

Иттербиевый волоконный лазер с самомодуляцией добротности и внутриврезонаторным преобразованием спектра

Д.А.Грух, А.Е.Левченко, А.С.Курков, В.М.Парамонов

Создан импульсный волоконный лазер на основе активного световода с многоэлементной оболочкой и дополнительным отрезком одномодового световода для обеспечения нелинейной обратной связи. Пиковая мощность излучения составила около 1 кВт при длительностью импульсов ~ 20 нс. Исследованы спектры излучения лазера с дополнительными световодами, имеющими различные нелинейные и дисперсионные свойства.

Ключевые слова: иттербиевый волоконный лазер, модуляция добротности, нелинейная обратная связь.

1. Введение

В настоящее время волоконные лазеры различных конфигураций являются объектом интенсивных исследований [1]. К наиболее распространенному типу таких устройств принадлежат иттербиевые волоконные лазеры с накачкой в оболочку от мощных полупроводниковых источников. Благодаря высокой эффективности и выходной непрерывной мощности, достигающей $\sim 10^3$ Вт, иттербиевые лазеры находят применение в системах связи, при обработке материалов, в медицине и других областях. В то же время импульсный режим работы позволяет получить высокие пиковые мощности и расширить границы возможных применений иттербиевых лазеров. Следует подчеркнуть, что наибольший интерес представляет лазер, работающий в импульсном режиме без использования объемных элементов (модуляторов, затворов и пр.), поскольку это позволяет сохранить такие достоинства волоконного лазера, как компактность и отсутствие юстировочных узлов.

Одним из типов импульсных лазеров в чисто волоконном исполнении являются волоконные лазеры с самомодуляцией добротности. Принцип их работы основан на подавлении постоянной обратной связи и использовании нелинейной обратной связи, возникающей благодаря ВРМБ, причиной которого является обратное рэлеевское рассеяние [2]. Следует отметить, что, как правило, длина активного световода, формирующего резонатор, недостаточна для получения обратной связи, поэтому в схеме импульсного лазера применяются дополнительные волоконные элементы. Так, в работе [3] использовалась конфигурация лазера с дополнительным волоконным кольцом в резонаторе, при этом световод накачивался в сердцевину. В работе [4] данный принцип был распространен на лазеры с накачкой в оболочку. В обоих случаях был получен импульсный режим генерации с длительностью импульсов 2 – 10 нс и пиковой мощ-

ностью до 10 кВт. В работе [5] к выходу активного волоконного световода, легированного ионами Nd^{3+} , приваривался дополнительный отрезок одномодового световода, не содержащего активной примеси. В последнем случае следует ожидать не только установления импульсного режима, но и преобразования спектра лазерного излучения за счет нелинейных эффектов, возникающих в дополнительном отрезке световода из-за высокой пиковой мощности генерации. Очевидно, что характер преобразования спектра зависит как от мощности генерации, так и от оптических свойств и длины используемого световода.

В данной работе приведены результаты, полученные при использовании в резонаторе импульсного лазера дополнительных световодов различных типов. Следует отметить, что преобразование спектра лазерного излучения существенно увеличивает возможность попадания мощного излучения на источник накачки и, следовательно, его повреждения. Поэтому в данной работе для оптической развязки лазера и источника накачки в качестве активной среды лазера используется световод с многоэлементной оболочкой.

2. Схема эксперимента

На рис.1 представлена схема импульсного волоконного лазера. Его активной средой служил световод с многоэлементной оболочкой (GTWave-световод) [6], который представляет собой сборку двух световодов, находящихся в оптическом контакте, с общим покрытием из полимера с меньшим, чем у кварцевого стекла, показателем преломления. Один из световодов имеет активную

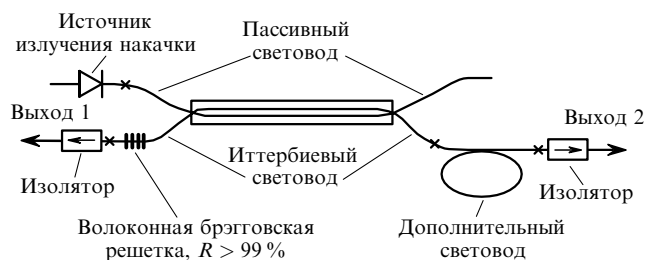


Рис.1. Схема импульсного волоконного лазера (крестиками помечены точки сварки).

