

УДК 621.373.8, 621.375

**И.В. Жлуктова<sup>1, 2</sup>, Н.Ю. Титаренко<sup>3</sup>, А.А. Тавлеев<sup>3</sup>,  
В.А. Камынин<sup>2</sup>, В.Б. Цветков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Московский технологический университет (МГУПИ), Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГОЛЬМИЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 2016 НМ**

Рассмотрена сфера применения двухмикронного волоконного усилителя. Изложен обзор тематических статей исследований предыдущих научных групп. Представлены результаты работы волоконно-оптического усилителя, легированного ионами гольмия. Для изучения характеристик гольмиевого усилителя была собрана экспериментальная установка. В качестве накачки активной среды усилителя использовался иттербиевый лазер. Приведены спектры излучения, вычислены максимальные коэффициенты усиления. По результатам деятельности научной лаборатории по данной теме была построена оптимизационная кривая для разных длин активного волокна, была установлена зависимость выходной мощности от мощности накачки. В ходе исследования использовались разные уровни задающего сигнала. В итоге была подобрана длина активного волокна усилителя, позволяющая получить максимальную выходную мощность. Таким образом, по сравнению с предыдущими результатами и другими публикациями в данной области было получено усиление слабого непрерывного сигнала в области спектра до 2020 нм.

**Ключевые слова:** гольмиевый волоконный усилитель, активное волокно, усиление слабого сигнала, иттербиевая накачка, гольмий, иттербий, волоконные лазеры, волокна, легированные редкоземельными элементами.

**I.V. Zhluktova<sup>1, 2</sup>, N.Iu. Titarenko<sup>3</sup>, A.A. Tavleev<sup>3</sup>,  
V.A. Kamynin<sup>2</sup>, V.B. Tsvetkov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Moscow Technological University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russian Federation

## **OPTIMIZATION OF A FIBER OPTIC HO-DOPED AMPLIFIER OPERATING AT A WAVE LENGTH OF 2016 NM**

In this paper, the scope of application of a two-micron fiber amplifier is examined. The review of thematic research articles of previous scientific groups is presented. The results of the work of a fiber-optic amplifier doped with holmium ions are presented. To study the characteristics of the holmium amplifier, an experimental setup was assembled. As the pumping of the active medium of the amplifier,

an ytterbium laser was used. Radiation spectra are given, the maximum amplification factors are calculated. Based on the results of the scientific laboratory on this topic, an optimization curve was constructed for different lengths of the active fiber. The dependence of the output power on the pump power was established. During the study, different levels of the reference signal were used. At the end, the length of the active fiber of the amplifier was chosen, which allows obtaining the maximum output power. Thus, in comparison with the previous results and other publications in the field, an amplification of a weak continuous signal in the spectral region of 2020 nm was obtained.

**Keywords:** holmium fiber amplifier, active fiber, amplification of the small signal, ytterbium pumping, holmium, ytterbium, fiber lasers, fibers doped with rare earth elements.

В последние годы большое внимание уделяется волоконным усилителям диапазона 2 мкм. Этот интерес вызван их потенциальным применением в таких областях, как медицина, спектроскопия и перспективные телекоммуникационные разработки. Для реализации оптических схем, работающих в этом диапазоне, необходимы усилители, основанные на таких редкоземельных элементах, как тулий или гольмий. Тулиевые волоконные усилители продемонстрировали высокий коэффициент усиления и низкий уровень шум-фактора при работе в спектральном диапазоне от 1720 до 2050 нм [1]. Однако для расширения диапазона 2 мкм, а именно для получения генерации на длинах волн больше 2100 нм, интерес представляют волокна, легированные ионами гольмия. Область люминесценции ионов гольмия лежит в диапазоне 1900–2200 нм, поэтому использование гольмиевых волокон в оптических схемах усилителей и исследование их характеристик являются актуальными задачами [2–4]. Первый гольмиевый волоконный усилитель на длине волны 2100 нм был представлен в работе [5]. Усилитель накачивался от иттербиевого волоконного лазера, была достигнута выходная мощность 1,65 Вт при входной мощности, равной 35 мВт. Ранее в статье [6] было представлено эффективное усиление модулированного слабого сигнала для диапазона длин волн 2020–2120 нм. В данной статье представлены результаты работы волоконно-оптического усилителя, легированного ионами гольмия, работающего на длине волны 2016 нм. Приведены спектры излучения, рассчитаны максимальные коэффициенты усиления, и построена оптимизационная кривая для разных длин активного волокна.

