

УДК 681.7.068/.069

**С.А. Филатова^{1,2}, В.А. Камынин^{2,3},
И.В. Жлуктова^{1,4}, В.Б. Цветков^{1,5}**

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

² Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН, Пермь, Россия

⁴ Московский технологический университет (МГУПИ), Москва, Россия

⁵ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

УСИЛЕНИЕ ПИКОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДВУХМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА

В данной работе был усилен слабый сигнал импульсного гольмиевого волоконного лазера с длиной волны излучения 2065 нм. Длительность импульсов не превышала 52 пс. Задающий сигнал, мощность которого составила 0,073 мВт, усилили до 45 мВт, что соответствует коэффициенту усиления 28 дБ. Форма усиленного спектра остается неизменной до значения коэффициента усиления 22,3 дБ, далее наблюдалась деформация усиленного спектра. Средняя мощность на выходе усилителя до спектральной деформации составила 12,5 мВт.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, импульсный волоконный лазер, усиление пикосекундных импульсов, синхронизация мод, волоконный усилитель, гольмиевый усилитель, двухмикронное излучение.

**S.A. Filatova^{1,2}, V.A. Kamynin^{2,3},
I.V. Zhluktova^{1,4}, V.B. Tsvetkov^{1,5}**

¹ General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

³ Photonics Laboratory of Perm Scientific Center, The Ural Branch of the
Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

⁴ Moscow Technological University, Moscow, Russian Federation

⁵ National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russian Federation

AMPLIFICATION OF PICOSECONDS PULSES OF TWO MICRONS SPECTRAL RANGE

A weak signal of pulsed holmium doped fiber laser was amplified in this work. Wavelength of radiation was 2065 nm. The pulse duration is less than 52 ps. Master oscillator signal was amplified from 0,073 mW to 45 mW, what corresponds to the gain of 28 dB. Shape of the gain spectrum is

Статья подготовлена по материалам доклада на Российском семинаре по волоконным лазерам – 2016.

unchanged up to the value of gain of 22,3 dB, then deformation of the gain spectrum is observed. The average power of amplifier was 12,5 mW before spectral deformation.

Keywords: holmium doped fiber laser, pulsed fiber laser, fiber amplifier, amplification of picoseconds pulses, mode-locking, holmium amplifier, 2 microns radiation.

В последние несколько лет наблюдается интерес к источникам импульсного лазерного излучения, работающим в двухмикронном спектральном диапазоне, особенно к гольмиевым волоконным источникам излучения и усилителям. Это обусловлено обширной областью их возможного технологического и научного применения (например, в медицине, обработке материалов, волоконно-оптической и беспроводной связи, зондировании и т.д.) [1]. На данный момент разработаны различные гольмиевые волоконные лазеры в спектральном диапазоне от 2020 [2, 3] до 2210 нм [4, 5], а также источники излучения с возможной спектральной перестройкой [6, 7], работающие как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Наличие такого разнообразия гольмиевых волоконных лазеров подтверждает возможность и необходимость создания эффективных гольмиевых волоконных усилителей. В работе [8] представлен подробный обзор современного состояния источников лазерного излучения на основе гольмиевых волокон.

Первый гольмиевый волоконный усилитель был создан на длине волны 2100 нм [9]. Накачка усилителя производилась иттербиевым волоконным лазером на длине волны 1125 нм, а выходная мощность составила 1,65 Вт при входном сигнале 35 мВт. Кроме того, был разработан ряд гольмиевых волоконных усилителей в диапазоне 2030–2150 нм с диодной накачкой на различных длинах волн (1150, 1950, 2008 нм) [10]. Не так давно были продемонстрированы Ho:YAG и Ho:YLF системы усиления, генерирующие пикосекундные и субпикосекундные импульсы [11, 12] с энергией порядка миллиджоулей, но они основаны на сложных схемах задающих источников, таких как лазеры с рамановским сдвигом или параметрические усилители, и не отличаются компактностью и легкостью конструкции.

