

Микросекундная система «задающий генератор – усилитель мощности» ($\lambda = 1958$ нм) с модуляцией коэффициента усиления и высокой энергией импульса*

Кэ Инь, Вэйтян Ян, Бинь Джан, Ин Ли, Дзин Хоу

Представлена полностью волоконная система «задающий генератор – усилитель мощности» с высокой энергией импульса, работающая на длине волны 1958 нм. Генератором затравочного излучения является микросекундный лазер на волокне, легированном тулием (ВЛТ), с модуляцией коэффициента усиления, накачиваемый промышленным импульсным волоконным лазером (1550 нм), работающий с частотой следования импульсов f в диапазоне 10–100 кГц. Двухкаскадный усилитель на ВЛТ создан для масштабирования энергии импульса, генерированного лазером затравочного излучения. Достигнута максимальная энергия выходного импульса более 0.5 мДж при 10 кГц, что сравнимо с теоретической максимальной снимаемой энергией импульса. Дифференциальная эффективность второго каскада усилителя относительно мощности накачки составляет 30.4% при $f = 10$ кГц. Длина волны излучения лазера, генерирующего выходные импульсы, после усиления находится около 1958 нм при спектральной ширине 0.25 нм. Никакие нелинейные эффекты, а также сколь-нибудь существенное усиленное спонтанное излучение в экспериментах по усилению не наблюдались.

Ключевые слова: волоконная система «задающий генератор – усилитель мощности», лазер на волокне, легированном тулием, модуляция коэффициента усиления, высокая энергия импульса.

1. Введение

В последние годы значительное внимание привлекают лазеры на волокне, легированном тулием, излучающие в так называемом «безопасном для глаз» диапазоне [1–3]. Волокна, легированные тулием (ВЛТ), имеют широкий (от 1.8 до 2.1 мкм) спектр усиления и, как было продемонстрировано, являются эффективной активной средой для мощного лазерного источника с высокой энергией излучения на длине волны около 2 мкм [4–6]. Выходная мощность непрерывного лазера на ВЛТ превысила 1 кВт [7]. Для многих научно-технических применений, таких как обработка материалов [8], биомедицина [9], спектроскопия [10], нелинейное преобразование длины волны [11], лазеры с высокой энергией импульса часто представляют больший интерес, чем непрерывные лазеры. Однако оказалось, что усиленное спонтанное излучение (УСИ) и нелинейные явления, такие как вынужденное рассеяние Манделштама–Бриллюэна (ВРМБ), вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) и фазовая автомодуляция (ФАМ), являются основными ограничениями при масштабировании энергии импульса для лазеров на волокне, легированном редкоземельными элементами [12]. На практике активные волокна с большой площадью моды и малой числовой апертурой выгодно использовать для волоконного съема энергии импульса. Если мощность накачки постоянна, то импульсы с меньшей частотой следования f будут соответствовать более высокой энергии импульсов,

однако работа лазера с частотой $f < 10$ кГц сопровождается значительным шумом между импульсами, обусловленным УСИ, что, к сожалению, ограничивает масштабирование энергии импульса. Импульсы с длительностью в несколько микросекунд более пригодны для масштабирования энергии импульса, чем наносекундные импульсы. В настоящее время осуществлен промышленный выпуск волоконных лазеров с высокой энергией и микросекундной длительностью импульса только в области длин волн 1 мкм. Волоконные лазеры с высокой энергией импульса на $\lambda = 2$ мкм из-за отсутствия доступных компонентов до сих пор недостаточно изучены, но все еще представляют большой интерес.

