PACS 42.60.Da; 42.55.Wd; 42.55.Xi; 42.60.Fc

Генерация импульсов длительностью 25 нс с пиковой мощностью более 10 кВт двухмикронным волоконным Tm-лазером с модулированным усилением и усилительной системой*

Я.Свидерски, М.Михалска, В.Пихола, М.Мамаек

Сообщается о полностью волоконной системе с лазером на кварцевом волокне, легированном Tm^{3+} и модулированным усилением и усилителем, генерирующей цуг импульсов на длине волны 1994.4 нм. При работе с частотой следования импульсов f = 100 кГц система обеспечивала максимальную среднюю мощность 9.03 Вт с дифференциальной эффективностью 36.4%. При f = 26 кГц были получены стабильные импульсы длительностью 25 нс с энергией 0.28 мДж, что соответствует пиковой мощности 10.5 кВт. Описаны рабочие параметры лазерной системы.

Ключевые слова: *легированные тулием волоконные лазеры, модуляция усиления, лазерные резонаторы, усиление импульсов.*

1. Введение

В последние годы лазерные источники, работающие в среднем ИК диапазоне, привлекают особое внимание, что обусловлено их широким применением в медицине и спектроскопии для обнаружения следовых концентраций газов в прямых энергетических системах и в нелинейных преобразователях частоты [1–7]. Легированные тулием волоконные лазеры (ТВЛ) с накачкой через оболочку на длине волны 793 нм, излучающие в диапазоне 1.6–2.1 мкм, уже зарекомендовали себя в этом спектральном диапазоне как класс лазерных источников высокой мощности с непрерывной выходной мощностью свыше 1 кВт [8, 9]. Более того, процесс кросс-релаксации в ионах Tm^{3+}, позволяющий осуществлять возбуждение верхнего лазерного уровня по схеме «два-в-одном», значительно (теоретически – в два раза) улучшает квантовую эффективность ТВЛ [10], что дает им дополнительно преимущества по сравнению с их аналогом – эрбиевым волоконным лазером на 1.55 мкм. Некоторые приложения требуют двухмикронных импульсов малой, как правило наносекундной, длительности с киловаттной пиковой мощностью и высокой (более 10 кГц) частотой следования. Такие цифры можно непосредственно получить путем простой модуляции добротности лазерных потерь (см., напр., [11–15]). Однако у всех лазеров с модуляцией добротности длительность импульса зависит от частоты их следования, что может быть проблемой для некоторых приложений, особенно в тех случаях, когда требуется высокая степень контроля параметров импульсов. Таким образом, методом, альтернативным импульсному режиму работы, представляется модуляция усиления, когда такой режим реализуется путем включения/выключения лазерного усиления с помощью модуляции мощности накачки [16–18]. В частности, быстрое переключение усиления вместе с резонансной накачкой может обеспечить получение стабильных двухмикронных коротких импульсов (менее 100 нс) при частоте их следования *f* в несколько десятков килогерц [19]. Для эффективной реализации быстрой модуляции усиления ТВЛ их можно накачивать короткими (менее 200 нс) импульсами на длине волны ~1.5 мкм (см., напр., [17, 19, 20]) или ~1.9 мкм [16, 21]. Это позволило получить импульсы с длительностью τ = 25 нс и энергией вплоть до 35 мкДж в полностью волоконной лазерной системе [17] и импульсы с τ = 61 нс, энергией 1.3 мДж и соответствующей пиковой мощностью 21.3 кВт в комбинированном ТВЛ [16]. Очень интересная концепция ТВЛ с малой длительностью импульсов и переключением усиления была недавно предложена в [22], где сообщалось о получении стабильных импульсов в схеме с модуляцией усиления, имеющих пиковую мощность свыше 100 кВт. В этом случае двухмикронные выходные импульсы, генерируемые ТВЛ, запускались в отрезок одномодового волокна длиной 10 м, а затем с помощью эффекта ВРМБ, индуцированного рассеянием Рэлея, сужались примерно до 20 нс. Единственным недостатком этого подхода является широкий (свыше 250 нм) выходной спектр, типичный для генерации суперконтинуума (СК).

