Иттербиевый волоконный лазер, работающий в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм

С.А.Филатова, В.А.Камынин, А.Р.Макеева, А.А.Рыбалтовский, А.Е.Фалэ, А.И.Федосеев, В.Б.Цветков

Исследован компактный полностью волоконный иттербиевый лазер, работающий в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм с возможностью управления параметрами импульсного излучения. Режим переключения усиления был реализован за счет модуляции тока полупроводникового диода накачки. При энергии накачки, находящейся в диапазоне 197.6–263.5 мкДж, на каждый импульс накачки приходился один импульс генерации с длительностью 0.43–1.1 мкс, энергией 5.3–8.8 мкДж и частотой следования 100 Гц. Увеличение энергии накачки более 265 мкДж приводило к изменению формы генерируемых импульсов и к увеличению их энергии до 70 мкДж.

Ключевые слова: волоконный лазер, иттербиевый лазер, переключение усиления, импульсное излучение, волоконная брэгговская решетка.

1. Введение

Прогресс в области волоконных лазерных систем способствует росту их применения для технических и научных приложений. По сравнению с твердотельными или газовыми лазерами волоконные системы демонстрируют множество преимуществ, к которым можно отнести: широкий диапазон длин волн генерации (800–2210 нм), стабильную выходную мощность, компактность и надежность конструкции, высокое качество пучка, а также разнообразие волоконных компонентов [1].

Технология волоконных лазеров с широкими возможностями интеграции позволяет создавать лазерные системы различной сложности, генерирующие как непрерывное, так и импульсное излучение длительностью от мкс до фс [2–4]. Несмотря на это, с точки зрения некоторых прикладных задач, наблюдается интерес к упрощению конструкций лазерных систем для повышения их надежности и простоты в использовании. Альтернативным методом генерации импульсного излучения с наносекундной длительностью импульсов, помимо метода модуляции добротности или внешней модуляции непрерывного излучения лазера, является метод переключения усиления

Поступила в редакцию 10 апреля 2024 г., после доработки – 23 мая 2024 г.

[5,6]. Реализация переключения усиления в волоконных лазерах удобна благодаря их высокому оптическому усилению, по сравнению с твердотельными лазерами, а также благодаря развитию мощных модулей лазерных диодов с волоконным выводом излучения. Они могут обеспечить достаточную мощность накачки и довольно быстрое включение-выключение для переключения усиления лазера. Используя данный подход, можно создавать простые и надежные полностью волоконные лазерные системы в широком спектральном диапазоне без использования в резонаторе лазера модулирующих элементов, вносящих дополнительные потери и ограничение по допустимой энергии генерации. Метод переключения усиления конкурирует с широко распространенными методами модуляции добротности, которые используют акустооптические модуляторы [7,8] или другую альтернативную технику [9-12]. Использование волоконных брэгговских решеток (ВБР) для формирования резонатора лазера с переключением усиления позволяет получать лазерные импульсы со спектральной шириной менее одного нанометра [13], а также в диапазоне малых сечений излучения активных волокон.

Механизм переключения усиления реализуется за счет резкого переключения усиления до высокого уровня с помощью импульса накачки. Длительность импульса накачки должна быть настолько короткой и при этом интенсивной, чтобы инверсия населенностей, а следовательно, и усиление начали заметно превышать пороговое значение и чтобы насыщение усиления обеспечивалось на стадии развития импульса генерации [14-17]. Мощность накачки может быть полностью отключена между импульсами или поддерживаться на уровне чуть ниже порога генерации. Более длинный резонатор лазера способствует увеличению времени нарастания генерируемого импульса и его длительности. Режим переключения усиления был реализован в лазерах на основе оптических волокон, легированных ионами неодима [18], эрбияиттербия [19], тулия [20] и гольмия [21].

