

УДК 681.7.068/.069

**И.А. Волков¹, В.А. Камынин²,
К.Н. Нищев¹, В.Б. Цветков²**

¹ Национальный исследовательский

Мордовский государственный университет, Саранск, Россия

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

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИКОСЕКУНДНОГО ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С РАЗЛИЧНЫМИ ДЛИНАМИ РЕЗОНАТОРА

Представлены результаты исследования спектральных и временных характеристик эрбиевого волоконного лазера, работающего в режиме синхронизации мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации. При длине резонатора 64 м длительность импульсов генерации, оцениваемая по спектру, составила 1,08 пс при частоте повторения 3,3 МГц и средней выходной мощности 1,5 мВт. При увеличении длины до 204 м длительность импульса генерации возросла до 1,3 пс, а частота повторения уменьшилась до 1 МГц.

Ключевые слова: синхронизация мод, генерация суперконтинуума, классический солитон, нелинейное вращение поляризации, пики Келли, суммарная дисперсия групповых скоростей (ДГС) внутри резонатора.

**I.A. Volkov¹, V.A. Kamynin²,
K.N. Nishchev¹, V.B. Tsvetkov²**

¹ National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

² A.M. Prokhorov Institute of General Physics of the Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russian Federation

SPECTRAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF PICOSECOND ERBIUM FIBER LASER WITH DIFFERENT LENGTHS OF THE RESONATOR

The results of the study of spectral and timing characteristics of the erbium fiber laser with mode-locking operation based on nonlinear polarization rotation are represented. With 64 m resonator the length of lasing pulses estimated by the spectrum was 1,08 ps at repetition rate 3,3 MHz, and the average output power was 1,5 mW. With increasing of resonator length up to 204 m the length of lasing pulses has grown to 1,3 ps, and repetition rate was reduced to 1 MHz.

Keywords: mode locking, supercontinuum generation, classical soliton, nonlinear rotation of the polarization, Kelly sideband, the total group-velocity dispersion (GVD) in the cavity.

Введение

Лазерные источники, излучающие в широком спектральном диапазоне с заданными временными характеристиками и формой спектра, находят применение во многих областях. Это может быть как применение в научных целях – спектроскопия, генерация суперконтинуума [1, 2], так и в прикладных – метрология, оптическая томография, гиперспектральное изучение объекта и др. [3, 4]. В качестве приложений коротких импульсов отметим исследование сверхбыстрых процессов, генерацию и детектирование терагерцового излучения [5, 6]. Разнообразие возможных применений привело к появлению большого количества исследований, направленных на создание источников, генерирующих ультракороткие оптические импульсы с различными характеристиками.

Генерация в режиме ультракоротких импульсов может быть получена методами синхронизации мод, которые подразделяются на активные и пассивные. На сегодняшний день подавляющее большинство подобных лазеров используют пассивную синхронизацию мод. В этом случае важным элементом резонатора лазера является просветляющийся поглотитель. Типичные примеры таких поглотителей – полупроводниковые просветляющиеся зеркала [7, 8] и наноматериалы [9]. К иному типу относят методы синхронизации мод на основе механизма нелинейного вращения поляризации (НВП) [10] и кольцевых волоконных зеркал Саньяка [11].

В данной работе исследованы спектральные и временные характеристики лазера, работающего в режиме синхронизации мод на основе НВП.

1. Описание экспериментальной установки

Схема кольцевого волоконного лазера представлена на рис. 1. Резонатор лазера образован одномодовым волокном SM332 и волокном, легированным эрбием. Длина активного световода АЕ № 5 (изготовленного в ОАО «ПНППК», г. Пермь) составила 4 м. Накачка осуществлялась через волоконный мультиплексор 1480/1550 лазерным одномодовым диодом на длине волны 1462 нм с выходной мощностью до 100 мВт. Поглощение на длине волны накачки составило 6,4 дБ/м. Направление генерации в схеме определялось волоконным изолятором. Два контроллера

поляризации установлены в кольцевом резонаторе с двух сторон от волоконного поляризационного делителя и используются для подстройки поляризации. Данная схема позволяет реализовать механизм синхронизации мод на эффекте НВП, который основан на эффекте Керра.