Д.А.Грух, А.Е.Левченко, А.С.Курков, В.М.Парамонов. Научный центр волоконной оптики Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kurkov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 16 февраля 2005 г.

сердцевину, легированную ионами Yb^{3+} , где возникает лазерная генерация. Второй (пассивный) представляет собой стержень из кварцевого стекла и служит для ввода излучения накачки, часть которого затем перетекает в оболочку активного световода. Так как в оптическом контакте с пассивным световодом находится только оболочка активного световода, лазерное излучение не попадает в пассивный световод. Таким образом, источник накачки и волоконный лазер оказываются оптически развязанными. К достоинствам световода с многоэлементной оболочкой следует также отнести возможность контроля излучения, выходящего с обоих торцов активного световода. Концентрация ионов иттербия в активном световоде составляла около $4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$, диаметр сердцевинки – 6 мкм, диаметр оболочки обоих световодов был равен ~ 120 мкм, длина активного световода лазера – 15 м.

К одному из торцов активного световода приваривалась брэгговская решетка с высоким коэффициентом отражения, к другому – дополнительный световод для повышения сигнала обратного рассеяния. С целью подавления постоянной обратной связи, вызванной отражением от торцов световода, к волоконным выходам приваривались оптические изоляторы. В качестве источника накачки использовалась сборка излучающих в области 976 нм лазерных диодов («Милон-Лазер», С.-Петербург). Мощность используемого для накачки источника ограничивалась предельной паспортной пропускной мощностью изолятора, составляющей 300 мВт.

Для увеличения сигнала обратного рассеяния использовались 20-метровые отрезки трех различных световодов: с сердцевинкой на основе германосиликатного стекла, с сердцевинкой на основе германатного стекла и с сердцевинкой на основе кварцевого стекла и микроструктурированной оболочкой, образованной четырьмя слоями отверстий. Основные параметры световодов приведены в табл. 1. Длина волны нулевой хроматической дисперсии световодов на основе германосиликатного и германатного стекла оценивалась по профилю показателя преломления, а для световода с микроструктурированной оболочкой измерялась интерференционным методом [7].

3. Основные результаты

С помощью световода № 1 (см. табл.1), параметры которого близки к параметрам телекоммуникационных световодов, была получена импульсно-периодическая генерация. Длительность импульса на выходе 2 (см. рис.1) составляла около 20 нс, а на выходе 1 – примерно 3 нс. Осциллограммы импульсов показаны на рис.2. Различие в форме импульсов объясняется тем, что на выходе 1 наблюдается генерация на длинах волн, не совпадающих с длиной волны отражения брэгговской решетки, в частности на длинах волн ВРМБ-компонент. Средняя выходная мощность на выходе 2 равна 280 мВт при мощности накачки 1.8 Вт, пиковая мощность – около 1.5 кВт.

Табл.1. Параметры использованных световодов.

Номер световода	Состав сердцевинки	Молярная концентрация GeO_2 (%)	Диаметр сердцевинки (мкм)	Длина волны нулевой дисперсии (мкм)	Оптические потери на 1.1 мкм (дБ/км)
1	$\text{SiO}_2/\text{GeO}_2$	6	5.5	1.45	1
2	$\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$	75	2	> 2	120
3	SiO_2	–	5	1.15	70

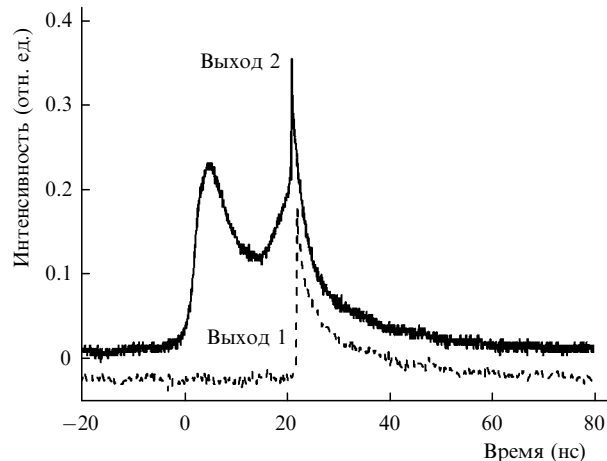


Рис.2. Осциллограммы импульсов на разных выходах лазера.

На выходе 1 средняя мощность составляет около 30 мВт. Частота следования импульсов линейно зависит от мощности накачки и достигает ~ 10 кГц при максимальной мощности. Нестабильность частоты следования равна 10 % – 15 %.

