

Импульсный высокоэнергетичный волоконный лазер на основе сдвоенного световода

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, Ю.С.Федотов

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность создания относительно простой волоконной лазерной системы с пассивной модуляцией добротности резонатора задающего генератора, имеющей энергию импульсов выходного поляризованного излучения ($\lambda_g = 1080$ нм) до 110 мкДж при накачке одним источником непрерывного многомодового излучения мощностью 12 Вт ($\lambda_p = 980$ нм). В зависимости от мощности излучения накачки длительность генерируемых импульсов системы может изменяться от 280 нс до 1.8 мкс, а частота следования импульсов – от 45 до 140 кГц. Максимальная средняя мощность выходного излучения лазерной системы составила 5 Вт. Приведены результаты применения созданного лазера для обработки металлов и стекол.

Ключевые слова: волоконный иттербиевый лазер, модуляция добротности, сдвоенный световод, волоконный усилитель.

1. Введение

Лазеры с относительно высокой энергией импульсов излучения (0.1–1 мДж и более) широко используются в различных приложениях, в том числе для обработки (маркировки и т.д.) материалов. Множество таких источников излучения создается на базе твердотельных лазеров (Nd:YAG/YVO₄, Yb:YAG, Nd:YLF и других) [1, 2], в том числе с использованием гибридных твердотельно-волоконных технологий [3], однако параллельно разрабатываются и осуществляются конкурентные решения подобных источников на базе волоконных лазеров [4–10]. Для достижения высокой энергии импульсов излучения такие системы традиционно основываются на схеме задающий генератор–усилитель; при этом в волоконных системах для задающего генератора и для усилителя практически всегда используются разные источники накачки. Это связано с тем, что волоконные ответвители излучения не способны работать при высоких мощностях излучения и, таким образом, не могут обеспечить отведение небольшой части излучения от мощного источника накачки на задающий генератор. Поэтому волоконный задающий генератор имеет, как правило, отдельный, относительно маломощный источник накачки, а усилитель накачивается излучением одного или нескольких [9, 10] мощных источников.

Впервые одиночный источник накачки для волоконной системы генератор–усилитель, работающей в режиме модуляции добротности, был применен в [11]. Излучение от непрерывного Ti:сапфирового лазера с длиной волны $\lambda_p = 980$ нм заводилось в волоконный Er-усили-

тель, а выходящее из усилителя остаточное излучение на этой длине волны использовалось для накачки волоконного задающего Er-генератора. При мощности одномодового излучения накачки 2.1 Вт были получены импульсы с энергией до 0.11 мДж при частоте следования менее 10 кГц и средней мощности излучения 190 мВт. Недостаток предложенной в [11] схемы состоит в необходимости ограничения коэффициента усиления усилителя для обеспечения требуемой мощности остаточного возбуждающего излучения, используемого для накачки задающего генератора. В данной работе мы впервые применили альтернативный подход к созданию системы генератор–усилитель с единственным источником накачки. В предложенной нами схеме излучение накачки заводится сначала в задающий генератор, а неиспользованное в задающем генераторе излучение применяется для накачки усилителя. Как показано ниже, этот подход может быть реализован в случае сдвоенного световода с боковой накачкой (так называемого GTWave-волокна [12, 13]), на базе которого может быть создан как усилитель, так и задающий генератор.

Конструкция сдвоенных световодов, один из которых является активным [12], обеспечивает возможность простой и эффективной боковой накачки активного световода через стандартный пассивный кварцевый световод. Излучение накачки переходит в оболочку активного световода из оболочки пассивного благодаря оптическому контакту этих световодов по всей их длине. При стандартных концентрациях ионов, например Yb, в активном волокне его длина (назовем ее оптимальной) должна составлять 20–25 м для поглощения ~90% излучения накачки из пассивного световода. Уменьшение длины активного световода относительно оптимальной позволяет использовать «излишек» излучения накачки в усилительном каскаде (или в нескольких усилительных каскадах) системы. В связи с этим для создания задающего генератора может применяться укороченный сдвоенный световод, а неиспользованное в задающем генераторе из-

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин, Ю.С.Федотов. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2
e-mail: kobtsev@lab.nsu.ru

Поступила в редакцию 18 апреля 2008 г., после доработки – 19 октября 2008 г.