На данный момент иттербиевые (Yb³⁺) волоконные лазерные системы являются наиболее распространенны-

С.А.Филатова, В.А.Камынин, В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: filsim2910@gmail.com

А.Р.Макеева. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Российский университет дружбы народов, Россия, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6 А.А.Рыбалтовский. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Научный центр волоконной оптики им. Е.М.Дианова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

А.Е.Фалэ. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1

А.И.Федосеев. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, 1

Лазер, активная среда	Диаметр сердцевины Yb-волокна (мкм)	Длина волны накачки (нм)	Длина волны генерации (нм)	Энергия импульсов (мкДж)	Длительность импульса (нс)	Частота следования (кГц)
Уb-волокно с двойной оболочкой [25]	6	965	1080	7	1400	50
Yb-волокно с двойной оболочкой [26]	8	915	1064	21	350	10
Yb-волокно с двойной оболочкой [27]	7	976	1040	60	45	30
Микроструктурированное Yb-волокно с сохранением поляризации [28]	15	976	1030	39.2	28	50

Табл 1. Параметры излучения Yb-лазеров, работающих в режиме переключения усилен

ми и используемыми для различных научных и прикладных задач, например, для резки, маркировки, сварки и обработки материалов [22–24]. В литературе представлены работы по иттербиевым волоконным лазерам, работающим в режиме переключения усиления. В резонаторах этих лазеров используется Yb-волокно с двойной оболочкой [25–27] или микроструктурированное Ybволокно с сохранением поляризации [28]. В случае [28] были использованы дополнительные объемные элементы, что усложняет конструкцию лазера. В представленных работах импульсное излучение получено в диапазоне длин волн 1030–1080 нм, частота следования импульсов варьируется от нескольких кГц до 50 кГц, а длительность импульсов от 28 нс до 1.4 мкс. В табл.1 более подробно приведены параметры излучения указанных лазеров.

Импульсное излучение в диапазоне длин волн 1100-1150 нм может использоваться для накачки гольмиевых волоконных и твердотельных лазеров или усилителей [29, 30], а относительно низкие (100 Гц–1 кГц) частоты следования импульсов актуальны для использования в системах задающий генератор-усилитель мощности [31, 32]. Поэтому разработка компактных полностью волоконных лазеров, генерирующих наносекундные импульсы с относительно низкой частотой следования в спектральном диапазоне 1100–1150 нм, является актуальной задачей. В настоящей работе исследуется волоконный Yb-лазер, работающий в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм, с возможностью управления параметрами импульсного излучения.

2. Схема экспериментальной установки

На рис.1 представлена схема экспериментальной установки волоконного Yb-лазера, работающего в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм.

Накачка иттербиевого лазера осуществлялась во встречном направлении одним полупроводниковым лазерным диодом с волоконным выходом, длиной волны излучения 976 нм и выходной мощностью до 27 Вт. В качестве активной среды лазера использовалось оптическое волокно, легированное ионами иттербия, с многоэлементной первой оболочкой [33]. Через пассивный световод поступало излучение от источника накачки и выводилась непоглощенная часть этого излучения. Активный световод соединялся с одномодовым оптическим волокном, в сердцевине которого были сформированы волоконные брэгговские решетки. Таким образом была создана полностью волоконная схема лазера без использования дополнительных оптических компонентов, например волоконных сумматоров, мультиплексоров и т.д. Длина Yb-волокна в резонаторе лазера составила около 5 м. Диаметр сердцевины активного световода был равен 6 мкм, а диаметр пассивного световода - 125 мкм. Поглошение Уb-волокна по оболочке на длине волны накачки составило 0.4 дБ/м. Резонатор Уb-лазера был сформирован двумя волоконными брэгговскими решетками, выполняющими функцию глухого и выходного зеркал. «Глухая» решетка имела коэффициент отражения ~100%, а «выходная» решетка – примерно 30% на длине волны



Рис.1. Схема волоконного Уb-лазера, работающего в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм.

1127 нм. ВБР были изготовлены на отрезках фоточувствительного германосиликатного волокна с диаметром сердцевины 6 мкм УФ излучением эксимерного лазера с длиной волны 193 нм и с помощью фазовой маски с периодом 775 нм. Спектральная ширина «глухой» и «выходной» решеток на полувысоте составила порядка 1.3 и 0.2 нм соответственно.