Для исследования характеристик гольмиевого усилителя была собрана экспериментальная установка (рис. 1). В качестве задающего источника был использован непрерывный гольмиевый лазер, излучающий на длине волны 2016 нм. Накачка задающего источника осуществлялась иттербиевым волоконным лазером на длине волны

1125 нм. Сам иттербиевый лазер состоял из двух диодов накачки с длиной волны 975 нм, иттербиевого волокна длиной 30 м и двух решеток Брэгга (1125 нм). Решетки использовались как зеркала, поэтому одна из них имела высокий коэффициент отражения, а другая – равный 30 %. Для накачки усилителя использовался второй идентичный иттербиевый лазер с максимальной выходной мощностью 7,32 Вт.

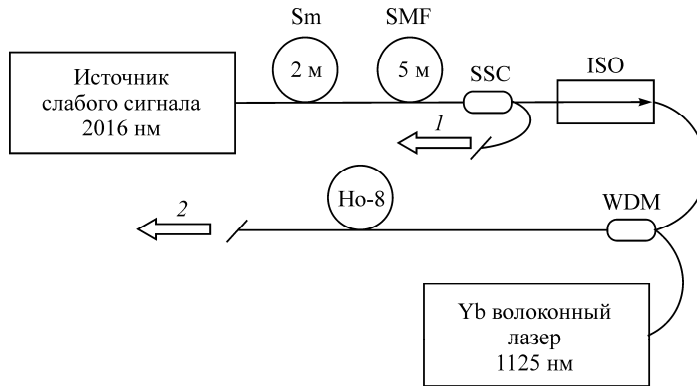


Рис. 1. Оптическая схема гольмиевого усилителя

В данном исследовании для ослабления задающего сигнала было использовано SMF-волокно длиной 5 м, скрученное в кольца диаметром 5 см. В схему также был добавлен разветвитель (SSC), с одного из выходов *1* которого производился постоянный контроль мощности и выходного спектра. Для предотвращения распространения обратного сигнала был использован изолятор (ISO) с потерями в пределах 0,6 дБ, помещенный перед мультиплексором (WDM) 1125/2100 нм, который объединял непрерывный сигнал от задающего лазера и излучение иттербиевого лазера накачки, работающего на длине волны 1125 нм. Для отсечения остаточного излучения накачки источника слабого сигнала использовалось  $\text{Sm}^{3+}$ -волокно длиной 2 м.

В качестве активной среды усилителя в работе применялось гольмиевое волокно, разработанное в Пермской научно-производственной приборостроительной компании (ПНППК). Диаметр сердцевины активного волокна составлял 10 мкм с концентрацией активной примеси  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Для получения значения коэффициента усиления была измерена выходная мощность в зависимости от мощности лазера накачки для

различных длин активных волокон. Это позволило нам для каждой мощности задающего сигнала выбрать оптимальную длину волокна. На рис. 2 представлен график зависимости максимальных коэффициентов усиления при заданном уровне сигнала от длины активного волокна усилителя. Для подавления непоглощенной накачки от иттербиевого волоконного лазера использовался оптический фильтр с пропусканием 1,5–2,5 мкм.

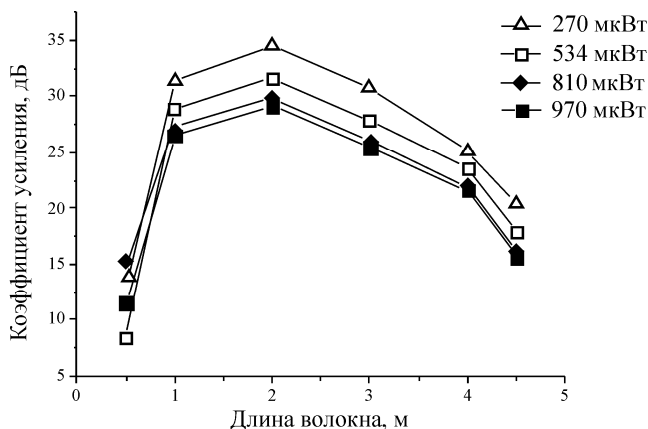


Рис. 2. График зависимости коэффициента усиления от длины активного волокна для длины волны 2016 нм

Как видно на рис. 2, максимальный коэффициент усиления составил 34,5 дБ при максимальной усиленной выходной мощности 766 мВт для длины активного волокна 2 м с задающим слабым сигналом 270 мкВт (график зависимости представлен на рис. 3). Минимальный коэффициент усиления составил 11 дБ при выходной мощности 36 мВт. Пороговое значение накачки составляет 100 мВт. По графику зависимости выходной мощности от мощности накачки видно, что усилитель работает в линейном режиме.

