

УДК 615.849.19

В.М. Парамонов¹, А.С. Курков^{2, 3, 4}¹ Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия² Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН, Пермь, Россия⁴ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ЭРБИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА

Реализован эрбиевый волоконный импульсный источник на основе задающего генератора и усилительного каскада. Задающим генератором является кольцевой эрбиевый лазер, работающий в режиме модуляции добротности, обеспеченном применением электрооптического модулятора. Усилительный каскад использует эрбиевое волокно с накачкой в сердцевину. Энергия выходного импульса составила около 50 мкДж, пиковая мощность – 350 Вт.

Ключевые слова: волоконный лазер, модуляция добротности, волоконный усилитель.

V.M. Paramonov¹, A.S. Kurkov^{2,3,4}¹ Fiber Optics Research Center of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation² General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation³ Photonics Laboratory of Perm Scientific Center of Ural Branch of Russian
Academy of Sciences, Perm, Russian Federation⁴ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ER-DOPED PULSED FIBER SOURCE BASED ON THE ELECTROOPTICAL MODULATOR

We have realized Er-doped pulsed fiber source based on the MOPA scheme. Q-switched ring laser using Mach-Zander electrooptical modulator was applied as a master oscillator. Amplifier was based on the Er-doped fiber pumped into the core. Output pulse energy was of 0,03 mJ, peak power – 350 W.

Keywords: Fiber laser, Q-modulation, Fiber amplifiers.

Введение

В настоящее время широко исследуются и находят применение компактные эффективные волоконные лазеры с различными спектральными и динамическими характеристиками. Среди импульсных

волоконных лазеров наиболее высокая энергия импульсов достигается в случае использования режима модуляции добротности. Такие лазеры могут использоваться для обработки материалов, в медицине, а также для лазерных дальномеров, обнаружителей препятствий и пр. В последнем случае длина волны излучения лазера должна быть безопасной для зрения.

Для получения режима модуляции добротности используются пассивный и активный методы. При пассивном методе применяются насыщающиеся поглотители, пропускающие излучение при достижении определенной мощности в резонаторе. В волоконных лазерах в качестве насыщающихся поглотителей могут использоваться оптические волокна, легированные ионами с полосой поглощения в спектральной области излучения лазера [1], углеродные нанотрубки [2], графен [3], полупроводниковые насыщающиеся поглотители SESAM [4]. К пассивной также относится модуляция добротности за счет ион-ионного взаимодействия в волокнах с высокой концентрацией активной примеси [5, 6]. Основным недостатком пассивной модуляции добротности является слабая контролируемость таких параметров генерации, как частота повторения и длительность импульсов. Если для обработки материалов это не столь важно, то для оптической локации именно эти параметры определяют пространственное разрешение и дальность обнаружения в случае достаточной энергии импульса.

Для активной модуляции добротности наибольшее распространение получили акусто-оптические модуляторы [7], а также электрооптические модуляторы [8]. В этом случае частота повторения определяется задающим генератором, а длительность импульса – длительностью задающего электрического импульса и параметрами резонатора. Применение электрооптических модуляторов ограничивается относительно невысокой лучевой стойкостью данных компонентов. Для устранения указанного ограничения может использоваться так называемого МОРА-схема. Данный подход предполагает реализацию задающего импульсного источника невысокой мощности и применение дополнительных усилительных каскадов для увеличения энергии импульсов.

Целями данной работы являлись исследование и реализация волоконного источника, основанного на лазере с модуляцией добротности и одного усилительного каскада. В качестве управляющего элемента для получения импульсного режима использовался электрооп-

тический модулятор. В качестве активной среды лазера и усилителя применялось активное волокно, легированное ионами эрбия, что позволяло получать излучение в области 1,55 мкм, что соответствует спектральному диапазону безопасному для зрения.