Для реализации режима переключения усиления лазерный диод накачки был подключен к плате управления (PicoLas LDP-CWL 0-12 A, 0-20 B), управляемой генератором сигнала (Keysight 33600A). С помощью генератора происходило управление параметрами модуляции тока лазерного диода (форма импульса, частота, амплитуда, длительность). Для исследования параметров импульсного излучения были использованы фотодетекторы Thorlabs PDA10D2 (30 МГц) и Thorlabs DET08CFC (5 ГГц), сопряженные с осциллографами Tektronix MDO3052 (500 МГц) и Tektronix MSO64 (4 ГГц) соответственно.

3. Экспериментальные результаты

Модуляция тока полупроводникового диода накачки осуществлялась с помощью генератора сигнала и платы управления, к которой был подключен диод. Модуляция тока проводилась с фиксированной частотой 100 Гц и фиксированной амплитудой импульсов, которой соответствовала мгновенная мощность 21.9 Вт. Таким образом, мгновенная мощность накачки Yb-лазера была фиксированной. Длительность и форма генерируемых импульсов Yb-лазера зависела от энергии импульсов накачки, которая изменялась в диапазоне 197–944 мкДж в зависимости от длительности импульсов, подаваемых на диод (9–43 мкс). Форма импульсов накачки была фиксированной (прямоугольной). Порог импульсной генерации Yb-



Рис.2. Изменение формы генерируемых импульсов Yb-лазера в зависимости от энергии накачки: $E_{\text{pump}} = 263.5 \text{ мкДж}, \tau_{\text{pump}} = 12 \text{ мкс}$ (*a*), $E_{\text{pump}} = 351 \text{ мкДж}, \tau_{\text{pump}} = 16 \text{ мкс}$ (*б*), $E_{\text{pump}} = 944 \text{ мкДж}, \tau_{\text{pump}} = 43 \text{ мкс}$ (*в*).

лазера наблюдался при энергии накачки 197 мкДж. На рис.2 продемонстрировано изменение формы генерируемых импульсов в зависимости от энергии накачки E_{pump} . Длительность импульсов накачки составила 12, 16 и 43 мкс. Видно, что увеличение энергии накачки приводит к изменению формы импульсов от простой (рис.2,*a*) к более сложной (рис.2,*b*) Следовательно, задний фронт импульса переходит в составную форму и включает релаксационные колебания, переходящие в стационарную генерацию. При этом суммарная энергия генерируемых импульсов E_p увеличивается, а мгновенная мощность на «стационарной» части уменьшается. Таким образом, меняя энергию накачки, можно варьировать форму и длительность генерируемых импульсов.

В диапазоне энергий накачки 197.6-263.5 мкДж на каждый импульс накачки приходился один импульс генерации, длительность которого уменьшалась с ростом энергии накачки. На рис.3, а приведено распределение по длительностям генерируемых импульсов простой формы и соответствующая им энергия. Видно, что с увеличением энергии импульсов их длительность уменьшается. На вставке рис.3,а приведено сравнение импульсов с разной длительностью и энергией при $E_{\text{pump}} = 197.6$ мкДж для импульса $\tau = 1.1$ мкс и $E_{\text{pump}} = 263.5$ мкДж для импульса τ = 0.43 мкс. При значениях энергии накачки выше 265 мкДж форма генерируемых импульсов меняется в соответствии с тем, как показано на рис.2. На рис.3,6 приведена осциллограмма последовательности импульсов, следующих с частотой 100 Гц. Вариация амплитуды составила около 30%.

При использовании оборудования с высоким временным разрешением на огибающих импульсов наблюдается периодическая структура, период которой соответствует времени обхода резонатора (~50 нс), а длительность не превышает 2 нс. На рис.4 показаны увеличенные фрагменты импульсов, из которых видно, что для генерируемых импульсов разных длительностей периодичность структуры сохраняется. Данный процесс похож на процесс модуляции добротности с частичной синхронизацией мод [34].