Спектр на выходе из усилителя для длины волокна 2 м представлен на рис. 4, а. На рис. 4, б изображен спектр усиленного сигнала при длине активного волокна, равного 6 м. На рис. 4 видно, что усиленное спонтанное излучение (УСИ) присутствует на обоих спектрах усиленного сигнала, с подавлением более 20 дБ в случае длины активного волокна 2 м. При увеличении длины активного волокна усилителя УСИ начинает преобладать над сигналом. Причиной этого является перепо-

глошение ионами гольмия коротковолновой части спектра. Таким образом, по сравнению с предыдущими результатами группы [6, 7] и другими публикациями в данной области [8, 9] было получено усиление слабого непрерывного сигнала в области спектра до 2020 нм.

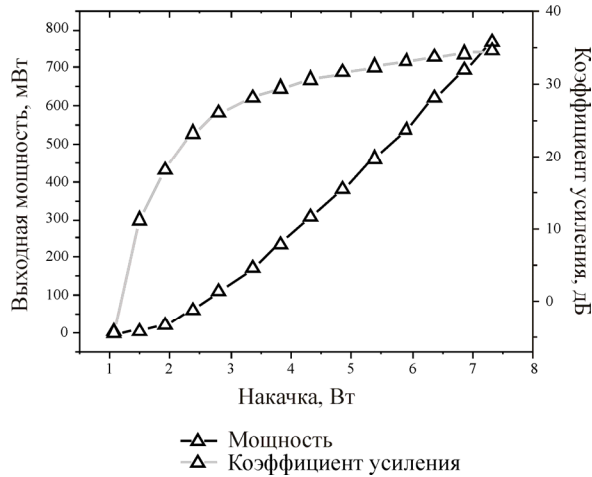


Рис. 3. График зависимости выходной мощности от мощности накачки и коэффициент усиления от накачки для длины активного волокна 2 м

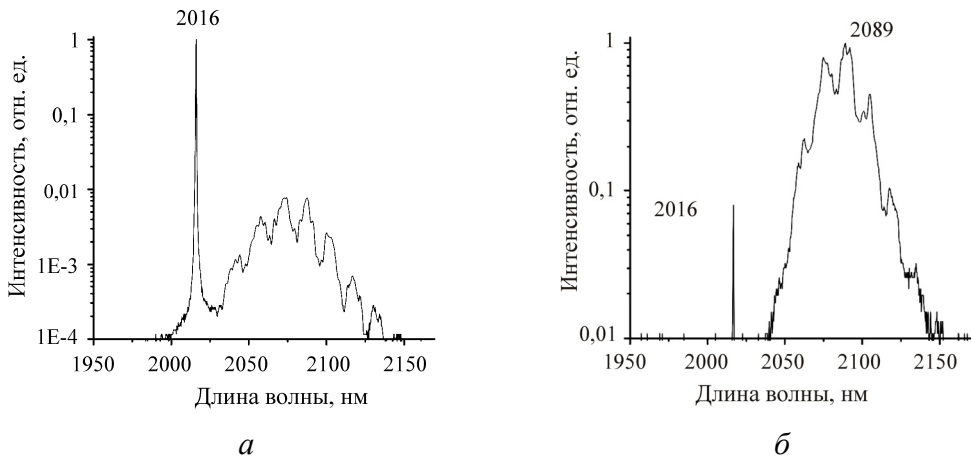


Рис. 4. Спектры усиления: *а* – при длине активного волокна 2 м; *б* – при длине активного волокна 6 м

Таким образом, в данной работе продемонстрировано усиление слабого сигнала для длины волны 2016 нм в гольмиевом волоконном усилителе с накачкой от иттербиевого волоконного лазера с длиной волны излучения 1125 нм. Длина активного волокна усилителя была оптимизирована для нескольких уровней задающего сигнала в диапазоне от 270 до 970 мкВт. Максимальное значение коэффициента усиления получено при длине активного волокна 2 м и составляет 34,5 дБ. Выходная мощность равна 766 мВт при уровне задающего сигнала 270 мкВт.

