

УДК 681.7.068/.069

В.Г. Воронин¹, В.А. Камынин^{2,3}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

² Институт общей физики РАН имени А.М. Прохорова, Москва, Россия

³ Лаборатория фотоники ПНЦ УрО РАН, Пермь, Россия

ПОЛНОСТЬЮ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРОМ МАХА-ЦАНДЕРА

Предложена и реализована схема активной модуляции добротности волоконного лазера. Особенностью схемы является использование в качестве затвора волоконного интерферометра Маха-Цандера. Получена генерация на длине волны 1080 нм с максимальной энергией импульса 10 мкДж. Длительность импульсов составляла от 1,3 до 1,7 мкс, частота следования – от 12 до 24 кГц.

Ключевые слова: волоконный лазер, модуляция добротности, интерферометр Маха-Цандера.

V.G. Voronin¹, V.A. Kamynin^{2,3}

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² General Physics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

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

ALL-FIBER LASER WITH INTRACAVITY MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER

We have proposed and realized a scheme of active Q-fiber laser. Feature of the scheme is to use as a switch fiber interferometer Mach-Zehnder. Lasing at a wavelength of 1080 nm with a maximum pulse energy of 10 μJ was measured. The pulse duration ranged from 1,3 to 1,7 μs, repetition frequency was of 12–24 kHz.

Keywords: fiber laser, Q-switching, Mach-Zehnder interferometer.

Введение

Способы получения модуляции добротности в волоконных лазерах претерпели существенные изменения. Вначале в качестве активных модуляторов использовались электрооптические и акустооптиче-

ские объемные элементы, в которые с помощью коллиматоров вводилось излучение [1–8]. Затем стали применяться интегральные акустооптические и электрооптические элементы с волоконным входом и выходом (см., например, [9]). В ряде случаев такие устройства называются полностью волоконными лазерными устройствами. С другой стороны, в последние годы появились действительно полностью волоконные лазеры с активной модуляцией добротности. К ним относится лазер, в котором модуляция добротности реализуется за счет переключения оптического разветвителя [10], а также лазеры с пассивной модуляцией добротности [11]. В работе [12] изменение добротности происходит за счет двулучепреломления, реализованного с помощью пьезокерамики. В ряду этих исследований находится и наша работа. Она продолжает направление реализации модуляции добротности с целью получения генерации гладких микросекундных импульсов в волоконном лазере [8].

1. Экспериментальная установка

Схема установки представлена на рис. 1. Основой установки является волоконный лазер с двойной оболочкой [13]. Используемый волоконный лазер с двойной оболочкой состоит из одномодовой сердцевины диаметром 5 мкм, легированной ионами Yb^{3+} с концентрацией $7,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, длиной 20 м.

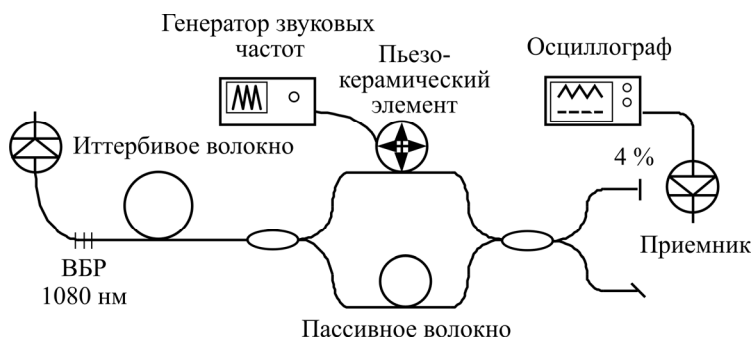


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для обеспечения эффективного поглощения излучения накачки активными ионами внутренняя оболочка имеет квадратный профиль. В этом случае траектория скользящих мод, распространяющихся по оболочке, проходит через сердцевину, в которой находятся активные ионы. Внутренняя оболочка квадратного сечения 120×120 мкм окру-

жена внешней круглой оболочкой и обеспечивает высокую эффективность ввода накачки.