В настоящей статье представлены результаты работы системы, состоящей из двухмикронного узкополосного ТВЛ с быстрым переключением усиления и усилителя, со средней выходной мощностью выше 9.03 Вт и почти дифракционно ограниченным выходным пучком.

2. Структура лазерной системы

Лазерная система, структура которой показана на рис.1, состояла из трех основных частей: волоконной лазерной системы накачки (1.55 мкм), построенной в конфигурации задающего генератора–усилителя мощности (МОРА), ТВЛ с накачкой через оболочку и усилителя на легированным тулием волокне (ТВУ). МОРА производил цуг импульсов с τ ~ 120 нс с переменной (26–100 кГц) частотой следования и средней мощностью до 3.5 Вт, обе-

* Перевод с англ. В.В.Шувалова.

J.Swiderski, M.Michalska, W.Pichola, M.Mamajek. Institute of Optoelectronics, Military University of Technology, 2 Kaliskiego Street, 00-908 Warsaw, Poland; e-mail: jswiderski.ioe.mut@gmail.com

Поступила в редакцию 16 апреля 20013 г.

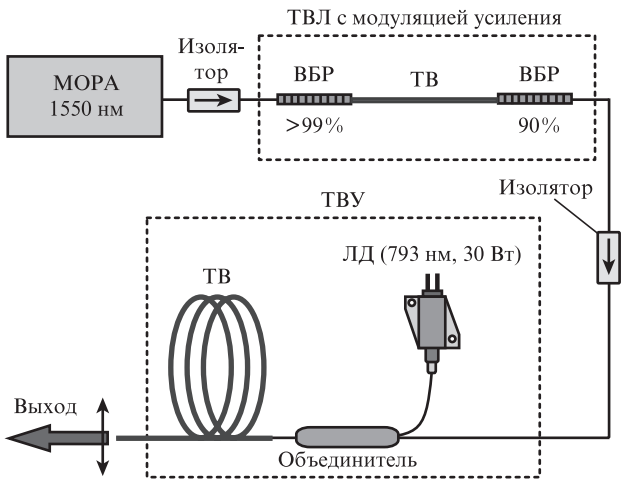

Рис.1. Схема экспериментальной установки.

спечивая тем самым параметры импульсов накачки, подходящие для быстрого переключения усиления. В лазере используется одномодовое поддерживающее поляризацию кварцевое волокно длиной 20 см с двойной оболочкой, легированное Tm (~2 вес.%). Диаметры сердцевины/оболочки активного волокна составляли 10/130 мкм, а соответствующие им числовые апертуры – 0.15/0.46. Оптический резонатор был сформирован высокоотражающей волоконной брэгговской решеткой (ВБР) с коэффициентом отражения более 99% (ширина полосы пропускания 1.5 нм на 1994.5 нм) и выходным устройством связи на ВБР с коэффициентом отражения 90% и шириной полосы отражения 0.5 нм по уровню 3 дБ. Подробное описание конструкции МОРА и накачиваемого через сердцевину ТВЛ можно найти в [20].

Выход из ТВЛ с модуляцией усиления, оснащенный волоконно-оптическим изолятором, был соединен путем сварки с выводом входного волокна $(2 + 1) \times 1$ объединителя мощности накачки тулиевого усилителя. В ТВУ использовался отрезок легированного ионами Tm^{3+} волокна (ТВ) длиной ~2.5 м с теми же параметрами, что и указанные выше. ТВУ накачивался через оболочку в попутном направлении лазерным диодом (793 нм, 30 Вт) с волоконным выводом (100/125 мкм, NA = 0.22). Выходной конец ТВ был сколот под углом ~8°, чтобы устранить любые обратные отражения. Из-за квазитрехуровневой схемы уровней ионов тулия активное охлаждение волокна имеет решающее значение для достижения высокой эффективности преобразования. Поэтому оба отрезка активных волокон были намотаны на цилиндры диаметром 10 см, размещенные на охлаждаемой водой медной пластине, температура которой поддерживалась равной ~16° С. Все компоненты системы соединены сваркой, поэтому она была полностью волоконной. Выходной пучок лазера коллимировался и затем пропускался через дихроичный оптический фильтр, чтобы отделить двухмикронный сигнал от непоглощенного излучения накачки на $\lambda = 1.55$ мкм.