На рис.3 представлены спектры излучения лазера, измеренные на обоих выходах. Видно, что в спектре излучения, прошедшего через отрезок дополнительного световода (выход 2), появились новые компоненты, соответствующие вынужденному комбинационному рассеянию. При этом доля мощности в спектральной области, соответствующей собственно лазерной генерации, составляет около 70 %. Спектр излучения на выходе 1 менее трансформирован, т.к. он формируется практически за один проход и вклад излучения от дополнительного отрезка световода менее существен.

Безусловный интерес представляет использование в резонаторе лазера световодов с высокой нелинейностью, в частности световода с сердцевинкой на основе германатного стекла (световод № 2, табл.1) [8]. Благодаря высокой концентрации двуокиси германия и малому диаметру сердцевинки такие световоды обладают большим коэффициентом ВКР-усиления, составляющим около 300

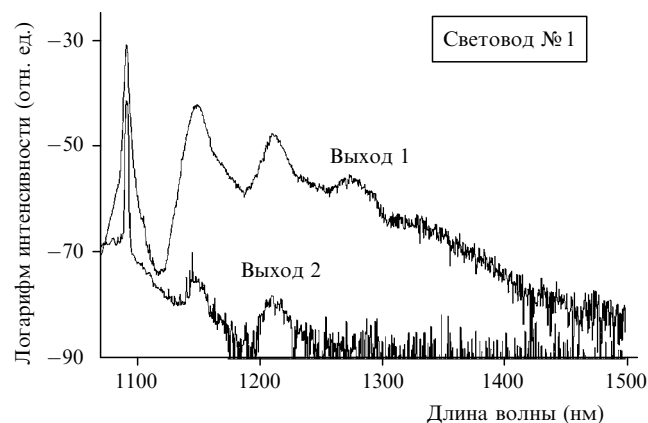


Рис.3. Спектры излучения лазера с дополнительным отрезком световода на основе германосиликатного стекла.

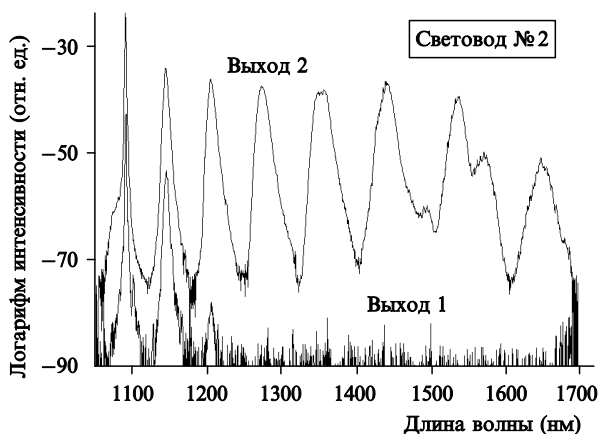


Рис.4. Спектры излучения лазера с дополнительным отрезком световода на основе германатного стекла.

дБ·км⁻¹·Вт⁻¹ в спектральной области вблизи 1.1 мкм [9] (для световода № 1 этот коэффициент равен примерно 5 дБ·км⁻¹·Вт⁻¹). Лазер с дополнительным отрезком германатного световода № 2 имел выходную среднюю мощность 260 мВт при мощности накачки 1.8 Вт. Его временная и частотная характеристики были аналогичны характеристикам лазера со световодом № 1, тогда как спектр излучения существенно трансформировался: мощность излучения распределилась по дискретным стоксовым компонентам во всем исследованном спектральном диапазоне (рис.4). Дискретность структуры спектра объясняется тем, что длина волны нулевой хроматической дисперсии в световоде № 2 лежит в области длин волн более 2 мкм, т. е. преобразование спектра происходит в области нормальной дисперсии групповых скоростей. Доля мощности в стоксовых компонентах составляет около 70 %, и она достаточно равномерно распределена по шести компонентам – относительные доли в каждой из них колеблются от 9 % до 15 %. Отсутствие характерного падения мощности с ростом номера стоксовой компоненты может быть связано с уменьшением оптических потерь со 120 дБ/км на длине волны 1.1 мкм до 25 дБ/км на длине волны 1.7 мкм. Таким образом, полученный лазер может рассматриваться как источник излучения на нескольких длинах волн. На выходе 1 наблюдалось излучение в основном на длине волны лазерной генерации с мощностью на порядок ниже мощности на выходе 2.