Как было отмечено ранее, в большинстве работ импульсная генерация в волоконных Yb-лазерах, работающих в режиме переключения усиления, реализована в диапазоне длин волн от 1030 до 1060 нм. Это обусловлено пиком сечения излучения Yb-волокна в диапазоне 1020– 1050 нм. В настоящей работе импульсная генерация реализована в спектральном диапазоне, где наблюдается малое сечение излучения для Yb-волокна. На рис.5 представлен спектр излучения Yb-лазера, работающего в режиме переключения усиления. Длина волны генерации λ_c составила 1127 нм, что соответствует максимумам отражения BБР, а ширина спектра $\Delta\lambda$, измеренная на полувысоте, не превышала 0.2 нм. Таким образом, меняя длину волны отражения волоконных брэгговских решеток, можно варьировать длину волны генерации.

Данный подход к реализации переключения усиления не ограничивается только относительно низкими частотами, но и предполагает возможность увеличения частоты следования генерируемых импульсов до 50 кГц при использовании вышеописанных компонентов Yb-лазера. Верхняя граница частоты следования импульсов определяется возможностями платы управления лазерного диода накачки. Полученные в настоящей работе мгновенные мощности излучения на несколько порядков меньше, чем



Рис.3. Распределение по длительностям генерируемых импульсов и соответствующая им энергия (на вставке: сравнение импульсов с разной длительностью и энергией) (*a*), а также последовательность импульсов с частотой 100 Гц при длительности генерируемых импульсов 0.7 мкс (*б*).



Рис.4. Увеличенная структура импульса $\tau = 1.1$ мкс, представленного на вставке (*a*), а также увеличенная структура импульса $\tau = 0.43$ мкс, представленного на вставке (*б*). Розовым цветом выделена область увеличения импульса.



Рис.5. Спектр излучения Yb-лазера, работающего в режиме переключения усиления, в логарифмическом и линейном (на вставке) масштабах.

представленные в других работах, например в [17, 28], что объясняется ограничениями, связанными с низким сечением излучения Yb-волокна на длине волны 1127 нм.

4. Заключение

Впервые создан полностью волоконный Yb-лазер, работающий в режиме переключения усиления на длине волны 1127 нм с возможностью управления параметрами импульсного излучения. Управление энергией импульсов накачки позволило варьировать форму и энергию генерируемых импульсов. При энергии накачки, находящейся в диапазоне 197.6–263.5 мкДж, на каждый импульс накачки приходился один импульс генерации с длительностью импульсов 0.43–1.1 мкс, энергией 5.3–8.8 мкДж и частотой следования 100 Гц. На огибающих импульсов была зафиксирована периодическая структура, период которой соответствовал времени обхода резонатора. При увеличении энергии накачки более 265 мкДж форма генерируемых импульсов менялась и задний фронт импульса приобретал составную форму и включал релаксационные колебания, переходящие в стационарную генерацию. Энергия таких импульсов возрастала до 70 мкДж при энергии накачки 944 мкДж.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-00126.