3. Результаты эксперимента

Лазерная система была протестирована при f от 26 до 100 кГц. Нижний предел частоты следовал из RC-схемы, использованной в блоке управления задающего РОС-лазера в МОРА. Система могла бы работать на более высоких частотах, однако при $f > 100$ кГц энергия импульса накачки была слишком мала, чтобы обеспечивать подходящее отношение усиление/потери в резонаторе и тем самым поддерживать генерацию коротких (менее 50 нс) импульсов. Очевидно, что при более высоких частотах следования и постоянной (максимально доступной) мощности накачки энергия импульсов становится меньше, а их длительность – больше, что следует из динамики переключения усиления. Длительность импульса накачки на 1.55 мкм была установлена равной 120 нс. Для каждого заданного значения f энергия импульсов накачки выбиралась такой, чтобы получить предельно короткие двухмикронные выходные импульсы при условии сохранения их стабильности. В ходе эксперимента было замечено, что при слишком высокой энергии импульса накачки выходной импульс демонстрировал значительную перемодуляцию и пульсацию амплитуды; также увеличивался джиттер импульсов. Таким образом, в лазерной системе, представленной на рис.1, усиливался цуг стабильных импульсов с $\tau \sim 25$ нс, полученных на максимальной частоте 100 кГц. Максимальная введенная в усилитель мощность накачки на длине волны 790 нм составила 30.2 Вт, из которых более 95% было поглощено ионами Tm^{3+}.

На рис.2 показан спектр усиленных импульсов с $\tau = 25$ нс при $f = 26$ кГц, измеренный с помощью оптического анализатора спектра AQ6370 (Yokogawa). При работе лазера с максимальной эффективностью излучался спектр с центром на 1994.4 нм и шириной по полувысоте 1.2 нм, который был несколько шире спектра излучения самого ТВЛ. Это может быть связано с эффектом фазовой самомодуляции, возникающим при усилении импульсов с высокой пиковой мощностью в сердцевине усиливающего волокна небольшой площади. При более высоких частотах центр спектра выходного сигнала также находился на 1994.4 нм, а его ширина была сравнима с указанной выше.

Максимальная выходная мощность для заданных f и импульсов длительностью 25 нс ограничивалась только доступной нам мощностью накачки. На рис.3 показаны зависимости средней выходной мощности и энергии усиленных импульсов от поглощенной мощности накачки при четырех значениях f. Мощность измерялась измерителем мощности (Ophir, Laserstar) со спектральным диапазоном отклика теплового сенсора 0.19–20 мкм.

Как видно из рис.3, выходная мощность ТВУ линейно растет с увеличением мощности накачки на 790 нм, и чем

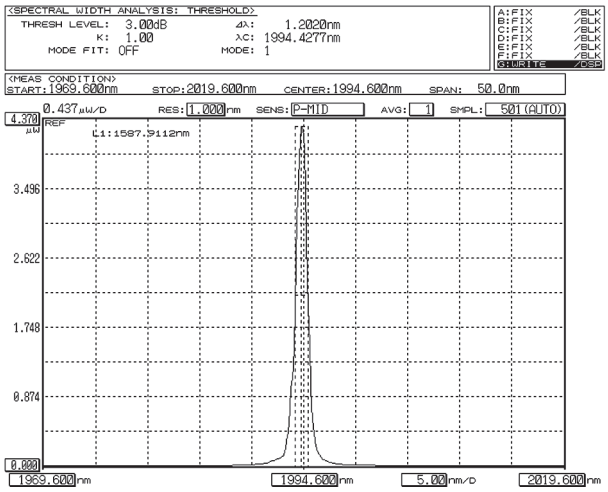

Рис.2. Спектр излучения двухмикронных импульсов.