Последний образец из использованных в резонаторе дополнительных световодов имел микроструктурированную оболочку (световод № 3, табл.1). Следует отметить, что данный образец не обладал высокими нелинейными свойствами из-за большого диаметра сердцевины и отсутствия в ней легирующих добавок. Однако близость длины волны генерации к длине волны нулевой хроматической дисперсии обуславливает некоторую специфику спектрального преобразования.

На рис.5 представлены спектры излучения лазера с дополнительным микроструктурированным световодом. Спектр на выходе 2 характеризуется наличием одной ВКР-компоненты, длина волны которой практически совпадает с длиной волны нулевой хроматической дисперсии. В области аномальной дисперсии групповых скоростей наблюдается сплошной спектр. Генерация суперконтинуума имеет место и на длинах волн короче длины волны генерации, что объясняется влиянием параметрических процессов. Доля мощности вне основного пика ге-

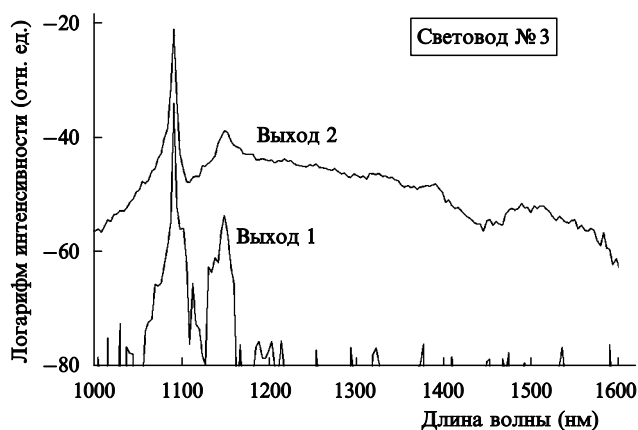


Рис.5. Спектры излучения лазера с дополнительным отрезком световода с микроструктурированной оболочкой.

нерации составляет около 25 %. Следует ожидать, что использование световода с меньшим диаметром сердцевины позволит увеличить долю мощности, преобразованной в суперконтинуум. Спектр излучения на выходе 1 имеет такой же характер, как и для других образцов дополнительного световода.

4. Заключение

Таким образом, использование активного световода с многоэлементной оболочкой и дополнительным отрезком одномодового световода позволяет достаточно просто реализовать импульсный волоконный лазер с пиковой мощностью около 1 кВт и наносекундной длительностью импульсов. Исследованы спектры излучения лазера с различными дополнительными световодами. Обнаружено, что использование в резонаторе световода с сердцевиной на основе германатного стекла приводит к распределению выходной мощности по нескольким дискретным ВКР-компонентам. Применение световода с микроструктурированной оболочкой позволяет получить генерацию суперконтинуума.

Авторы благодарят В.Ф.Хопина и В.М.Машинского за предоставление волоконного световода с сердцевиной на основе германатного стекла и А.В.Гладышева за помощь при проведении измерений.

1. Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34**, 881 (2004).
2. Chernikov S.V., Fotiadi A.A. *Proc. Conf. on Laser and Electro-Optics* (Baltimore, 1997, p.477).
3. Chernikov S.V., Zhu Y., Taylor J.R., Gapontsev V.P. *Opt. Lett.*, **22**, 298 (1997).
4. Грух Д.А., Курков А.С., Раздобреев И.М., Фотиади А.А. *Квантовая электроника*, **32**, 1017 (2002).
5. Chen Z.J., Grudinin A.B., Porta J., Minely J.D. *Opt. Lett.*, **23**, 454 (1998).
6. Grudinin A.B., Payne D., Turner P.W., Zervas M.N., Ibsen M., Durkin M.K. International patent WO 00/67350, priority date 30.04/1999.
7. Белов А.В., Дианов Е.М., Курков А.С. *Квантовая электроника*, **13**, 1680 (1986).
8. Mashinsky V.M., Medvedkov O.I., Neustruev V.B., Dvoyrin V.V., Vasiliev S.A., Dianov E.M., Khopin V.F., Guryanov A.N. *Proc. 29th ECOC/14th IOOC* (Rimini, 2003, v. 2, p. 210).
9. Bufetov I.A., Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Shubin A.V., Medvedkov O.I., Dianov E.M., Guryanov A.M., Khopin V.F., Salgansky M.Yu. *Proc. CLEO'2004* (San Francisco, 2004, p. CMD1).