### Список литературы

1. High power diode-seeded fiber amplifiers at 2  $\mu\text{m}$  – from architectures to applications / A.M. Heidt [et al.] // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2014. – № 20. – P. 3100612.
2. Jackson S.D. Midinfrared holmium fiber lasers // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2006. – № 42. – P. 187–191.
3. Ho-doped silica fiber laser in-band pumped by a Tm-doped fiber laser / J. Kim [et al.] // *CLEO/Europe and EQEC 2009.* – URL: <http://2009.cleoeurope.org> (дата обращения: 20.01.2017).
4. All-fiber 10 W holmium lasers pumped at  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$  / A.S. Kurkov [et al.] // *Opt. Lett.* – 2010. – № 35. – P. 490–492.
5. Antipov S.O., Kurkov A.S. A holmium-doped fiber amplifier at 2.1  $\mu\text{m}$  // *Laser Physics Letters.* – 2013. – № 10. – P. 125106.
6. Gain spectrum of the Ho-doped fiber amplifier / S.A. Filatova, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov, O.I. Medvedkov, A.S. Kurkov // *Laser Physics Letters.* – 2015. – № 12 (9). – P. 095105.
7. Усиление пикосекундных импульсов двухмикронного диапазона / С.А. Филатова, В.А. Камынин, И.В. Жлуктова, В.Б. Цветков // *Прикладная фотоника.* – 2016. – № 3. – С. 301–308.
8. High gain holmium-doped fibre amplifiers / N. Simakov, Zh. Li, Y. Jung, J.M.O. Daniel, Pr. Barua, P.C. Shardlow, S. Liang, J.K. Sahu, A. Hemming, W.A. Clarkson, Sh. Alam, D.J. Richardson / *Optical Society of America.* – 2016.
9. Holmium doped fiber amplifier for optical communications at 2.05–2.13  $\mu\text{m}$  / N. Simakov, Z. Li, S.U. Alam, P.C. Shardlow, J.M.O. Daniel, D. Jain, J.K. Sahu, A. Hemming, A. Clarksonand, D.J. Richardson // *Optical Fiber Communication Conference / Optical Society of America.* – Los Angeles, California, 2015. – P. Tu2C.6.

## References

1. A.M. Heidt et al. "High power diode-seeded fiber amplifiers at 2  $\mu\text{m}$  – from architecture to applications," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20, 3100612 (2014).
2. S.D. Jackson, "Midinfrared holmium fiber lasers," IEEE J. Quantum Electron., 42, 187-191 (2006)
3. J. Kim et al. "Ho-doped silica fiber laser in-band pumped by a Tm-doped fiber laser," in CLEO/Europe and EQEC (2009), available at: <http://2009.cleoeurope.org> (accessed 20 January 2017).
4. A.S. Kurkov et al. "All-fiber 10 W holmium lasers pumped at  $\lambda = 1.15 \mu\text{m}$ ," Opt. Lett., 35, 490- 492 (2010).
5. S.O. Antipov, A.S. Kurkov. "A holmium-doped fiber amplifier at 2.1  $\mu\text{m}$ ," Laser Physics Letters 10 125106 (2013).
6. S.A. Filatova, V.A. Kamynin, V.B. Tsvetkov, O.I. Medvedkov, A.S. Kurkov "Gain spectrum of the Ho-doped fiber amplifier" Article in Laser Physics Letters 12(9):095105 · September 2015.
7. Filatova S.A., Kamynin V.A., Zhluktova I.V., Cvetkov V.B. "Usilenie pikosekundnyh impul'sov dvuhmikronnogo diapazona". Prikladnaja fotonika, 2016, № 3, s. 301-308.
8. Nikita Simakov, Zhihong Li, Yongmin Jung, J.M.O. Daniel, Pranabesh Barua, Peter C. Shardlow, Sijing Liang, Jayanta K. Sahu, Alexander Hemming, W. Andrew Clarkson, Shaif-Ul-Alam, and David J. Richardson., "High gain holmium-doped fibre amplifiers", 2016 Optical Society of America.
9. N. Simakov, Z. Li, S.U. Alam, P.C. Shardlow, J.M.O. Daniel, D. Jain, J. K. Sahu, A. Hemming, A. Clarkson and, D.J. Richardson, "Holmium Doped Fiber Amplifier for Optical Communications at 2.05-2.13  $\mu\text{m}$ ," in Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, Los Angeles, California, 2015), p. Tu2C.6.

Получено 22.03.2017