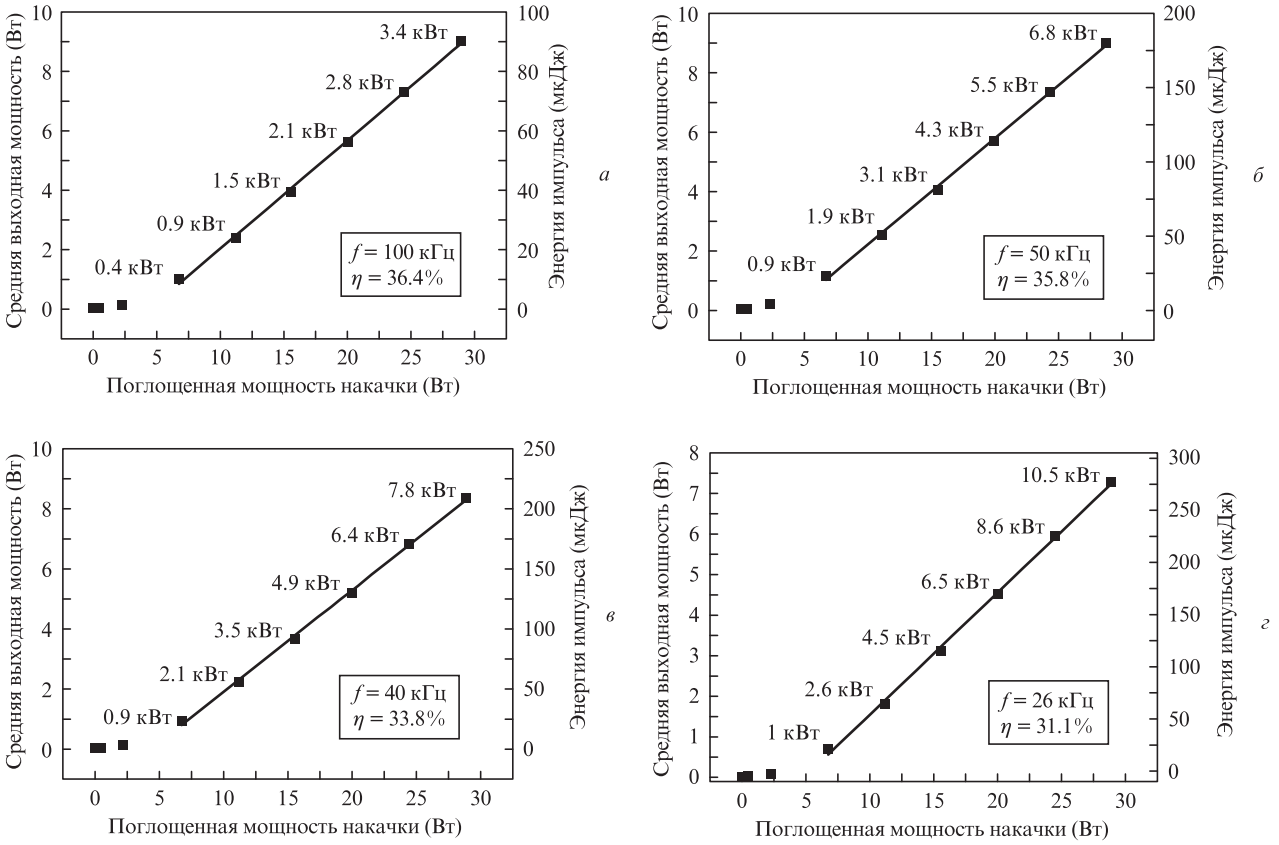

Рис.3. Зависимости средней выходной мощности и энергии импульса ТВУ от поглощенной мощности накачки на 790 нм при f = 100 (*а*), 50 (*б*), 40 (*в*) и 26 кГц (*г*). Точки – экспериментальные данные, сплошная кривая – линейная аппроксимация, η – дифференциальная эффективность.