лучение накачки может быть заведено в аналогичный сдвоенный световод одного или нескольких усилительных каскадов.

Именно такая система на основе волоконного лазера с пассивной модуляцией добротности была впервые предложена и экспериментально опробована нами в данной работе.

2. Эксперимент

Схема экспериментальной установки приведена на рис.1. Задающий генератор был создан с использованием сдвоенного волокна (Yb – кварцевое стекло) длиной 3 или 5 м с диаметром сердцевинки активного волокна 7 мкм и диаметром оболочки активного (Yb) и пассивного (кварц) световодов 125 мкм. Ввод и вывод излучения из активного волокна осуществлялись с помощью микрообъективов. Пассивная модуляция добротности обеспечивалась с помощью зеркала с насыщающимся полупроводниковым поглотителем с глубиной модуляции коэффициента отражения 15% на длине волны 1080 нм. Излучение на это зеркало заводилось линзой с фокусным расстоянием 100 мм. Выходным зеркалом лазера служил поляризационный делительный кубик, обеспечивающий также линейную поляризацию выходного излучения задающего лазера. Излучение ортогональной поляризации, отраженное от делительного кубика, возвращалось в резонатор лазера с помощью плотного зеркала.

На рис.2 приведен характерный вид импульсов, генерируемых системой. Видно, что основной импульс промодулирован спутными высокочастотными импульсами относительно небольшой амплитуды, причем время между ними соответствует времени обхода резонатора лазера (38 нс для резонатора задающего лазера длиной ~5 м). Длительность спутных импульсов не превышает 10 нс, и их наличие является признаком начальной стадии режима синхронизации мод лазера, который, однако, в полной мере не был реализован в данной конфигурации лазера.

Режим пассивной модуляции добротности резонатора лазера был достаточно устойчив во всем диапазоне выходных мощностей излучения задающего генератора (до 200 мВт), при этом изменение выходной мощности лазера сопровождалось изменением длительности и частоты следования импульсов. Зависимости этих пара-

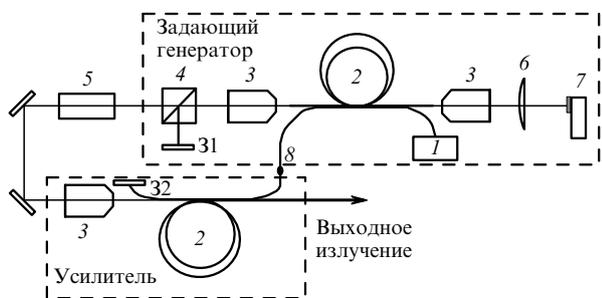


Рис.1. Схема волоконного лазера на основе сдвоенного световода: 1 – лазерный диод накачки; 2 – сдвоенный световод; 3 – микрообъектив; 4 – поляризационный делитель; 5 – фарадеевский изолятор; 6 – фокусирующая линза; 7 – зеркало с насыщающимся поглотителем; 8 – точка сварки пассивных кварцевых волокон, по которым распространяется излучение накачки; 31, 32 – плотные зеркала для излучения задающего генератора и накачки соответственно.

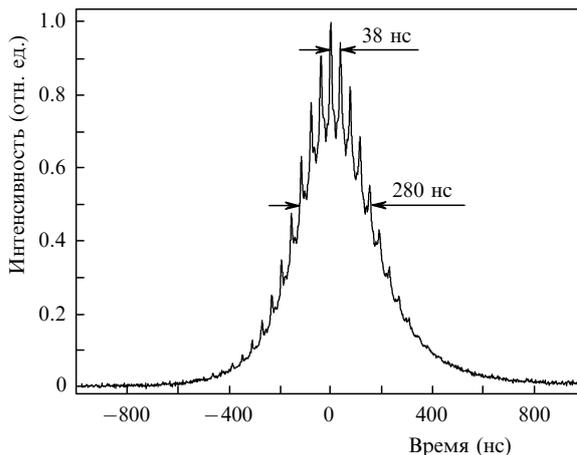


Рис.2. Импульс излучения лазерной системы (период следования спутных импульсов 38 нс).