Длина волны генерации иттербиевого волоконного лазера составляет 1080 нм. Для накачки лазера использован полупроводниковый лазерный диод с длиной волны излучения 972 нм. Излучение полупроводникового лазера вводилось в иттербиевое волокно через отрезок волокна, легированного ионами Sm^{3+} , и волоконную брегговскую решетку с коэффициентом отражения около 99 % на длине волны 1080 нм.

Отличительной особенностью установки является то, что между активным волокном лазера и выходным зеркалом, функцию которого выполняет прямой скол, обеспечивающий коэффициент отражения 4 %, помещен волоконный затвор, в качестве которого использован полностью волоконный интерферометр Маха-Цандера. Он состоит из двух волоконных разветвителей и двух плеч: активного и пассивного. Пассивное плечо – отрезок волокна длиной 5 м, активное состоит из такого же образца, намотанного на пьезокерамический цилиндр. На пьезоцилиндр подавалось синусоидальное напряжение от генератора с амплитудой в диапазоне от 0 до 35 В. Описанная установка работала следующим образом: накачка волоконного лазера производилась от полупроводникового лазера в непрерывном режиме. Генерация волоконного лазера в режиме активной модуляции добротности исследовалась с помощью фотоприемника и осциллографа в зависимости от амплитуды напряжения, подаваемого на пьезокерамику, и уровня накачки иттербиевого лазера.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

После преодоления порогового значения накачки и без подачи напряжения на пьезокерамический цилиндр отсутствует стабильная генерация. Также отсутствуют период и повторяемость импульсов по длительности и амплитуде. Стабилизация выходного излучения достигается при увеличении мощности накачки до 1,5 Вт и включении модуляции. На рис. 2 приведены осциллограммы сигналов на выходе волоконного лазера (рис. 2 а, б) и напряжения, поступающего с генератора на пьезокерамический цилиндр (рис. 2, в). Стабильный импульсный режим генерации свидетельствует о реализации модуляции добротности лазера.

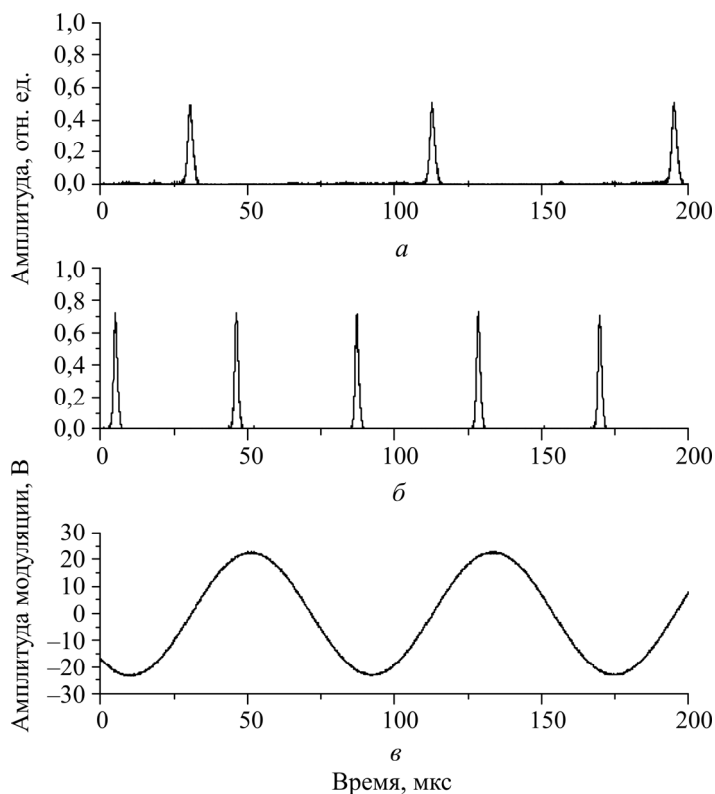


Рис. 2. Последовательности импульсов на выходе схемы для двух уровней накачки (1,5 Вт (а) и 1,8 Вт (б)) иттербиевого лазера