Самая высокая зарегистрированная энергия импульса, полученная непосредственно от мощного лазера с модуляцией добротности на ВЛТ, превысила 2.4 мДж при $f = 13.9$ кГц [13]; в качестве активной среды лазера использовался отрезок волокна в виде стержня с диаметром сердцевины 81 мкм. Однако для дальнейшего масштабирования энергии импульса часто требуются системы «задающий генератор – усилитель мощности» (ЗГУМ). Сообщалось об экспериментах по усилению импульсов на $\lambda = 2$ мкм с энергией выходного импульса до 6.4 мДж в фотонно-кристаллическом ВЛТ в виде стержня с диаметром сердцевины 80 мкм при $f = 1$ кГц [14]. До сих пор еще не побит рекорд по выходной энергии импульса в области 2 мкм установки ЗГУМ [15], в которой был применен двухкаскадный усилитель затравочного импульса с модуляцией коэффициента усиления на активных волокнах со ступенчатым изменением показателя преломления; максимальная энергия выходного импульса составила более 10 мДж. Заметим, что все экспериментальные установки [13–15] содержат объемные элементы, поэтому имеют пониженную стабильность и повышенную чувствительность к внешним условиям, вследствие чего их практическое применение ограничено. Использование полностью волоконных компонентов более приемлемо благодаря их компактно-

* Перевод с англ. Е.А.Витовтовой.

сти, удобству использования и долговременной стабильности.

В настоящей работе описана полностью волоконная система ЗГУМ с модуляцией коэффициента усиления, работающая на длине волны $\lambda = 1958$ нм, с высокой энергией импульса. Затравочные импульсы с частотой f в диапазоне 10–100 кГц генерируются лазером с модуляцией коэффициента усиления. Усиление затравочных импульсов с различными f осуществляется в двухкаскадном волоконном усилителе. Проведено сравнение энергетических характеристик системы ЗГУМ при различных частотах следования импульсов. Максимальная энергия выходного импульса превысила 0.5 мДж при длительности импульса около 1.6 мкс и $f = 10$ кГц, что сравнимо с максимальной снимаемой энергией импульса, накопленной в активном волокне. Полученная пиковая мощность составила около 300 Вт, что гораздо меньше любого порога по энергии при нелинейных явлениях, поэтому в измеренных выходных спектрах никакие нелинейные спектральные компоненты не наблюдались.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для системы ЗГУМ с модуляцией коэффициента усиления и высокой энергией импульса представлена на рис.1. Генератор затравочных импульсов ($\lambda = 1958$ нм) и двухкаскадный усилитель выполнены на ВЛТ. Задающий генератор с модуляцией коэффициента усиления накачивается импульсным волоконным лазером ($\lambda = 1550$ нм), что обеспечивает его быструю работу в режиме модуляции коэффициента усиления [16]. Излучение накачки на 1550 нм подается на генератор затравочных импульсов с помощью мультиплексора 1550/2000 нм. Частота следования импульсов накачки могла перестраиваться от 10 до 100 кГц. Активное волокно представляет собой отрезок одномодового ВЛТ с диаметром сердцевины 9 мкм; числовая апертура равна 0.15, длина волны отсечки – 1.75 мкм, коэффициент поглощения – около 10 дБ/м на 1550 нм. Волоконная брэгговская решетка (ВБР) с коэффициентом отражения 50% на 1958 нм и шириной полосы 2 нм (по уровню 3 дБ) присоединена к мультиплексору и работает в качестве полупрозрачного зеркала. Левый торец задающего генератора представляет собой петлевое зеркало на основе волоконно-оптического ответвителя 50/50 на $\lambda \approx 2$ мкм. Длина активного волокна составляет 2 м, а общая длина генератора затравочных импульсов равна 3 м.

В первом каскаде усилителя используется одномодовое активное ВЛТ длиной 6 м, сердцевина которого накачивается через мультиплексор 1550/2000 нм волоконным эрбиевым лазером (1570 нм) мощностью 800 мВт. Второй каскад усилителя на основе ВЛТ с двойной оболочкой длиной 7 м накачивается двумя многомодовыми

лазерными диодами (ЛД) с волоконными выводами ($\lambda = 790$ нм). Общая выходная мощность диодов 18.8 Вт. Их излучение попадает в ВЛТ с двойной оболочкой с помощью сумматора накачки $(2+1) \times 1$. Диаметр сердцевины/оболочки ВЛТ составляет 10/130 мкм, числовая апертура сердцевины и внутренней оболочки – 0.15 и 0.46 соответственно. Максимальный коэффициент поглощения внутренней оболочки на 790 нм равен ~ 3 дБ/м. К ВЛТ с двойной оболочкой приварен отрезок стандартного одномодового волокна SMF-28 длиной 20 см для поглощения оставшегося излучения накачки. Торец выходного волокна сколот под углом для предотвращения паразитной обратной связи из-за френелевского отражения. Кроме того, перед обоими усилительными каскадами установлены два волоконных изолятора на 1 Вт каждый для гашения обратного излучения. Измерительная система (не изображена на рис.1) состоит из быстродействующего фотодетектора на основе InGaAs, измерителя мощности и оптического спектроанализатора (Yokogawa AQ6375).