метров от выходной мощности излучения задающего генератора приведены на рис.3. Длительность импульсов варьировалась от 1.8 мкс до 280 нс при максимальной мощности выходного излучения, а частота следования импульсов соответственно изменялась в диапазоне 45–140 кГц. Для накачки задающего генератора (и всей системы) использовался многодиодный диодный лазер ($\lambda_p = 980$ нм) мощностью 12 Вт, излучение которого, выходящее через волокно 116/125 мкм, могло быть введено в пассивное волокно сдвоенного световода с помощью сварки. Из-за малой длины задающего генератора в нем поглощалась малая часть излучения накачки (2–3 Вт), а остальная часть вводилась в пассивный световод

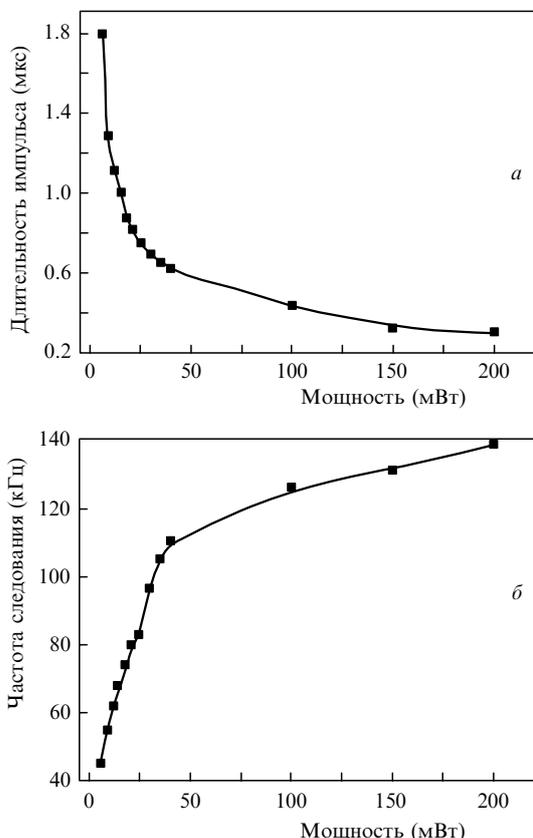


Рис.3. Зависимости длительности (а) и частоты следования (б) генерируемых импульсов от мощности излучения задающего генератора.

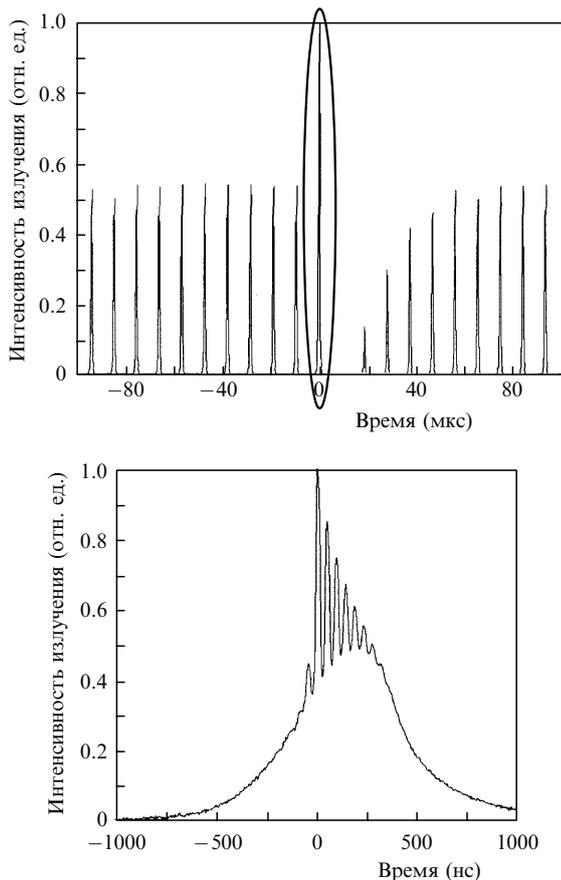


Рис.4. Временное распределение интенсивности излучения лазерной системы в режиме нестабильности генерации, возникающей из-за обратной световой связи между задающим генератором и усилителем при больших мощностях излучения.

аналогичного сдвоенного световода, который использовался в качестве усилителя. Выходное излучение задающего генератора вводилось в активное волокно усилителя при помощи микрообъектива. Средняя мощность излучения на выходе усилителя достигала 5 Вт, что соответствовало энергии выходных импульсов 36 мкДж при максимальной частоте следования (140 кГц) или 110 мкДж при минимальной частоте (45 кГц).