1. Схема эксперимента

На рис. 1 представлена схема реализованного волоконного источника. Собственно источник был собран по кольцевой схеме. В качестве источника накачки использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучений 1,48 мкм и мощностью около 50 мВт. Излучение накачки вводилось в резонатор при помощи спектрально селективного мультиплексора (WDM). В качестве активного элемента лазера использовалось волокно, легированное ионами эрбия с концентрацией около $7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Длина активного волокна составила 2,7 м. В схему лазера был включен электрооптический модулятор, на который подавались сигналы с генератора. Для обеспечения однонаправленности кольцевой схемы использовался оптический изолятор. Вывод излучения из кольцевого резонатора осуществлялся через ответвитель, причем на выход поступало 20 % от общей мощности резонатора. Выходное излучение от задающего генератора через оптический изолятор поступало на вход усилительного каскада. В усилителе использовалось то же активное волокно длиной 4,5 м. В качестве накачки использовался полупроводни-

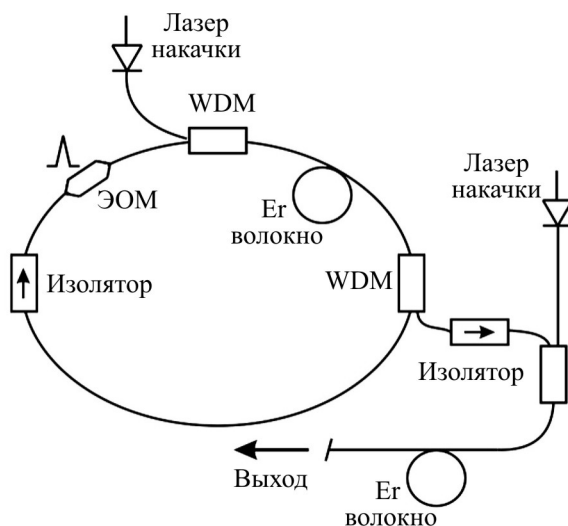


Рис. 1. Схема волоконного источника

ковый лазер с длиной волны излучений 1,48 мкм и максимальной мощностью 150 мВт. На выходе усилителя был установлен угловой разъем FC/PC для подавления отражения от выходного торца.

2. Результаты и обсуждение

При включении накачки и подаче сигнала с генератора на электрооптический модулятор наблюдалась генерация цуга импульсов с частотой 850 Гц, соответствующей частоте импульсов генератора (рис. 2). Длительность управляющего импульса составила около 300 нс.

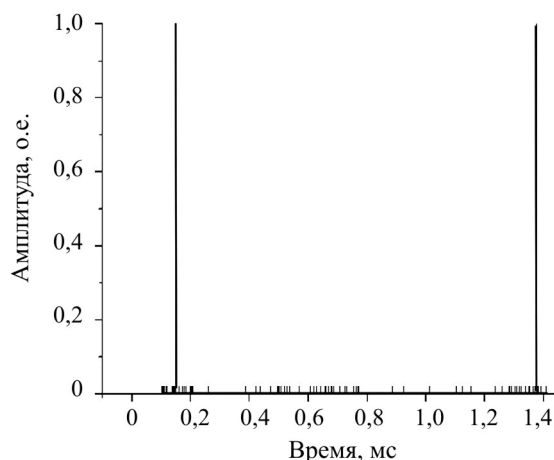


Рис. 2. Последовательность генерируемых импульсов

Средняя мощность генерации составила 0,37 мВт. На рис. 3, а представлена форма отдельного импульса генерации. Длительность импульса по полувысоте амплитуды составила около 90 нс. Эта величина определяется временем формирования импульса за 2–3 прохода по кольцевому резонатору. Энергия импульса задающего лазера составила около 0,43 мкДж, пиковая мощность – 5 Вт.

На рис. 4 представлена зависимость средней мощности на выходе усилительного каскада от мощности накачки. Максимальная средняя мощность составила 40 мВт, дифференциальная эффективность – около 30 %. Энергия импульса может быть оценена в 50 мкДж.