3. Результаты и их обсуждение

В первом эксперименте исследовались временные характеристики задающего лазера с модуляцией коэффициента усиления, генерирующего стабильные последовательности импульсов на 1958 нм при регулировке энергии излучения накачки на 1550 нм. Частота следования импульсов могла изменяться от 10 до 100 кГц при длительности импульса 1.6–2.4 мкс. На рис.2 показаны измеренные спектр и форма затравочного импульса с энергией 0.5 мкДж. Ширина спектра по уровню 3 дБ составляет около 0.24 нм при максимальной спектральной интенсивности на 50 дБ выше фонового шума. Импульс имеет гауссову форму, а его длительность равна 1.8 мкс. Так как для дальнейшего масштабирования энергии импульса в волоконных усилителях более предпочтительны затравочные импульсы с низкой частотой следования (см. [12–14, 16]), для экспериментов по двухкаскадному усилению нами выбраны затравочные импульсы с частотами 10, 20 и 100 кГц. Выбранные последовательности затравочных импульсов приведены на рис.3. Хорошо видно, что генерируемые затравочные импульсы на 1958 нм очень стабильны, и в течение экспериментов не наблюдается никакого временного дрожания, что весьма важно для последующего масштабирования энергии импульса.

Во втором эксперименте исследовалось усиление затравочных импульсов при $f = 10, 20$ и 100 кГц, показанных на рис.3. Первый каскад усиливал среднюю выходную мощность последовательностей затравочных импульсов на $\lambda = 1958$ нм примерно до 200 мВт. Средняя выходная мощность и соответствующая расчетная энергия одиночного импульса после второго каскада усилителя в зависимости от мощности накачки на $\lambda_p = 793$ нм приведены на

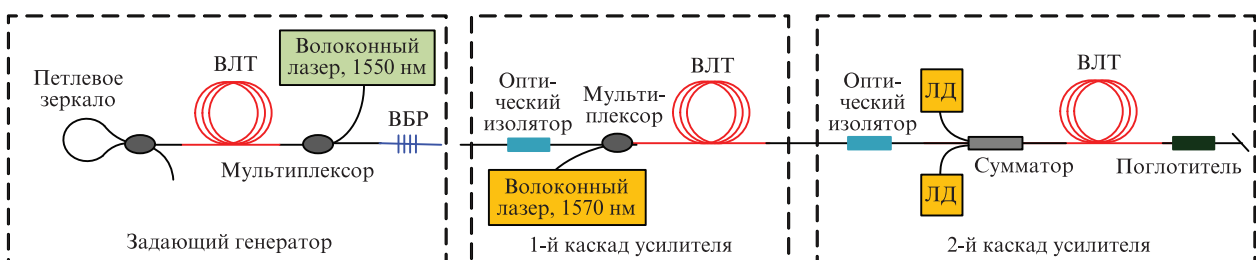


Рис.1. Экспериментальная установка для лазерной системы ЗГУМ с модуляцией коэффициента усиления.