При средней мощности выходного излучения более 5 Вт наблюдалась нестабильность работы лазерной системы, вызванная неполной оптической развязкой задающего генератора и усилителя. Входные/выходные торцы используемых световодов были перпендикулярны осям световодов, что при относительно высокой мощности излучения способствовало образованию системы связанных резонаторов, несмотря на использование однокаскадного фарадеевского изолятора между задающим генератором и усилителем. При этом в последовательности импульсов появлялись нерегулярные более мощные импульсы излучения. Характерное временное распределение интенсивности излучения системы в этом нестабильном режиме генерации приведено на рис.4. Временное распределение интенсивности излучения более мощных нерегулярных импульсов отличается от такового для импульсов, генерируемых в стационарном режиме, увеличенной амплитудой спутанных высокочастотных пиков в верхней части импульса.

При средней мощности выходного излучения системы менее 5 Вт стабильная генерация импульсов имела место во всем диапазоне мощностей излучения. Прохождение излучения через усилитель не сопровождалось изменением поляризации, хотя в усилителе использовалось активное волокно, не поддерживающее поляризацию излучения. Тем не менее излучение на выходе усилителя бы-

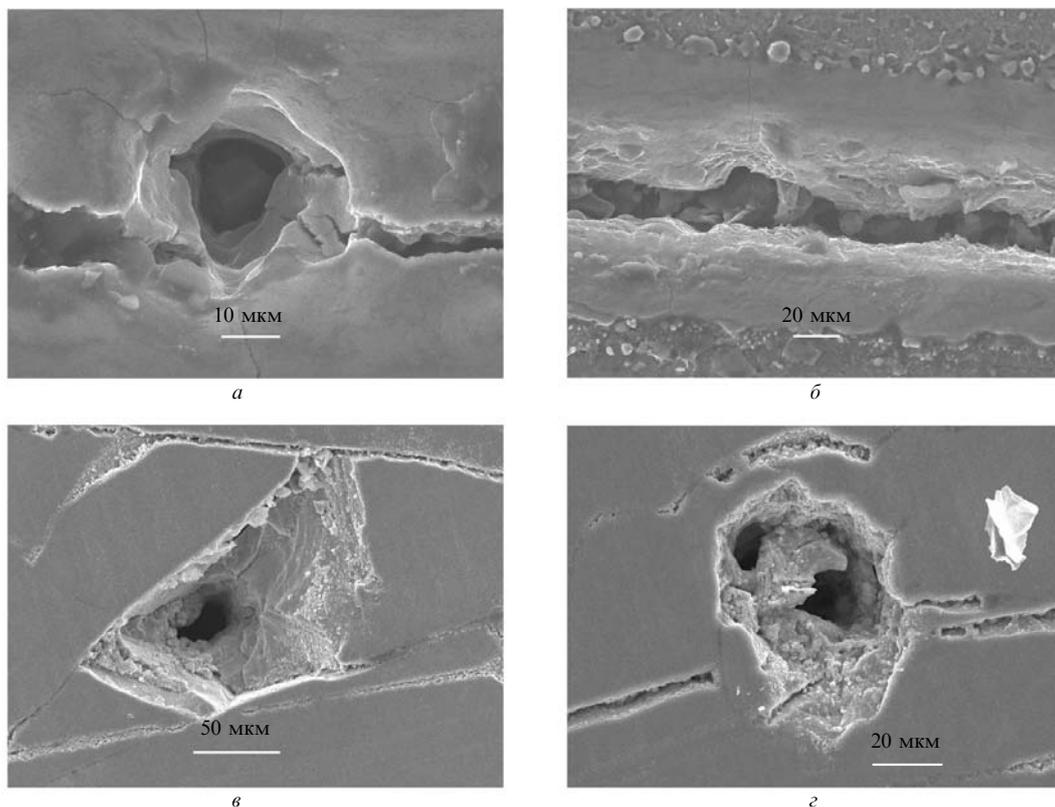


Рис.5. Структурные изменения поверхностей и приповерхностных областей нержавеющей стали (а, б) и халькогенидного стекла (в, г) под действием сфокусированного излучения лазерной системы. Фотографии получены с помощью электронного микроскопа.

ло линейно поляризованным, что открывает возможности для дальнейшего спектрального нелинейного преобразования излучения этой лазерной системы.