Следует отметить, что в процессе усиления длительность импульса увеличилась до 130 нс, соответствующая форма выходного импульса показана на рис. 3, б. Причиной такого уширения может являться насыщение усиления в области максимальной пиковой мощности и, соответст-

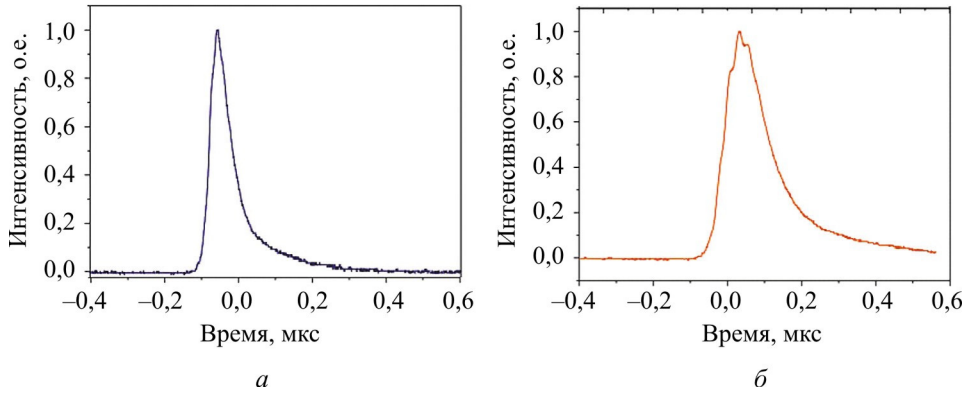


Рис. 3. Форма импульса с выхода задающего генератора (а) и усилительного каскада (б)

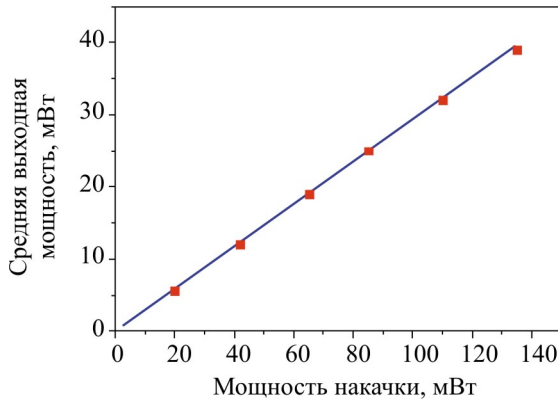


Рис. 4. Зависимость выходной средней мощности от мощности накачки

венно, большой коэффициент усиления на крыльях импульса. С учетом увеличения длительности импульса пиковая мощность может быть оценена в 350 Вт.

На рис. 5 представлены спектры выходного излучения задающего генератора, а также усилительного каскада для выходной средней мощности 25 мВт и 40 мВт. Как видно из рисунка, наблюдается уширение выходного спектра в стоксову область при увеличении выходной мощности, что свидетельствует о проявлении нелинейных эффектов при полунной выходной мощности.

Таким образом, можно утверждать, что, несмотря на достигнутые высокие значения энергии и пиковой мощности, возникают проблемы, связанные с увеличением длительности импульса и уширением его

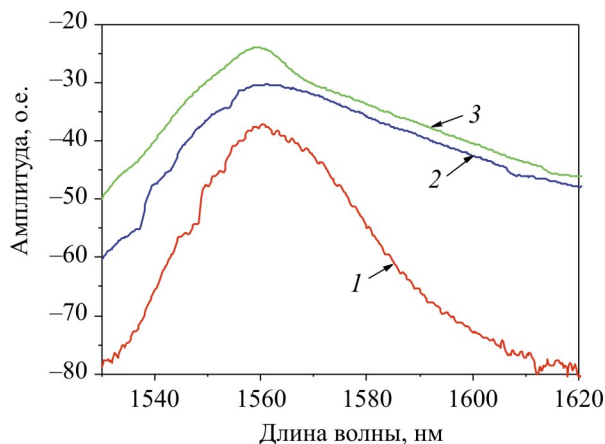


Рис. 5. Спектры выходного излучения задающего генератора (1) и усилительного каскада для выходной средней мощности 25 мВт (2) и 40 мВт (3)

спектра. Наблюдаемые эффекты могут ограничивать дальнейшее усиление импульсов. Решение указанных проблем, в первую очередь, требует уменьшения длины волокна, как в схеме задающего генератора, так и в схеме усилителя. Это может быть достигнуто за счет использования волокна с увеличенной концентрацией ионов эрбия. Кроме того, следует рассмотреть возможность использования в схеме усилителя активного волокна с увеличенным диаметром сердцевины, что повысить порог возникновения нелинейных эффектов.