В данной работе представлены результаты экспериментов по усилению слабого импульсного сигнала полностью волоконного гольмиевого лазера, исследованы спектры выходного излучения и показана динамика деформации их формы в зависимости от коэффициента усиления.

Схема экспериментальной установки, представленная на рис. 1, состоит из задающего генератора и волоконного усилителя. Задающий генератор представляет собой полностью волоконный гольмиевый лазер,

работающий в режиме синхронизации мод. Режим синхронизации мод обеспечивается нелинейным вращением поляризации. Резонатор кольцевого лазера, длина которого около 24 м, состоит из активного гольмиевого волокна ($\approx 4,5$ м) и одномодового волокна Corning SM-332 (≈ 20 м). Активное волокно изготовлено по MCVD-технологии, разница в индексах показателей преломления между сердцевиной и оболочкой равна 0,01. Концентрация ионов гольмия в волокне составила около $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, значение длины волны отсечки для гольмиевого волокна – примерно 2000 нм, диаметр сердцевины волокна – 10 мкм. Накачка гольмиевого лазера осуществлялась иттербиевым волоконным лазером с длиной волны излучения 1125 нм. Непрерывное излучение от иттербиевого лазера поступает в кольцевой резонатор гольмиевого лазера через волоконный оптический мультиплексор (WDM 1125/2100). В схеме использован волоконный поляризатор (OP) для получения режима синхронизации мод, а два контроллера поляризации использовались (PC) для настройки импульсного режима. Одномодовый волоконный ответвитель 50/50 использовался для вывода импульсного излучения в усилитель. Поскольку обычные кварцевые волокна обладают аномальной дисперсией (около $-10^{-5} \text{ фс}^2/\text{нм}$) в двухмикронной области спектрального диапазона, мы предполагаем, что групповая скорость дисперсии используемого нами гольмиевого волокна также отрицательна. В данной работе не были использованы какие-либо волокна или элементы, компенсирующие отрицательную дисперсию резонатора.

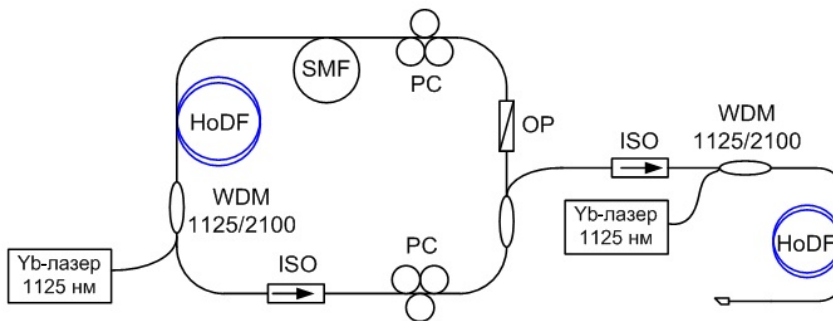


Рис. 1. Экспериментальная установка: ISO – волоконный оптический изолятор; WDM – волоконный оптический мультиплексор; PC – волоконный контроллер поляризации; HoDF – оптическое волокно, легированное ионами гольмия; SMF – одномодовое волокно; OP – волоконный поляризатор; CP – волоконный ответвитель

На рис. 2, *а* представлен выходной спектр гольмиевого волоконного лазера. Как видно, основной пик лазерной генерации приходится на длину волны 2065 нм. На рис. 2, *б* представлена осциллограмма частоты следования импульсов, которая составила 7,5 МГц.