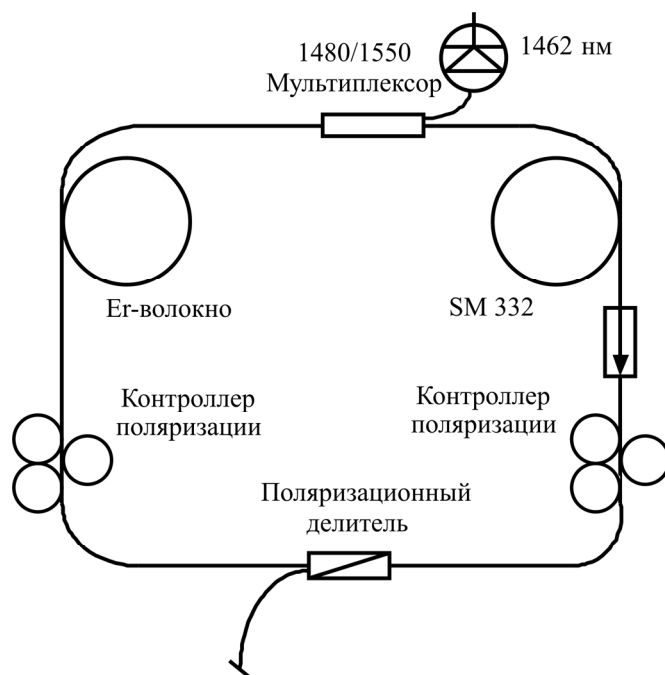


Рис. 1. Схема волоконного эрбиевого лазера

В работе исследованы два варианта схемы. Их основные параметры приведены в таблице.

Основные характеристики резонаторов эрбиевых волоконных лазеров, исследованных в данной работе

Обозначение	Длина резонатора, м	Длина волокна SM332, м	Длина активного волокна, м	$f_{повт}$, МГц
Er60	64	60	4	3,3
Er200	204	200	4	1

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2, 3 приведены спектры излучения, полученные с использованием анализатора оптического спектра HP-70950A, и осциллограммы импульсов выходного излучения лазера, полученные с применением ос-

циллографа Tektronix MDO 3052 с использованием приемника излучения на основе InGaAs PIN-фотодиода. Были получены режимы генерации, которые имеют близкие по форме и полуширине спектры излучения.