Заключение

Реализован и исследован эрбиевый волоконный источник на основе задающего генератора и усилительного каскада. Задающим генератором является кольцевой эрбиевый лазер, работающий в режиме модуляции добротности, обеспеченном применением электрооптического модулятора. Достигнутая энергия импульса составила 50 мкДж, а пиковая мощность – 350 Вт. Обнаружено уширение импульса и его спектра в процессе усиления. Предложены способы устранения нежелательных эффектов.

Работа была поддержана грантом РФФИ 14-42-08001р_офи_м «Волоконные источники с высокой энергией для оптической локации и других применений».

Список литературы

1. Kurkov A.S. Q-switched all-fiber lasers with saturable absorbers // *Laser Physics Letters*. – 2011. – Vol. 8 (5). – P. 335.
2. High-repetition-rate Q-switched holmium fiber laser / A. Chamorovskiy, A.V. Marakulin, A.S. Kurkov, T. Leinonen, O.G. Okhotnikov // *IEEE Photonics Journal*. – 2012. – Vol. 4 (3). – P. 679–683.
3. Graphene-based, 50 nm wide-band tunable passively Q-switched fiber laser / W.J. Cao, H.Y. Wang, A.P. Luo, Z.C. Luo, W.C. Xu // *Laser Physics Letters*. – 2012. – Vol. 9 (1). – P. 54.
4. 11 mJ all-fiber-based actively Q-switched fiber master oscillator power amplifier / Q. Fang, Y. Qin, B. Wang, W. Shi // *Laser Physics Letters*. – 2013. – Vol. 10 (11). – P. 115103.
5. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers / F. Sanchez, P. Le Boudec, P.L. François, G. Stephan // *Physical Review A*. – 1993. – Vol. 48 (3). – P. 2220.
6. Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С. Импульсный гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,1 мкм для медицинского применения // *Прикладная фотоника*. – 2014. – № 1. – С. 130–139.
7. Pulsed regimes of erbium-doped fiber laser Q-switched using acousto-optical modulator / Y.O. Barmenkov, A.V. Kir'yanov, J.L. Cruz, M.V. Andres // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 20 (5). – P. 337–344.
8. Tm–Ho co-doped fiber-based high repetition rate passive Q-switching of an Er-doped fiber laser / M. Tao, X. Ye, Z. Wang, P. Yang, G. Feng // *Laser Physics Letters*. – 2014. – Vol. 11 (1). – P. 015103.

References

1. Kurkov A.S. Q-switched all-fiber lasers with saturable absorbers. *Laser Physics Letters*, 2011, vol. 8 (5), p. 335.
2. Chamorovskiy A., Marakulin A.V., Kurkov A.S., Leinonen T., Okhotnikov O.G. High-repetition-rate Q-switched holmium fiber laser. *IEEE Photonics Journal*, 2012, vol. 4 (3), pp. 679-683.
3. Cao W.J., Wang H.Y., Luo A.P., Luo Z.C., Xu W.C. Graphene-based, 50 nm wide-band tunable passively Q-switched fiber laser. *Laser Physics Letters*, 2012, vol. 9 (1), p. 54.

4. Fang Q., Qin Y., Wang B., Shi W. 11 mJ all-fiber-based actively Q-switched fiber master oscillator power amplifier. *Laser Physics Letters*, 2013, vol. 10 (11), p. 115103.

5. Sanchez F., Le Boudec P., François P.L., Stephan G. Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers. *Physical Review A*, 1993, vol. 48 (3), p. 2220.

6. Filatova S.A., Tsvetkov V.B., Kurkov A.S. Impul'snyi gol'mievyy volokonnyi lazer s dlinoi volny izlucheniia 2,1 mkm dlia meditsinskogo primeneniia [Ho fiber laser emitting at a wavelength of 2,1 microns for medical application]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 130-139.

7. Barmenkov Y.O., Kir'yanov A.V., Cruz J.L., Andres M.V. Pulsed regimes of erbium-doped fiber laser Q-switched using acousto-optical modulator. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, vol. 20 (5), pp. 337-344.

8. Tao M., Ye X., Wang Z., Yang P., Feng G. Tm–Ho co-doped fiber-based high repetition rate passive Q-switching of an Er-doped fiber laser. *Laser Physics Letters*, 2014, vol. 11 (1), p. 015103.

Получено 5.03.2015