

Управление оптическими импульсами в лазерных системах на основе многосердцевинных волокон

А.В. Андрианов^{1*}, Е.А. Анашкина¹, С.А. Скобелев¹, А.А. Балакин¹,
В.В. Дорофеев^{1,2}, С.Е. Моторин^{1,2}, А.Г. Литвак¹

¹ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

² Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН

*E-mail: alex.v.andrianov@gmail.com

DOI:10.31868/RFL.2024.71-72

Многосердцевинные волокна (МСВ) с близко расположенными взаимодействующими сердцевинами являются интересными устройствами для генерации и преобразования лазерного излучения. В предшествующих работах [1,2] были предложены конфигурации сердцевин в виде кольца и квадратной решетки, которые поддерживают распространение устойчивой в нелинейном режиме противофазной супермоды (моды, у которой фазы в ближайших сердцевинах отличаются на π). Устойчивость противофазной моды позволяет реализовать распространение излучения в виде коротких солитонных импульсов или квазинепрерывного излучения с полной пиковой мощностью, превышающей предельную для одной сердцевины. Возможность изменения волноводного вклада в дисперсию противофазной моды с помощью выбора расстояния между сердцевинами открывает дополнительные возможности для управления нелинейным распространением излучения.

Основой для большинства современных МСВ является плавленный кварц. Однако большой интерес представляют и другие материалы, в частности, высоконелинейные стекла - теллуритные и халькогенидные. Они отличаются широким диапазоном прозрачности в средней инфракрасной области, а также высоким (по сравнению с кварцем) коэффициентом нелинейности. В данном докладе будут представлены теоретические и численные исследования широкополосной перестройки длины волны и уменьшения длительности ультракоротких импульсов в теллуритных и халькогенидных МСВ, а также первые экспериментальные исследования нелинейного распространения света в теллуритных МСВ.

Вначале мы численно исследовали рамановскую перестройку длины волны импульсов в теллуритном МСВ. Мы рассмотрели МСВ на основе совместимой по физико-химическим параметрам пары стекол ($69\text{TeO}_2\text{-}23\text{WO}_3\text{-}8\text{La}_2\text{O}_3$ для сердцевин и $47.5\text{GeO}_2\text{-}17.5\text{TeO}_2\text{-}20\text{ZnO-}15\text{Na}_2\text{O}$ для оболочки) с 10-сердцевинными диаметром 2.1 мкм и расстоянием между ними 4.2 мкм [3]. За счет волноводного вклада дисперсионная характеристика имеет две точки нулевой дисперсии - 1.56 мкм и 4.3 мкм, между которыми располагается область аномальной дисперсии. На входе МСВ задавался лазерный импульс с энергией 1.5 нДж и длительностью 100 фс на длине волны 2.3 мкм. Параметры лазерного импульса и МСВ выбирались таким образом, чтобы нейтрализовать частотно-зависимые потери и уменьшение нелинейности при сдвиге частоты. В процессе распространения формируется пространственно-временной солитон, центральная длина волны которого увеличивается по мере распространения вдоль волокна за счет вынужденного комбинационного рассеяния света. При приближении солитона к точке нулевой дисперсии излучаются дисперсионные волны в область нормальной дисперсии, а длина волны основного импульса стабилизируется (далее импульс достаточно быстро затухает из-за высоких потерь в данной спектральной области). Для данной

конструкции волокна максимальная центральная длина волны солитона составляла около 4.3 мкм, а центральная длина волны дисперсионных волн - около 5.2 мкм.

Далее мы рассмотрели возможности продвижения в средний ИК диапазон с помощью халькогенидных МСВ. Мы предложили и численно промоделировали специальную конструкцию МСВ с квадратной матрицей 7×7 сердцевин [4]. Для сердцевин и оболочки выбрана пара стекол с составом $\text{As}_{40}\text{Se}_{10}\text{Te}_{50}$ и $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ с разницей показателей преломления около 30%. Для одномодового волокна из таких стекол с диаметром сердцевины 1.5 мкм дисперсионная характеристика имеет два нуля дисперсии в области прозрачности (2.2 мкм и 4.3 мкм), между которыми дисперсия аномальна. Для получения дисперсионной зависимости, позволяющей осуществить сдвиг длины волны далее 4.3 мкм, было оптимизировано расстояние между сердцевинами МСВ. Расчет дисперсионной характеристики противофазной супермоды в МСВ с диаметром сердцевин 1.5 мкм и расстоянием между ними 3.6 мкм показал, что в результате влияния связи между сердцевинами удастся сместить второй ноль дисперсии до 5.14 мкм (при этом третий ноль около 5.48 мкм также оказывается в области прозрачности). В численном моделировании мы исследовали распространение ультракороткого импульса длительностью 100 фс с энергией 300 пДж и исходной длиной волны 2.8 мкм (такие импульсы могут быть получены с помощью лазеров на основе Er:ZBLAN). В процессе распространения формируется несколько солитонных импульсов, наиболее мощный из которых вначале сжимается до ~12 фс и далее перестраивается до длины волны около 5 мкм. Оказалось, что импульс может "туннелировать" через область нормальной дисперсии между нулями дисперсии и вновь продолжить распространение в виде солитона с максимальной длиной волны до 6.2 мкм. Доля энергии в данном импульсе составляла 25%.

На пути к экспериментальной демонстрации численных исследований были разработаны и изготовлены тестовые образцы теллуритных волокон с двумя и четырьмя близко расположенными сердцевинами. Для изготовления данных волокон была опробована технология сборки заготовки МСВ из индивидуальных преформ, содержащих сердцевину и оболочку из теллуритных стекол. Грани исходных круглых преформ были сошлифованы, отполированы и собраны внутри опорной трубки из теллуритного стекла; далее из сборки вытягивалось волокно. В изготовленных волокнах наблюдается распространение различных супермод при запитывании всех сердцевин. Кроме того, при запитывании одной сердцевины фемтосекундными импульсами на длине волны 1.56 мкм наблюдались различные режимы переключения излучения между сердцевинами, возникающие из-за изменения нелинейного вклада в постоянную распространения при повышении энергии от 0.01 нДж до 0.5 нДж.

Таким образом, многосердцевинные волокна с взаимодействующими сердцевинами из высоконелинейных материалов перспективны для управления ультракороткими импульсами, в частности, для широкополосной перестройки длины волны, уменьшения длительности, создания пороговых устройств и оптических переключателей.

Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-12-00248.

Литература

- [1] A. A. Balakin, S. A. Skobelev et al., *Phys. Rev. A* **98**, 043857 (2018)
- [2] A. A. Balakin, S. A. Skobelev et al., *Opt. Lett.* **46**, 246-249 (2021)
- [3] S. A. Skobelev, A. A. Balakin et al., *Phys. Rev. A* **104**, 033518 (2021)
- [4] A. A. Balakin, S. A. Skobelev et al., *Opt. Lett.* **49**, 1500-1503 (2024)