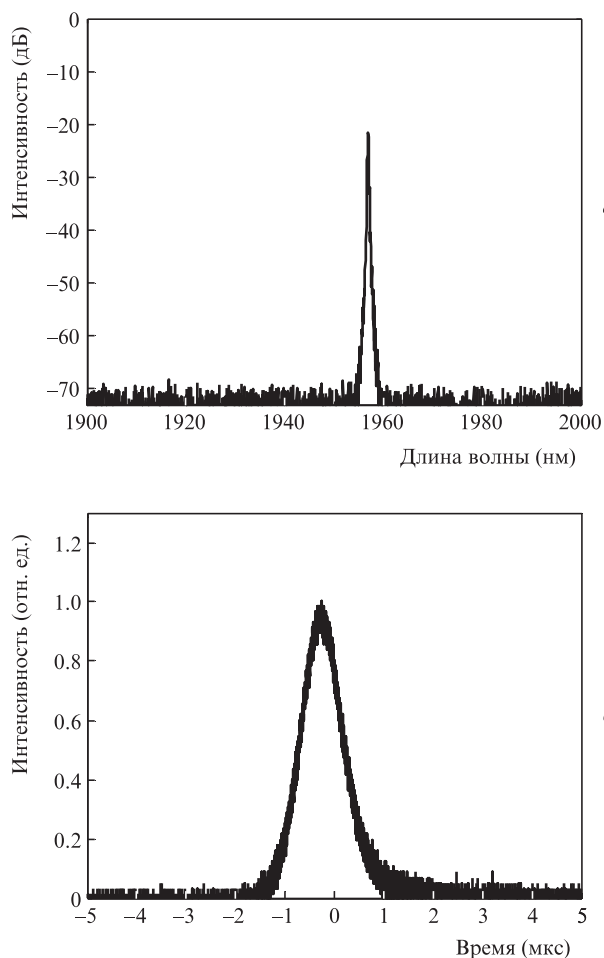


Рис.2. Спектр (а) и форма одиночного затравочного импульса (б) при $f = 10$ кГц.

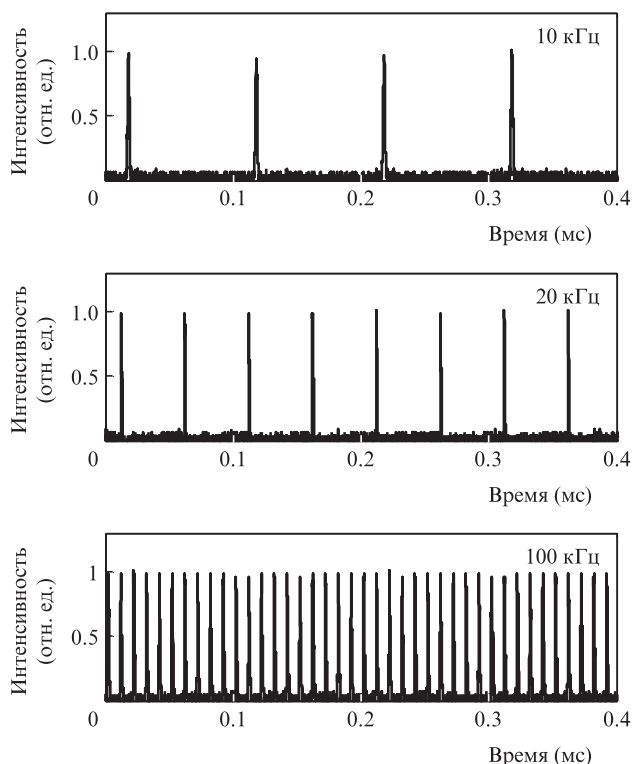


Рис.3. Последовательности выходных импульсов задающего лазера с модуляцией коэффициента усиления.