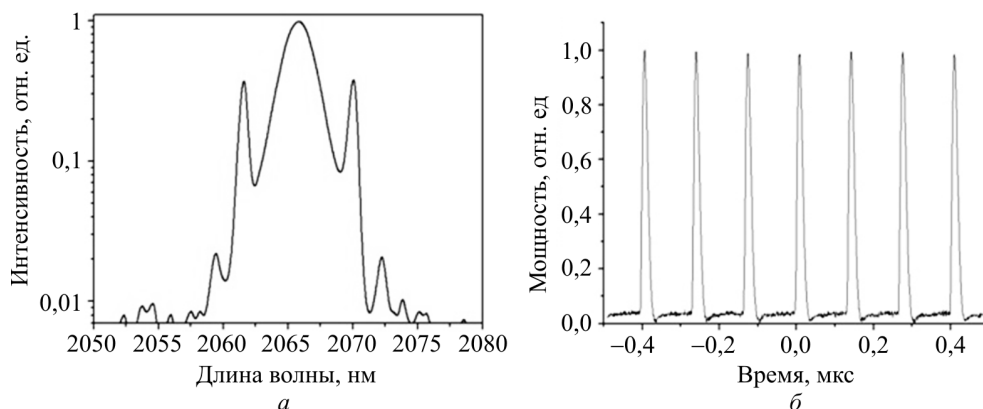


Рис. 2. Выходные характеристики лазера: *а* – выходной спектр лазерного излучения; *б* – осциллограмма частоты следования импульсов

Исходя из ширины выходного спектра на полувысоте, минимально возможная длительность импульса может быть равна $\approx 1,2$ пс. Согласно измерениям, сделанным с помощью 10-гигагерцевого фотодиода и 16-гигагерцевого осциллографа, длительность импульса не превышает 52 пс (рис. 3). Выходная мощность лазера составила 1 мВт, но для проведения экспериментов с усилением средняя мощность излучения задающего генератора была понижена до 73 мкВт. Для подавления генерации в объеме усилителя перед мультиплексором, объединяющим излучение иттербиевой накачки и усиливаемые импульсы, был установлен волоконный изолятор с коэффициентом изоляции 30 дБ и потерями на прямое прохождение, не превышающими 0,6 дБ.

Волоконный усилитель был реализован на том же активном волокне, что и резонатор задающего гольмиевого импульсного лазера. Активное волокно усилителя возбуждалось излучением иттербиевого лазера, работающего в непрерывном режиме на длине волны 1125 нм. Максимальное значение средней мощности усиленного сигнала составило 45 мВт при исходной мощности сигнала 0,073 мВт, что соответствует коэффициенту усиления 28 дБ. На рис. 4 представлены графики зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от мощности накачки иттербиевого лазера.