Модуляция добротности волоконного резонатора обусловлена работой интерферометра Маха-Цандера, находящегося внутри резонатора. При подаче напряжения на пьезокерамику в момент ее сжатия и растяжения меняется коэффициент преломления волокна, намотанного на керамику. Следовательно, меняется оптическая длина пути света, прошедшего через волокно, намотанное на керамику. Поэтому изменяется и фаза света на выходе волокна. В зависимости от того, в фазе или противофазе оказывается свет, прошедший активное и пассивное плечи интерферометра, происходит его сложение или вычитание. Следовательно, происходит либо увеличение, либо уменьшение добротности резонатора лазера.

Из рис. 2, а, б следует, что при увеличении мощности накачки от 1,5 до 1,8 Вт на выходе волоконного лазера частота увеличивается в 2 раза. При этом пиковая мощность возрастает от 3,8 до 5,6 Вт. Амплитуда

напряжения на пьезокерамике составляла 26 В в обоих случаях. Частота импульсов в первом случае совпадала с частотой модуляции, а во втором – 2 раза превышала. Так, если частота генератора составляла 12 кГц, то частоты следования импульсов были соответственно равны 12 и 24 кГц.

Показанное на рис. 2 увеличение частоты следования импульсов при увеличении уровня накачки объясняется сокращением времени достижения пороговой инверсной населенности.

Также была измерена зависимость длительности и, как следствие, пиковой мощности импульсов от амплитуды напряжения, подаваемого на пьезокерамический цилиндр. Изменения импульсов для трех уровней напряжения представлены на рис. 3. Данные измерения получены при неизменных частоте модуляции и уровне накачки волоконного лазера. Так, в данном случае, при увеличении амплитуды напряжения от 24 до 35 В, длительность импульса сокращается с 1,7 до 1,3 мкс, пиковая мощность при этом увеличивается от 5 до 6,5 Вт.

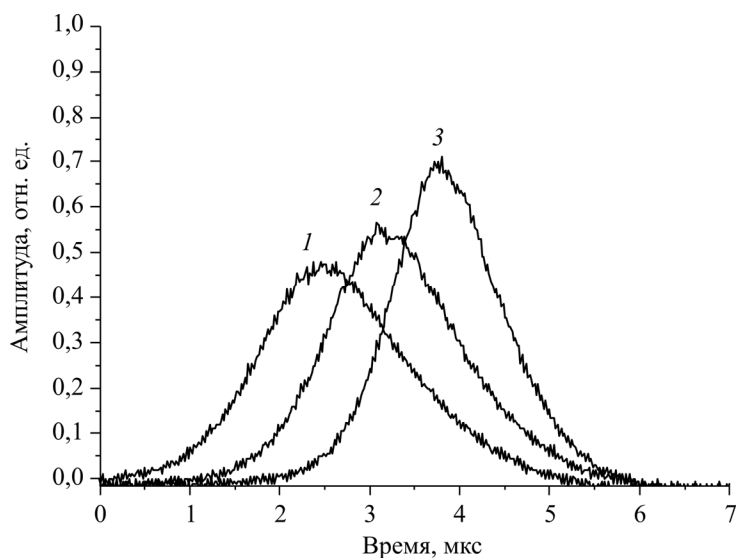


Рис. 3. Изменение параметров выходных импульсов при различных значениях амплитуды модуляции пьезокерамического элемента:
1 – 24 В; 2 – 26 В; 3 – 35 В

Оценка длительности импульса модуляции добротности τ_{pulse} проводилась на основе работ [8, 14].

$$\tau_{pulse} = \tau_C \frac{(\beta_{max} / \beta_p) \eta_E}{(\beta_{max} / \beta_p - \ln(\beta_{max} / \beta_p)) - 1},$$