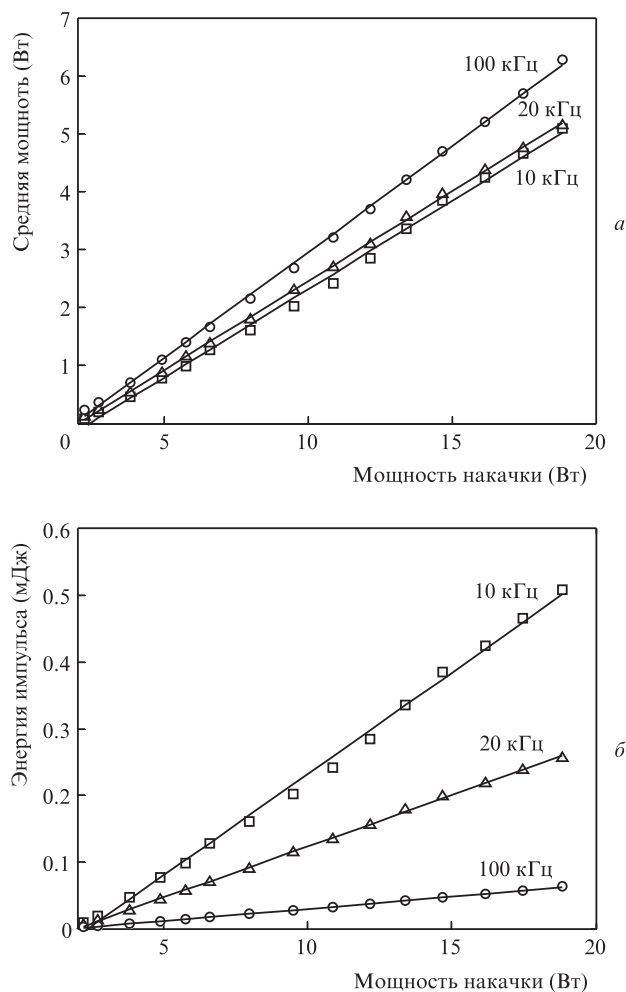


Рис.4. Зависимости средней мощности (а) и энергии импульса (б) на выходе второго каскада усилителя при $f = 10, 20$ и 100 кГц ($\lambda = 1958$ нм) от мощности накачки ($\lambda_p = 793$ нм).

рис.4. Для частот следования импульсов 10, 20 и 100 кГц получены максимальные выходные мощности 5.06, 5.14 и 6.28 Вт соответственно. Средние выходные мощности с увеличением мощности накачки возрастают линейно с дифференциальными эффективностями 30.4%, 30.7% и 36.5% для 10, 20 и 100 кГц соответственно. Самая высокая энергия выходного импульса (0.518 мДж) получена при $f = 10$ кГц. С ростом максимальной энергии выходного импульса длительность импульса немного уменьшается (от 1.8 до 1.6 мкс), что может быть вызвано снижением усиления во втором каскаде. Соответствующая наибольшая пиковая мощность составляет около 300 Вт.

На рис.5 показаны спектры излучения на выходе второго каскада усилителя при максимальной выходной мощности и $f = 10, 20$ и 100 кГц. С уменьшением частоты следования затравочных импульсов от 100 до 10 кГц все большая доля мощности накачки передается шуму, обусловленному УСИ, что приводит к увеличению спектральной мощности УСИ. Благодаря микросекундной длительности затравочного импульса и, соответственно, высокой скважности даже при $f = 10$ кГц измеренный спектр лазера на $\lambda = 1958$ нм все же на 40 дБ выше шума, обусловленного УСИ. Даже после второго каскада усилителя спектр заметно не расширяется, и никакие новые спектральные компоненты не регистрируются, что говорит об отсутствии нелинейных эффектов в нашей системе ЗГУМ.

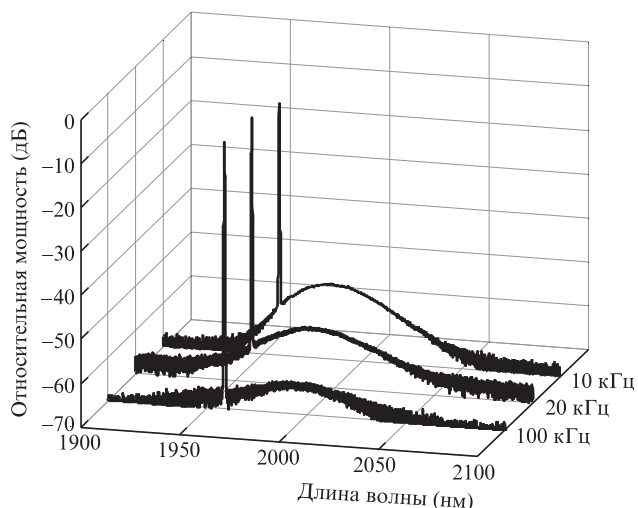


Рис.5. Спектры импульсов излучения на выходе второго каскада усилителя при $f = 10, 20$ и 100 кГц.