больше значение f, тем большую мощность на длине волны 2 мкм можно получить. При f = 100 кГц и максимально доступной мощности накачки (30.2 Вт) выходная мощность составила 9.03 Вт (энергия 90 мкДж для импульса длительностью 25 нс) при η = 36.4%. Снижение f до 26 кГц приводило к уменьшению выходной мощности до 7.28 Вт при η = 31.1%. Соответствующие энергия и пиковая мощность импульса в этом случае составляли 0.28 мДж и 10.53 кВт. Энергия импульса $E_{\rm pulse}$ рассчитывалась путем деления средней выходной мощности $P_{\rm av}$ на величину f, а пиковая мощность выходного импульса находилась в предположении его гауссовой формы: $P_{\rm peak} = 0.94E_{\rm pulse} \times t_{\rm pulse}^{-1}$, где $t_{\rm pulse}$ – длительность выходного импульса на полувысоте. Наблюдаемые изменения в дифференциальной эффективности (с 36.4% до 31.1%) обусловлены тем, что усилитель не работал в условиях, близких к насыщению. Нестабильность выходной мощности, измеренная в течение 10 мин работы, была оценена в менее чем 1%.

На рис.4 показана осциллограмма двухмикронного стабильного лазерного импульса, измеренная при f = 26 кГц и максимальной эффективности лазерной системы. Осциллограммы регистрировались с помощью быстродействующего фотодетектора ET-5000F (EOT) с временем нарастания менее 35 пс и осциллографа MSO7104B с полосой пропускания 1 ГГц (Agilent Technologies).

Длительность самого короткого стабильного импульса составляла 25 нс, его огибающая имела слегка асимметричную форму с крутым передним и более пологим задним фронтами, как в случае классической формы импульса с модуляцией добротности. Видно, что выходной импульс гладкий и чистый, без каких-либо релаксационных пичков.

На рис.5 представлены значения радиуса пучка, измеренные в различных плоскостях за линзой. Измерения проводились при использовании полностью автоматизированной системы определения M^2 с применением анализатора распространения пучка и пироэлектрического профайлера NanoModeScan (Ophir). Используя измеренные данные и считая профиль пучка гауссовым, мы нашли параметры качества пучка: M_x^2 = 1.19 и M_y^2 = 1.19.

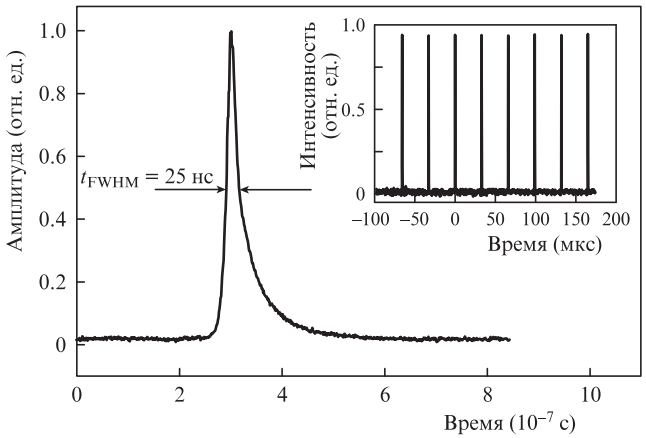

Рис.4. Временной профиль предельно короткого стабильного выходного лазерного импульса. На вставке – цуг лазерных импульсов при f = 26 кГц.

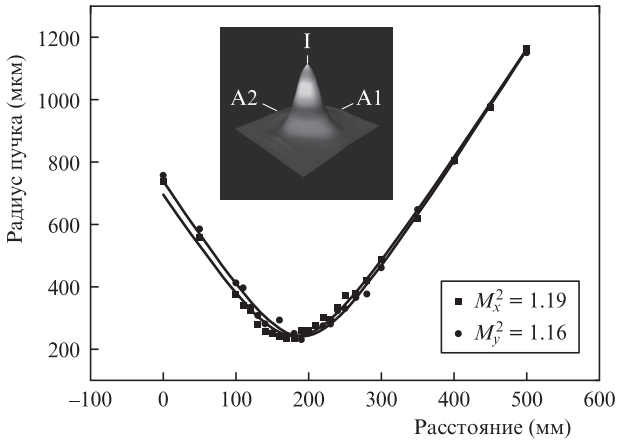

Рис.5. Зависимости радиуса пучка усиленного лазерного выходного излучения от расстояния до фокусирующей линзы, измеренные при максимальной производительности лазерной системы (f = 26 кГц). На вставке – профиль пучка в дальней зоне.