где τ_C – время жизни фотона в резонаторе; β_{max} / β_p – отношение порогов при низкой и высокой добротности резонатора; η_E – коэффициент использования энергии. Оценки показали, что в нашем случае на основании приведенного выше выражения $\tau_{pulse} < 1$ мкс. То, что эта величина меньше экспериментально полученных длительностей, может быть объяснено тем, что теоретически полученная оценка основана на предположении о мгновенном переключении добротности. В экспериментах время переключения добротности не является мгновенным. Это приводит к уменьшению амплитуды импульса и увеличению длительности. Этим же эффектом – изменением времени переключения добротности модулятора Маха-Цандера – может быть объяснено увеличение амплитуды и уменьшение длительности при возрастании амплитуды модулирующего напряжения, подаваемого на пьезокерамику.

Заключение

Таким образом, в работе изложен способ получения модуляции добротности волоконного лазера путем помещения внутрь резонатора волоконного интерферометра Маха-Цандера, управляемого подачей напряжения на пьезокерамику. Следовательно, мы имеем полностью волоконный лазер с модуляцией добротности.

Измерения мощности в импульсе дали величину 6,5 Вт при длительности 1,3 мкс. Из полученных выше значений следует, что на длине волны генерации волоконного лазера 1080 нм энергия импульса модуляции добротности составляет ~10 мкДж.

Данный лазер может быть эффективно использован в качестве задающего генератора для систем с энергией выходных импульсов порядка 0,5 мДж.

Авторы выражают благодарность О.Е. Нанию, В.Б. Цветкову и А.С. Куркову за плодотворные обсуждения.

Список литературы

1. Gaeta C.J., Digonnet M.J.F., Shaw H.J. Pulse characteristics of Q-switched fiber lasers // *Journal of Lightwave Technology*. – 1987. – Vol. 5, № 12. – P. 1645–1651.
2. Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fibre laser / I.P. Alcock [et al.] // *Electronics Letters*. – 1986. – Vol. 22, №. 2. – P. 84–85.
3. Low-threshold tunable CW and Q-switched fibre laser operating at 1.55 μm / R.J. Mears, L. Reekie, S.B. Poole, D.N. Payne // *Electronics Letters*. – 1986. – Vol. 22, № 3. – P. 159–160.
4. Stone D.H. Effects of axial nonuniformity in modeling Q-switched lasers // *Journal of Quantum Electronics*. – 1992. – Vol. 28, № 10. – P. 1970–1973.
5. Short-pulse, high-power Q-switched fiber laser / P.R. Morkel [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 1992. – Vol. 4, №. 6. – P. 545–547.
6. High power, short pulse acousto-optically Q-switched fibre laser / I. Abdulhalim [et al.] // *Optics communications*. – 1993. – Vol. 99, № 5. – P. 355–359.
7. High Power Q-Switched Erbium Doped Fiber Laser / P. Myslinski, J. Chrostowski, J.A. Koningstein [et al.] // *Journal of Quantum Electronics*. – 1992. – Vol. 28, № 1. – P. 371–377.
8. Генерация гладких микросекундных импульсов в иттербиевом волоконном лазере / В.Г. Воронин, О.Е. Наний, Я.В. Ся, А.В. Вуколов, В.И. Хлыстов // *Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия*. – 2005. – № 8. – С. 35–38.
9. High efficiency 1,53 μm all-fiber pulsed source based on Q-Switched erbium doped fiber ring laser / P. Rog, D. Pagnoux, L. Moupey [et al.] // *Electronics Letters*. – 1997. – Vol. 33, № 15. – P. 1317–1318.
10. Q-switching of Yb^{3+} -doped fiber laser using a novel micro-optical waveguide on micro-actuating platform light modulator / Y. Joeng, Y. Kim, A. Liem [et al.] // *Optics Express* 2005. – Vol. 13, № 25. – P. 10302–10309.
11. Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С. Импульсный гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2.1 μm для медицинского применения // *Прикладная фотоника*. – 2014. – № 1. – С. 130–139.
12. Compact single-frequency all fiber Q-switched laser at 1 μm / H. Leigh, Wei Shi, Jie Zong [et al.] // *Optics letters*. – 2007. – Vol. 32, № 8. – P. 897–899.
13. Высокоэффективный волоконный лазер с накачкой в оболочку на основе иттербиевого световода и волоконной брэгговской решет-