Согласно расчетам пороги ВКР, ВРМБ и ФАМ во втором каскаде усилителя для данной экспериментальной установки находятся на уровне 1 кВт, что значительно превышает 300 Вт. Максимальная энергия выходного импульса достигает 0.518 мДж, что сравнимо с расчетной максимальной снимаемой энергией импульса (ограниченной УСИ) 0.6 мДж в ВЛТ с диаметром сердцевины/оболочки 10/130 мкм [12]. Это указывает на то, что энергия выходного импульса системы ЗГУМ достигла верхнего предела для масштабирования энергии импульса в таком активном волокне. Если требуется продолжать масштабирование энергии выходного импульса лазера на 1958 нм, следует иметь активные волокна с существенно большим диаметром сердцевины, а также более высокую мощность накачки, что является темой нашей следующей работы.

4. Заключение

Описана полностью волоконная система ЗГУМ на $\lambda = 1958$ нм с высокой энергией импульса (максимальная энергия более 0.5 мДж при длительности выходного импульса 1.6 мкс). Дифференциальная эффективность второго каскада усилителя относительно мощности накачки составляет около 30% при частоте следования импульсов

10 кГц. В экспериментах по усилению не зарегистрированы никакие нелинейные эффекты и не наблюдалось существенного УСИ (контроль осуществлялся по выходному спектру второго каскада усилителя в системе ЗГУМ). Теоретическая оценка позволяет говорить о возможности масштабирования энергии выходного импульса при использовании активных волокон с большим диаметром сердцевины при достаточной мощности накачки ЛД на $\lambda = 790$ нм. В нашей следующей работе будут оптимизированы характеристики этой системы ЗГУМ с модуляцией коэффициента усиления и продолжено масштабирование энергии выходного импульса.

Настоящая работа выполнена при поддержке Международной программы по сотрудничеству в области науки и техники Китая (грант № 2012DFG11470).

- Geng J., Wang Q., Jiang S. *Proc. SPIE*, **8164**, 816409 (2011).
- Shah L., Sims A., Kadwani P., Bradford J.D., Willis C.C., Richardson M. in *Specialty Optical Fibers*, (Colorado Springs, USA, 2012, paper STu4F.1).
- Shah L., McComb T.S., Sims R.A., Willis C.C., Kadwani P., Sudesh V., Richardson M., in *Intern. Symp. High Power Laser Ablation* (Melville: AIP, 2010, vol. 1278, p. 852).
- Yang W., Hou J., Zhang B., Song R., Liu Z. *Appl. Opt.*, **51**, 5664 (2012).
- Jackson S.D. *Nat. Photon.*, **6**, 423 (2012).
- Peterka P., Faure B., Blanc W., Karasek M., Dussardier B. *Opt. Quantum Electron.*, **36**, 201 (2004).
- Ehrenreich T., Leveille R., Majid I., Tankala K., Rines G., Moulton P. in *Fiber Lasers III: Technology, Systems, and Applications* (Bellingham, 2010, p. 7580).
- Mingareev I., Weirauch F., Olowinsky A., Shah L., Kadwani P., Richardson M. *Opt. Laser Technol.*, **44**, 2095 (2012).
- Warnaby C.E., Coleman D.J., King T.A. *Therap. Laser Appl. Laser-Tissue Interact.* (Bellingham: SPIE, 2003, vol. 5142, p. 68).
- Baudelet M., Willis C.C., Shah L., Richardson M. *Opt. Express*, **18**, 7905 (2010).
- Creeden D., Ketteridge P.A., Budni P., Zawilski K., Schunemann P.G., Pollak T.M., Chicklis E.P. *Conf. Lasers and Electro-Optics, Conf. Quantum Electron. Laser Sci (CLEO/QELS 2008)* (San Jose, California, USA, 2008, paper CTuII2).
- Sintov Y., Katz O., Glick Y., Acco S., Nafcha Y., Englander A., Lavi R. *J. Opt. Soc. Am. B*, **23**, 218 (2006).
- Stutzki F., Jansen F., Jauregui C., Limpert J., Tünnemann A. *Opt. Lett.*, **38**, 97 (2013).
- Gaida C., Gebhardt M., Kadwani P., Leick L., Broeng J., Shah L., Richardson M. *Opt. Lett.*, **38**, 691 (2013).
- Tang Y., Xu L., Yang Y., Xu J. *Opt. Express*, **18**, 22964 (2010).
- Di Teodoro F., in *High-Power Laser Handbook* (McGraw-Hill, 2011, p. 463).