3. Применение системы для обработки металлов и стекол

Относительно высокая энергия импульсов разработанной лазерной системы (до 110 мкДж) позволяет использовать ее для лазерной маркировки (гравировки) как металлических, так и стеклянных поверхностей. На рис.5 приведены фотографии поверхностей материалов, подвергнутых воздействию сфокусированного пучка при энергии импульсов 30–50 мкДж. Фокусировка излучения производилась микрообъективом 8×0.2 . Под действием излучения на поверхностях металла (нержавеющая сталь) и халькогенидного стекла появились структурные изменения, вызванные локальным расплавлением и испарением поверхности вещества. Необходимо отметить, что при определенных режимах обработки материалов наблюдалась некоторая (на уровне 15%–25%) кратковременная модуляция мощности выходного излучения системы, вызванная тем, что часть излучения, отраженного от обрабатываемой поверхности, попадала назад в усилитель и, возможно, в задающий генератор. Однако возникновение этой модуляции не приводило к необратимым изменениям каких-либо параметров излучения лазерной системы.

4. Заключение

Таким образом, впервые экспериментально продемонстрирована возможность создания относительно простой волоконной лазерной системы с пассивной модуляцией добротности, имеющей энергию импульсов выходного поляризованного излучения до 110 мкДж на длине волны 1080 нм при накачке одним источником непрерывного многомодового излучения мощностью 12 Вт с длиной волны 980 нм. В зависимости от мощности излучения накачки длительность генерируемых импульсов разработанной системы может изменяться от 280 нс до 1.8 мкс, а частота следования варьируется от 45 до 140 кГц. Максимальная средняя мощность выходного излучения системы составила 5 Вт. Необходимо отметить, что сред-

няя выходная мощность лазерной системы (и энергия импульсов излучения) может быть легко увеличена при помещении между задающим генератором и усилителем фарадеевского изолятора с большей степенью подавления обратного излучения.

Результаты применения созданной системы для обработки металлов и стекол позволяют сделать вывод о перспективности использования разработанной волоконной лазерной системы оригинальной конфигурации с одним относительно маломощным источником непрерывного излучения для задач лазерной маркировки (гравировки) материалов и других технологических процессов, требующих относительно высокой энергии импульсов лазерного излучения.

Данная работа проведена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям (госконтракт № 02.513.11.3360), а также ведущей научной школы РФ чл.-корр. РАН А.М.Шалагина и чл.-корр. РАН С.Г.Паутиана.

1. Gower M.C. *Opt. Express*, **7**, 56 (2000).
2. Steen W.M. *Laser Material Processing* (London – Berlin – Heidelberg: Springer-Verlag, 2003).
3. Salas-Montiel R., Bastard L., Grosa G., Broquin J. *Mater. Sci. Eng. B*, **149**, 181 (2008).
4. Richardson D.J., Britton P., Taverner D. *Electron. Lett.*, **33**, 1955 (1997).
5. Mackenzie J.I., Shepherd D.P. *Opt. Lett.*, **27**, 2161 (2002).
6. Висенте С.Х., Гамес М.А., Кирьянов А.В., Барменков Ю.О., Андрес М.В. *Квантовая электроника*, **34**, 310 (2004).
7. Грух Д.А., Левченко А.Е., Курков А.С., Парамонов В.М. *Квантовая электроника*, **35**, 442 (2005).
8. Materials Processing with Fiber Lasers. http://www.ipgphotonics.com/apps_materials_lab.htm
9. Roser F., Schimpf D., Schmidt O., Ortac B., Rademaker K., Limpert J., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **32**, 2230 (2007).
10. Tanigawa S., Tanaka H., Kitabayashi T., Saito M., Shimada N., Nakai M., Shima K., Sakai T., Shimokoshi K., Taya H. *Fujikura Techn. Rev.*, № 36, 5 (2007).
11. Paschotta R., Haring R., Gini E., Melchior H., Keller U., Offerhaus H.L., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **24**, 388 (1999).
12. Grudinin A.B., Payne D.N., Turner P.W., Nilsson L.J.A., Zervas M.N., Ibsen M., Durkin M.K. Patent USA, No 6826335, 30.11.2004.
13. Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Бубнов М.М., Шубин А.В., Семенов С.Л., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 996 (2005).