- Shi W., Fang Q., Zhu X., Norwood R.A., Peyghambarian N. Appl. Opt., 53 (28), 6554 (2014).
- 2. Zuo J., Lin X. Laser Photonics Rev., 16 (5), 2100741 (2022).
- Chen X., Wang N., He C., Lin X. Opt. Laser Technol., 157, 108709 (2023).
- Kirsch D.C., Chen S., Sidharthan R., Chen Y., Yoo S., Chernysheva M. J. Appl. Phys., **128** (18), 180906 (2020).
- 5. Yang J., Tang Y., Xu J. Photonics Research, 1 (1), 52 (2013).
- Maryashin S., Unt A., Gapontsev V.P. Proc. SPIE, 6102, 610200 (2006).
- Barmenkov Y.O., Kir'yanov A.V., Andrés M.V. IEEE J. Quantum Electron., 48 (11), 1484 (2012).
- Fale A.E., Zverev A.D., Kamynin V.A., Wolf A.A., Filatova S.A., Nanii O.E., Smirnov A.P., Fedoseev A.I., Tsvetkov V.B. *Photonics*, 9 (11), 846 (2022).
- Andersen T.V., Pérez-Millán P., Keiding S.R., Agger S., Duchowicz R., Andrés M.V. Opt. Commun., 260 (1), 251 (2006).
- 10. Liu J., Wu S., Yang Q.H., Wang P. Opt. Lett., 36 (20), 4008 (2011).
- Kamynin V.A., Filatova S.A., Mullanurov T.I., Cheban M.D., Wolf A.A., Korobko D.A., Fotiadi A.A., Tsvetkov V.B. *Photonics*, 11 (1), 30 (2023).
- Грух Д.А., Курков А.С., Раздобреев И.М., Фотиади А.А. Квантовая электроника, **32** (11), 1017 (2002) [Quantum Electron., **32** (11), 1017 (2002)].
- 13. Tang Y., Xu J. Appl. Phys. Express, 5 (7), 072702 (2012).
- 14. Casperson L.W. J. Appl. Phys., 47 (10), 4555 (1976).
- 15. Agrež V. Opt. Express, 27 (9), 12100 (2019).
- 16. Agrež V. Appl. Opt., 52 (13), 3066 (2013).
- 17. Agrež V. Opt. Express, 22 (5), 5558 (2014).

- Hattori K., Kitagawa T. IEEE Photonics Technol. Lett., 4 (9), 973 (1992).
- Jackson S.D., Dickinson B.C., King T.A. *Appl. Opt.*, **41** (9), 1698 (2002).
 Simakov N., Hemming A., Bennetts S., Haub J. *Opt. Express*, **19**
- (16), 14949 (2011).
 21. Wu K.S., Ottaway D., Munch J., Lancaster D.G., Bennetts S.,
- Wu K.S., Ottaway D., Mullen J., Lancaster D.G., Bennetts S. Jackson S.D. Opt. Express, 17 (23), 20872 (2009).
- Zhu C., Wan H., Min J., Mei Y., Lin J., Carlson B.E., Maddela S. Opt. Lasers Eng., 119, 65 (2019).
- Cheban M., Filatova S., Kravchenko Y., Scherbakov K., Mamonov D., Klimentov S., Saviniv M., Chichkov M. *Nuclear Engineering* and *Technology* (2024) (in press). https://doi.org/10.1016/j. net.2024.02.039.
- 24. Lobach I.A., Kablukov S.I. J. Lightwave Technol., 31 (18), 2982 (2013).
- Giesberts M., Geiger J., Traub M., Hoffmann H.D. Proc. SPIE, 7195, 71952P (2009).
- 26. Petkovšek R., Agrež V., Bammer F. Proc. SPIE, 7721, 71210L (2010).
- 27. Jin D., Sun R., Shi H., Liu J., Wang P. Opt. Express, 21 (22), 26027 (2013).
- 28. Agrež V. Opt. Express, 22 (2), 1366 (2014).
- Filatova S.A., Fale A.E., Kamynin V.A., Wolf A.A., Zhluktova I.V., Nanii O.E., Smirnov A.P., Babin S.A., Fedoseev A.I., Tsvetkov V.B. J. Lightwave Technol., 41 (19), 6400 (2023).
- Filatova S.A., Kamynin V.A., Tsvetkov V.B., Medvedkov O.I., Kurkov A.S. *Laser Phys. Lett.*, **12** (9), 095105 (2015).
- Qian C., Yao B., Ju Y., Duan X., Zhao B., Dai T., Wang Y. Appl. Opt., 58 (4), 879 (2019).
- Wang H., Zhao L., Li Z., Tian J., Xie Z., Tan R. Opt. Laser Technol., 169, 110074 (2024).
- Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. Квантовая электроника, 35 (4), 328 (2005) [Quantum Electron., 35 (4), 328 (2005)].
- Hönninger C., Paschotta R., Morier-Genoud F., Moser M., Keller U. JOSA B, 16 (1), 46 (1999).