1. V. Philippov, C. Codemard, Y. Jeong, C. Alegria, J. K. Sahu, J. Nilsson, and G. N. Pearson, "High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications," *Opt. Lett.* 29(22), 2590–2592 (2004).
2. Fedotov A. et al. High power picosecond MOPA with anisotropic ytterbium-doped tapered double clad fiber // *Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications*. – SPIE, 2018. – Т. 10683. – С. 214-220.
3. Petrov, Andrey, et al. "Picosecond Yb-doped tapered fiber laser system with 1.26 MW peak power and 200 W average output power." *Scientific Reports* 10.1 (2020): 17781.
4. Petrov, A. B., Mikhailovsky, G. A., Gorbachev, A. V., Odnoblyudov, M. A., Rissanen, J., Philippov, V. N., & Gumenyuk, R. V. (2022). High power ultranarrow linewidth picosecond laser system based on tapered fiber amplifier and gain-switched DFB laser diode. *Journal of Lightwave Technology*, 40(12), 3930-3934.
5. K. Shiraki, M. Ohashi, and M. Tateda, "Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fiber by changing the core radius," *Electron. Lett.* 31(8), 668–669 (1995).
6. Patokoski K. et al. Single-frequency 100 ns/0.5 mJ laser pulses from all-fiber double clad ytterbium doped tapered fiber amplifier // *Optics Express*. – 2019. – Т. 27. – №. 22. – С. 31532-31541.