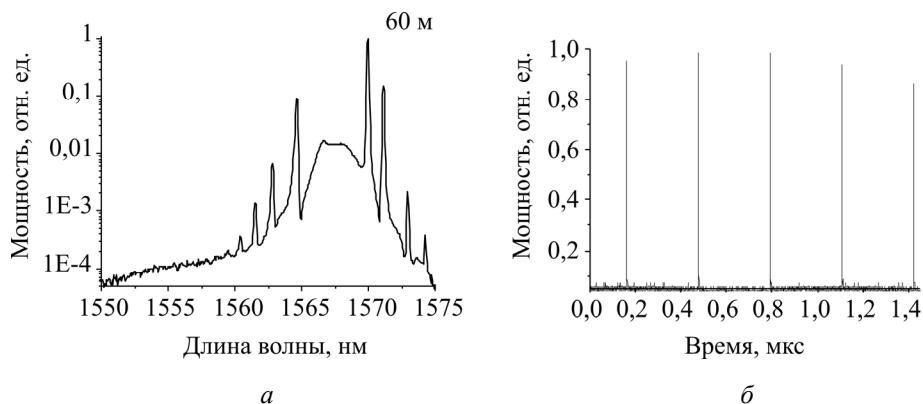


Рис. 2. Спектр генерации (а) и осциллограмма (б) импульсов лазера в схеме Er60

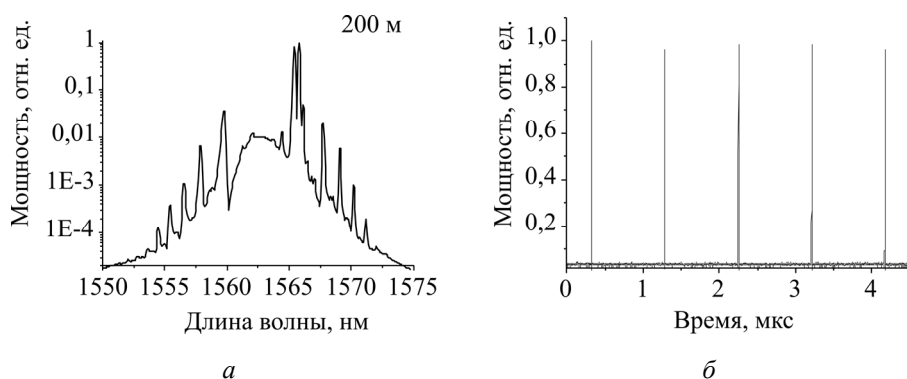


Рис. 3. Спектр генерации (а) и осциллограмма (б) импульсов лазера в схеме Er200

Для каждого режима генерации рассчитаны и приведены минимально возможные длительности импульсов исходя из полуширины спектров излучения по формуле

$$\Delta\tau = \frac{K}{\Delta\nu}, \quad (1)$$

где K – коэффициент, зависящий от формы спектра излучения; $\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda^2$, здесь c – скорость света в вакууме; λ – центральная длина волны [12].

Для режима генерации солитонов $K = 0,315$, минимально возможная длительность импульсов в данном режиме в схеме Er200 равна 1,3 пс, а в схеме Er60 – приблизительно 1,08 пс. Средняя мощность выходного излучения составила 1,5 мВт.

Следует отметить, что в схеме Er200 центральная длина волны составляла 1562 нм, а при уменьшении длины резонатора она сместилась в область 1567 нм.

На рис. 2, а и 3, а приведены спектры генерации лазера при разных длинах резонатора. Известно, что в области аномальной ДГС внутри резонатора могут существовать два основных типа генерации: генерация солитонов и генерация растянутых импульсов [10]. Характерным признаком генерации классического солитонного режима является возникновение в спектре излучения узких боковых максимумов Келли n -го порядка, отстающих от центральной длины волны λ_c на некоторую величину $\Delta\lambda$, по которой можно судить о суммарной ДГС внутри резонатора [13, 14]. Значение дисперсии второго порядка можно получить из выражения [15]

$$\beta_2 L = -\frac{N\lambda_0^2}{\pi c^2} \left[\left(\frac{\Delta\lambda_N}{\lambda_0} \right)^2 + \frac{\ln^2(1+\sqrt{2})}{\pi^2} \left(\frac{\lambda_0}{c\Delta\tau} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где τ – длительность импульса; N – порядок пика Келли; c – скорость света.

Оценка суммарной ДГС по выражению (2), проведенная на основании спектров на рис. 2, а и 3, а и минимально возможной длительности импульса согласно формуле (1), дает величины ДГС для первого порядка пиков Келли, равные $-2,075$ пс² для Er60 и $-2,611$ пс² для Er200.

В работе [16] показано, что спектральный сдвиг пика Келли n -го порядка относительно центральной длины волны $\Delta\lambda_n \approx n \cdot 1/\sqrt{L}$. Таким образом, с увеличением длины резонатора L возрастает количество порядков n пиков Келли, присутствующих в спектре генерации. Это подтверждает вывод о том, что полученный режим генерации является классическим солитонным импульсом.

Заключение

В работе исследована схема кольцевого эрбиевого волоконного лазера ультракоротких импульсов с длинами резонатора 64 и 204 м. При слабой отрицательной внутрирезонаторной ДГС наблюдался ре-

жим генерации ультракоротких импульсов – классического солитонного импульса.