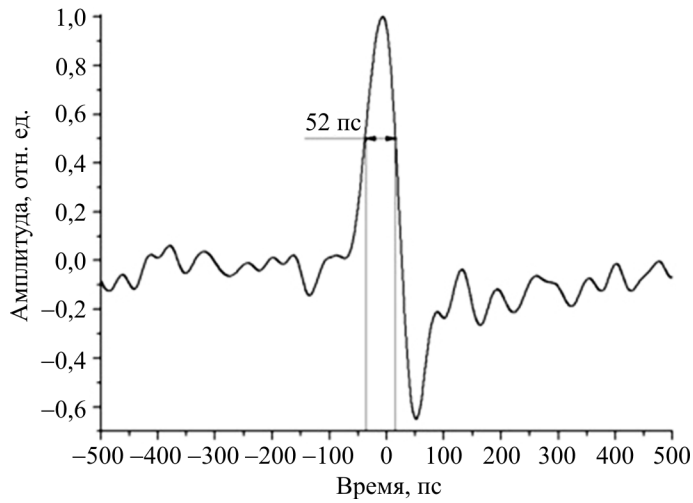


Рис. 3. Длительность импульса, измеренная 10-гигагерцевым фотодиодом

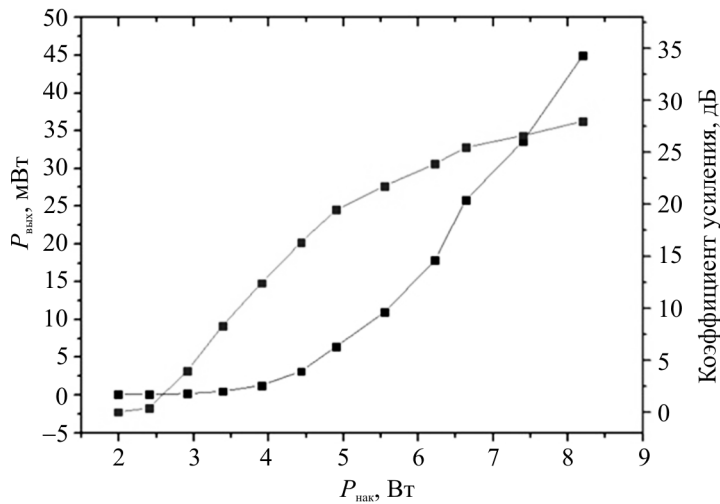


Рис. 4. Графики зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от мощности накачки иттербиевого лазера

Стоит отметить, что форма выходного спектра усиленного излучения изменялась в процессе усиления. Форма выходного спектра не менялась до значения коэффициента усиления 22,3 дБ, что соответствует значению средней выходной мощности 12,5 мВт, а затем наблюдался спектральный распад. При больших значениях коэффициента усиления выходной спектр заметно деформируется в связи с совместным действием отрицательной дисперсии групповых скоростей и не-

линейных эффектов. Для наблюдения динамики спектрального распада на рис. 5 представлен ряд спектров выходного усиленного сигнала при различных значениях коэффициента усиления.

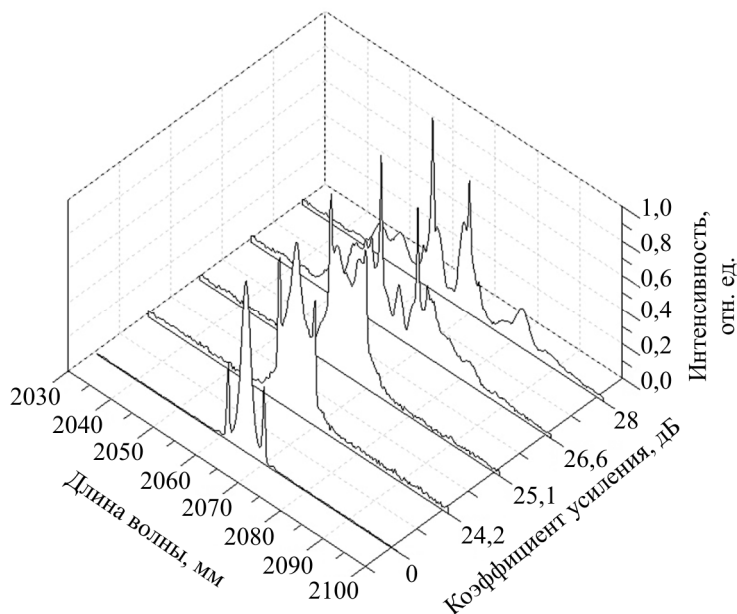


Рис. 5. Спектры выходного усиленного сигнала при различных значениях коэффициента усиления

Таким образом, в данной работе был усилен слабый сигнал полностью волоконного гольмиевого лазера, работающего в режиме генерации импульсов длительностью менее 52 пс. Максимальная полученная средняя мощность составила 45 мВт при начальной средней выходной мощности 0,073 мВт. Максимальный коэффициент усиления составил 28 дБ. Показано, что в процессе усиления происходит деформация выходного спектра при значениях коэффициента усиления, больших 22,3 дБ. Средняя мощность на выходе усилителя до момента спектрального распада составила 12,5 мВт.

Работа выполнена при поддержке Российской академии наук в рамках программы фундаментальных исследований «Основные и прикладные проблемы фотоники и науки о новых оптических материалах» и Министерства образования и науки РФ (проект № 14.Z50.31.0015).