Выходные параметры разработанного ТВЛ с модуляцией усиления и усилителем на основе легированного Tm^{3+} волокна более чем достаточны для использования этого лазера в качестве безопасного для глаз передатчика или источника накачки для оптических параметрических генераторов среднего ИК диапазона. Дальнейшее увеличение выходной мощности, а также повышение эффективности лазерной системы возможно путем применения большей мощности накачки, а также оптимизации лазерного резонатора ТВЛ (длины волокна, выходной связи) и использования более эффективных методов охлаждения активных волокон. Параметр качества пучка также может быть улучшен при более аккуратном скалывании выходного торца волокна лазера.

Таким образом, нами была представлена полностью волоконная двухмикронная система с лазером на легированном тулием волокне с модулированным усилением и усилителем, обеспечивающая стабильные импульсы длительностью 25 нс с энергией 0.28 мДж и пиковой мощностью 10.53 кВт. Максимальная выходная средняя мощность, измеренная при f = 100 кГц, составила 9.03 Вт с дифференциальной эффективностью 36.4%.

Авторы благодарны Яну Карчевскему за поддержку работы. Исследование выполнено при частичной поддержке Польского национального научного центра в рамка проекта № 724/N-MIFL/2010/0.

1. Scott N.J., Cilip C.M., Fried N.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 435 (2009).
2. Baudelet M., Willis C.C.C., Shah L., Richardson M. *Opt. Express*, **18**, 7905 (2010).
3. Koch G.J., Beyon J.Y., Barnes B.W., Petros M., Yu J., Amzajerdian F., Kavaya M.J., Singh U.N. *Opt. Eng.*, **46**, 116201 (2007).
4. Sprangle P., Ting A., Penano J., Fischer R., Hafizi B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **45**, 138 (2009).
5. Creeden D., Ketteridge P.A., Budni P.A., Setzler S.D., Young Y.E., McCarthy J.C., Zawilski K., Schunemann P.G., Pollak T.M., Chicklis E.P., Jiang M. *Opt. Lett.*, **33**, 315 (2008).
6. Swiderski J., Michalska M. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 035105 (2013).
7. Курков А.С., Камынин В.А., Цветков В.Б., Садовникова Я.Э., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **42**, 778 (2012).
8. http://www.qpeak.com/Aboutus/news.shtml.
9. Ehrenreich T., Leveille R., Majid I., Tankala K., in *Proc. SPIE «Fiber Laser VII: Technol. Syst. Applicat.»*, 1-15 (2010).
10. Jackson S.D. *Nature Photon.*, **6**, 423 (2012).
11. Eichhorn M. *Opt. Lett.*, **32**, 1056 (2007).
12. Eichhorn M., Jackson S.D. *Opt. Lett.*, **33**, 1044 (2008).
13. El-Sherif A.F., King T. *Opt. Lett.*, **28**, 22 (2003).
14. Geng J., Wang Q., Luo T., Amzajerdian F., Jiang S. *Opt. Lett.*, **34**, 3713 (2009).
15. Swiderski J., Zajac A., Konieczny P., Skorczakowski M. *Opt. Express*, **12**, 3554 (2004).
16. Tang Y., Li F., Xu J. *IEEE Phot. Tech. Lett.*, **23**, 893 (2011).
17. Simakov N., Hemming A., Bennetts S., Haub J. *Opt. Express*, **19**, 14949 (2011).
18. Zhou R.L., Zhao J., Yuang C., Chen Z.Y., Ju Y.L., Wang Y.Z. *Chin. Phys. Lett.*, **29**, 064201-1 (2012).
19. Jiang M., Tayebati P. *Opt. Lett.*, **32**, 1797 (2007).
20. Swiderski J., Maciejewska M., Kwiatkowski J., Mamajek M. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 015107 (2013).
21. Tang Y., Xu L., Yang Y., Xu J. *Opt. Express*, **18**, 22964 (2010).
22. Tang Y., Li F., Xu J. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 035101 (2013).