При длине резонатора лазера 64 м были получены импульсы с частотой повторения $f = 3,3$ МГц и оцениваемая по спектру длительность была равна 1,08 пс, а в схеме с длиной резонатора 204 м – 1,3 пс с частотой повторения $f = 1$ МГц.

Полученные режимы генерации обладают характеристиками, пригодными для успешного использования в качестве задающего устройства при генерации суперконтинуума.

Список литературы

1. Камынин В.А., Курков А.С., Цветков В.Б. Генерация суперконтинуума в диапазоне 1,5–2,4 мкм и использование стандартных оптических волокон // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 11.
2. Supercontinuum generation in optical fibers / S. Li, A.B. Ruffin, D.V. Kuksenkov, M.-J. Li, A.D. Nolan // Passive Components and Fiber-based Devices IV: Proceedings of SPIE. – 2007. – Vol. 6781. – P. 678105–1.
3. Optical frequency metrology / T. Udem, R. Holzwarth, T.W. Hansch [et al.] // Nature. – 2002. – Vol. 416, № 6877. – P. 233–237.
4. Ebrahim-Zadeh M., Sorokina I.T. Midinfrared coherent sources and applications. – Springer, 2008. – 625 p.
5. Generation and detection of broadband coherent terahertz radiation using 17-fs ultrashort pulse fiber laser / J. Takayanagi, S. Kanamori, K. Suizu [et al.] // Optical Express. – 2008. – Vol. 16, № 17. – P. 12859–12865.
6. Field-resolved detection of phase-locked infrared transients from a compact Er: fiber system tunable between 55 and 107 THz / A. Sell, R. Scheu, A. Leitenstorfer, R. Huber // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 93. – P. 251107.
7. Solid-state lowloss intracavity saturable absorber for Nd: YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry–Perot saturable absorber / U. Keller, D.A.B. Miller, G.D. Boyd, T.H. Chiu, J.F. Ferguson, M.T. Asom // Optics Letters. – 1992. – Vol. 17, № 7. – P. 505–507. DOI: 10.1364/OL.17.000505
8. Self-Q-switching and mode locking in a 1,53-m fiber ring laser with saturable absorption in erbium-doped fiber at 4,2 K / M. Nakazawa, K. Suzuki, H. Kubota, Y. Kimura // Optics Letters. – 1993. – Vol. 18, № 8. – P. 613–615. DOI: 10.1364/OL.18.000613

9. Фемтосекундный волоконный лазер с гибридной синхронизацией мод для создания фемтосекундного делителя частоты / В.А. Лазарев, С.О. Леонов, А.Б. Пнев, С.Г. Сазонкин, К.П. Цапенко, А.А. Крылов // Наука и инновации. – 2013. – Вып. 9.

10. Tamura K., Haus H.A., Ippen E.P. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser // *Electronics Letters*. – 1992. – Vol. 28, № 24. – P. 2226–2228. DOI: 10.1049/el: 19921430

11. Doran N.J., Wood D. Nonlinear-optical loop mirror // *Optics Letters*. – 1988. – Vol. 13, № 1. – P. 56–58. DOI: 10.1364/OL.13.000056

12. Agrawal G. *Nonlinear fiber optics*. – Moscow, 2013.

13. Kelly S.M. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton // *Electronics Letters*. – 1992. – Vol. 28, № 8. – P. 806–807. DOI: 10.1049/el: 19920508

14. A high power MOPA-laser based on a mode-locked thulium-doped fiber oscillator with intracavity dispersion management / А.А. Krylov, М.А. Chernysheva, D.S. Chernykh, I.M. Tupitsyn // *Laser Physics*. – 2013. – Vol. 23, № 4. DOI: 10.1088/1054-660X/23/4/045108

15. Rajesh K., Brian R.W. All-fiber passively mode-locked thulium/holmium laser with two center wavelengths // *Applied Optics*. – 2012. – Vol. 51, № 27.