Список литературы

1. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber / A.S. Kurkov [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2009. – Vol. 6, № 9. – P. 661–664.
2. Dissipative dispersion-managed soliton 2 μm thulium/holmium fiber laser / R. Gumenyuk [et al.] // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, № 5. – P. 609–611.
3. Holmium fibre laser emitting at 2,21 μm / S.O. Antipov [et al.] // *Quantum Electronics*. – 2013. – Vol. 43, № 7. – P. 603.
4. High-repetition-rate Q-switched holmium fiber laser / A.Y. Chamorovskiy [et al.] // *IEEE Photonics Journal*. – 2012. – Vol. 4, № 3. – P. 679–683.
5. All-fiber Ho-doped laser tunable in the range of 2,045–2,1 μm / V.A. Kamynin [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2012. – Vol. 9, № 12. – P. 893.
6. Tunable Ho-doped soliton fiber laser mode-locked by carbon nanotube saturable absorber / A.Y. Chamorovskiy [et al.] // *Laser Physics Letters*. – 2012. – Vol. 9, № 8. – P. 602.
7. A review of recent progress in holmium-doped silica fibre sources / A. Hemming [et al.] // *Optical Fiber Technology*. – 2014. – Vol. 20, № 6. – P. 621–630.
8. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2,1 μm // *Laser Physics Letters*. – 2013. – Vol. 10, № 12. – P. 125106.
9. High gain holmium-doped fibre amplifiers / N. Simakov [et al.] // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24, № 13. – P. 13946–13956.
10. 1,2 mJ, 1 kHz, ps-pulses at 2,05 μm from a Ho:fibre/Ho:YLF laser / K. Murari, H. Cankaya, P. Li, A. Ruehl, I. Hartl, F.X. Kartner // *Europhoton Conference*. – 2014. – Paper ThD-T1-O-05.
11. High energy and average power femtosecond laser for driving mid-infrared optical parametric amplifiers / P. Malevich [et al.] // *Optics Letters*. – 2013. – Vol. 38, № 15. – P. 2746–2749.

References

1. Kurkov A.S. [et al.]. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber. *Laser Physics Letters*, 2009, vol. 6, no. 9, pp. 661-664.
2. Gumenyuk R. [et al.]. Dissipative dispersion-managed soliton 2 μm thulium/holmium fiber laser. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, no. 5, pp. 609-611.

3. Antipov S.O. [et al.]. Holmium fibre laser emitting at 2,21 μm . *Quantum Electronics*, 2013, vol. 43, no. 7, p. 603.
4. Chamorovskiy A.Y. [et al.]. High-repetition-rate Q-switched holmium fiber laser. *IEEE Photonics Journal*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 679-683.
5. Kamynin V.A. [et al.]. All-fiber Ho-doped laser tunable in the range of 2,045–2,1 μm . *Laser Physics Letters*, 2012, vol. 9, no. 12, p. 893.
6. Chamorovskiy A.Y. [et al.]. Tunable Ho-doped soliton fiber laser mode-locked by carbon nanotube saturable absorber. *Laser Physics Letters*, 2012, vol. 9, no. 8, p. 602.
7. Hemming A. [et al.]. A review of recent progress in holmium-doped silica fibre sources. *Optical Fiber Technology*, 2014, vol. 20, no. 6, pp. 621-630.
8. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2,1 μm . *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10, no. 12, p. 125106.
9. Simakov N. [et al.]. High gain holmium-doped fibre amplifiers. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 13, pp. 13946-13956.
10. Murari K., Cankaya H., Li P., Ruehl A., Hartl I., Kartner F.X. 1,2 mJ, 1 kHz, ps-pulses at 2,05 μm from a Ho:fibre/Ho:YLF laser. *Europhoton Conference*, 2014, paper ThD-T1-O-05.
11. Malevich P. [et al.]. High energy and average power femtosecond laser for driving mid-infrared optical parametric amplifiers. *Optics Letters*, 2013, vol. 38, no. 15, pp. 2746-2749.

Получено 20.09.2016