ки / А.С. Курков, В.И. Карпов, А.Ю. Лаптев [и др.] // Квантовая электроника. – 1999. – Т. 27, № 6. – С. 239–240.

14. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: Мир. 1990. – 559 с.

References

1. Gaeta C.J., Digonnet M.J.F., Shaw H.J. Pulse characteristics of Q-switched fiber lasers. *Journal of Lightwave Technology*. 1987, vol. 5, no. 12, pp. 1645-1651.

2. Alcock I.P. [et al.] Q-switched operation of a neodymium-doped monomode fibre laser. *Electronics Letters*. 1986. Vol. 22, no. 2, pp. 84-85.

3. Mears R.J., Reekie L., Poole S.B., Payne D.N. Low-threshold tunable CW and Q-switched fibre laser operating at 1.55 μm . *Electronics Letters*, 1986, vol. 22, no. 3, pp. 159-160.

4. Stone D.H. Effects of axial nonuniformity in modeling Q-switched lasers. *Journal of Quantum Electronics*, 1992, vol. 28, no. 10, pp. 1970-1973.

5. Morkel P.R. [et al.] Short-pulse, high-power Q-switched fiber laser. *Photonics Technology Letters*, 1992, vol. 4, no. 6, pp. 545-547.

6. Abdulhalim I. [et al.] High power, short pulse acousto-optically Q-switched fibre laser. *Optics communications*, 1993, vol. 99, no. 5, pp. 355-359.

7. Myslinski P., Chrostowski J., Koningstein J.A. [et al.] High Power Q-Switched Erbium Doped Fiber Laser. *Journal Of Quantum Electronics*, 1992, vol. 28, no. 1, pp. 371-377.

8. Voronin V.G., Nanii O.E., Sia Ia.V., Vukolov A.V., Khlystov V.I. Generatsiia gladkikh mikrosekundnykh impul'sov v itterbievom volokonnom lazere [Generation of smooth microsecond pulse ytterbium fiber laser]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3 "Fizika. Astronomiia"*, 2005, no. 8, pp. 35-38.

9. Rog P., Pagnoux D., Moupey L. [et al.] High efficiency 1,53 μm all-fiber pulsed source based on Q-Switched erbium doped fiber ring laser. *Electronics Letters*, 1997, vol. 33, no. 15, pp. 1317-1318.

10. Joeng Y., Kim Y., Liem A. [et al.] Q-switching of Yb³⁺-doped fiber laser using a novel micro-optical waveguide on micro-actuating platform light modulator. *Optics Express*, 2005, vol. 13, no. 25, pp. 10302-10309.

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

12. Leigh H., Wei Shi, Jie Zong [et al.] Compact single-frequency all fiber Q-switched laser at 1 μm . *Optics letters*, 2007, vol. 32, no. 8, 897-899.

13. Kurkov A.S., Karpov V.I., Laptev A.Iu. [et al.] Vysokoeffektivnyi volokonnyi lazer s nakachkoi v obolochku na osnove itterbievogo svetovoda i volokonnoi breggovskoi reshetki [High-performance fiber laser pumped into the shell on the basis of ytterbium fiber and fiber Bragg gratings]. *Kvantovaya elektronika*, vol. 27, no. 6, pp. 239-240.

14. Zvelto O. Printsipy laserov [*Principles of lasers*]. Moscow: Mir, 1990. 559 p.

Получено 11.06.2015