16. *Ultrafast lasers: technology and applications* / M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha [et al.]. – CRC Press, 2002. – 800 p.

References

1. Kamynin V.A., Kurkov A.S., Tsvetkov V.B. Genartsiiia superkontinuuma v diapazone 1,5-2,4 mkm i ispol'zovanie standartnykh opticheskikh volokon [Supercontinuum generation in the range of 1,5–2,4 microns and using standard optical fibers]. *Kvantovaya elektronika*, 2011, no. 41.

2. Li Sh., Ruffin A.B., Kuksenkov D.V., Li M.-J., Nolan D.A. Supercontinuum generation in optical fibers. *Proceedings of SPIE “Passive Components and Fiber-based Devices IV”*, 2007, vol. 6781, pp. 678105-1.

3. Udem T., Holzwarth R., Hansch T.W. [et al.] Optical frequency metrology. *Nature*, 2002, vol. 416, no. 6877, pp. 233-237.

4. Ebrahim-Zadeh M., Sorokina I.T. *Midinfrared coherent sources and applications*. Springer, 2008. 625 p.

5. Takayanagi J., Kanamori S., Suizu K. [et al.] Generation and detection of broadband coherent terahertz radiation using 17-fs ultrashort pulse fiber laser. *Optics Express*, 2008, vol. 16, no. 17, pp. 12859-12865.

6. Sell A., Scheu R., Leitenstorfer A., Huber R. Field-resolved detection of phase-locked infrared transients from a compact Er: fiber system tunable between 55 and 107 THz. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 93, p. 251107.

7. Keller U., Miller D.A.B., Boyd G.D., Chiu T.H., Ferguson J.F., Asom M.T. Solid-state lowloss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry–Perot saturable absorber. *Optics Letters*, 1992, vol. 17, no. 7, pp. 505-507. DOI: 10.1364/OL.17.000505

8. Nakazawa M., Suzuki K., Kubota H., Kimura Y. Self-Q-switching and mode locking in a 1,53-m fiber ring laser with saturable absorption in erbium-doped fiber at 4,2 K. *Optics Letters*, 1993, vol. 18, no. 8, pp. 613-615. DOI: 10.1364/OL.18.000613

9. Lazarev V.A., Leonov S.O., Pnev A.B., Sazonkin S.G., Tsapenko K.P., Krylov A.A. Femtosekundnyi volokonnyi lazer s gibridnoi sinkhronizatsiei mod dlia sozdaniia femtosekundnogo delitelia chastoty [Femtosecond fiber laser with a hybrid mode-locking for creation of femtosecond frequency divider]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013, iss. 9.

10. Tamura K., Haus H.A., Ippen E.P. Self-starting additive pulse mode-locked erbium fiber ring laser. *Electronics Letters*, 1992, vol. 28, no. 24, pp. 2226-2228. DOI: 10.1049/el:19921430

11. Doran N.J., Wood D. Nonlinear-optical loop mirror. *Optics Letters*, 1988, vol. 13, no.1, pp. 56-58. DOI: 10.1364/OL.13.000056

12. Agrawal G. Nonlinear fiber optics. Moscow, 2013.

13. Kelly S.M. Characteristic sideband instability of periodically amplified average soliton. *Electronics Letters*, 1992, vol. 28, no. 8, pp. 806-807. DOI: 10.1049/el:19920508

14. Krylov A.A., Chernysheva M.A., Chernykh D.S., Tupitsyn I.M. A high power MOPA-laser based on a mode-locked thulium-doped fiber oscillator with intracavity dispersion management. *Laser Physics*, 2013, vol. 23, no. 4. DOI: 10.1088/1054-660X/23/4/045108

15. Rajesh K., Brian R. W. All-fiber passively mode-locked thulium/holmium laser with two center wavelengths. *Applied Optics*, 2012, vol. 51, no. 27.

16. Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G. [et al.] Ultrafast lasers: technology and applications. CRC Press, 2002. 800 p.