

Дискретно-волоконный генератор-усилитель субпикосекундных импульсов на базе Yb:KYW-лазера

С.М.Кобцев, С.В.Кукарин

Исследована гибридная субпикосекундная система на основе твердотельного Yb:KYW-лазера и волоконного Yb-усилителя, изготовленного по GTWave-технологии. При накачке системы непрерывным излучением на длине волны 980 нм общей мощностью 12 Вт на выходе были получены импульсы длительностью 0.9 пс с энергией 40 нДж при частоте следования 100 МГц и средней мощности излучения 4 Вт. Центральная длина волны излучения системы могла быть перестроена в импульсном режиме в диапазоне 1038–1053 нм, а в непрерывном – в диапазоне 1030–1070 нм. Впервые измерены коэффициенты усиления волоконного GTWave-усилителя на иттербии в диапазоне длин волн генерации Yb:KYW-лазера.

Ключевые слова: твердотельный лазер, KYW:Yb, волоконный усилитель, ультракороткие световые импульсы.

1. Введение

Твердотельные лазеры с активными элементами на основе монокристаллов калий-иттриевого вольфрамата $KY(WO_4)_2$ (KYW) или калий-гадолиниевого вольфрамата $KGd(WO_4)_2$ (KGW), допированных ионами иттербия, имеют ряд преимуществ [1–3], стимулирующих интенсивные разработки и исследования, связанные с этими лазерами. Основной привлекательной особенностью Yb:KYW/KGW-лазеров является то, что они могут напрямую эффективно накачиваться излучением диодных лазеров со стандартной длиной волны в области 975–980 нм. Спектральная область генерации Yb:KYW/KGW-лазеров составляет примерно 1010–1080 нм [4] с максимумом выходной мощности излучения на длинах волн вблизи 1045 нм. Наличие у активных сред KYW/KGW:Yb полос усиления шириной несколько десятков нанометров позволяет реализовать в этих лазерах режим генерации фемтосекундных импульсов длительностью менее 100 фс [5]. При генерации более длинных импульсов центральную длину волны излучения можно перестраивать в области шириной до ~70 нм. Другой важной особенностью Yb:KYW/KGW-лазеров является то, что длины волн генерации этих лазеров попадают в полосу усиления волоконных Yb-усилителей. Наибольшее усиление волоконных Yb-усилителей достигается вблизи длины волны 1070 нм, однако коротковолновое крыло полосы их усиления перекрывает спектральный диапазон генерации Yb:KYW/KGW-лазеров, что позволяет использовать волоконные Yb-усилители совместно с задающими твердотельными Yb:KYW/KGW-лазерами.

Такие гибридные дискретно-волоконные системы уже применялись ранее для получения мощных субпикосекундных импульсов в спектральной области генерации Yb:KYW/KGW-лазеров и продемонстрировали доста-

точно высокую эффективность при относительной простоте реализации. Средняя выходная мощность гибридной системы с использованием Yb:KYW/KGW-лазеров может достигать сотен ватт [6] при субпикосекундных длительностях импульсов и частоте их следования ~100 МГц. В волоконных усилителях таких систем обычно используется Yb-волокно с двойной оболочкой, а излучение накачки вводится в усилитель через дихроичное зеркало, размещенное, как правило, на пути пучка, выходящего из усилителя (так называемая встречная накачка). Введение излучения накачки в волоконный усилитель с помощью дискретной (объемной) оптики (линза, зеркало), очевидно, усложняет систему и не позволяет в полной мере реализовать возможные преимущества волоконных усилительных систем. Кроме того, использование дискретной оптики создает разрывы в волоконных системах с несколькими ступенями усиления, в связи с чем в этих системах появляются открытые участки с объемной оптикой. Наличие таких участков существенно ослабляет «волоконные преимущества» подобных систем.

Разработанная недавно GTWave-технология изготовления волоконных усилителей [7] позволяет вводить излучение накачки в активное волокно непосредственно через стандартное кварцевое волокно. При использовании этой технологии можно полностью исключить какие-либо дискретные оптические элементы из волоконного усилительного тракта. В настоящей работе впервые приведены результаты исследований гибридной объемно-волоконной субпикосекундной системы на основе Yb:KYW-лазера и волоконного Yb-усилителя, выполненного по технологии GTWave.

2. Эксперимент

В эксперименте использовался Yb:KYW-лазер, разработанный в лаборатории лазерных систем Новосибирского государственного университета совместно с ЗАО «Техноскан». Схема резонатора лазера приведена на рис. 1. Кристалл KYW:Yb толщиной 3.3 мм с концентрацией ионов Yb^{3+} , равной 10%, ориентирован под углом Брюстера. Накачка кристалла проводилась вдоль опти-

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

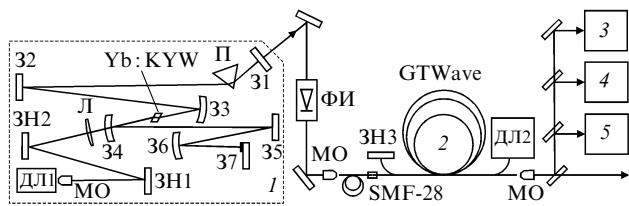


Рис.1. Схема гибридной объемно-волоконной лазерной системы на основе Yb: KYW-лазера:
 1 – схема Yb: KYW-лазера; 31–37 – зеркала Yb: KYW-лазера; 31 – выходное зеркало; 32, 35 – зеркала с компенсацией дисперсии; 37 – зеркало с насыщающимся поглотителем; П – призма; Л – фокусирующая линза; ЗН1 – ЗН3 – зеркала, отражающие излучение накачки; МО – микрообъектив; ФИ – фарадеевский изолятор; ДЛ1, ДЛ2 – диодные лазеры накачки; 2 – волоконный GTWave-усилитель; 3 – сканирующий автокоррелятор; 4 – анализатор спектра излучения; 5 – измеритель мощности излучения.

ческой оси N_m излучением линейки диодных лазеров мощностью до 3 Вт на длине волны 980 нм. Поляризация излучения накачки была ориентирована вдоль кристаллографической оси N_p . Линейка содержала четыре лазерных диода (модуль ML500-SP компании «Милон»), излучение которых сначала коллимировалось микрообъективом, а затем с помощью линзы с фокусным расстоянием 55 мм фокусировалось в кристалл. Диаметр пережатки излучения накачки в кристалле составлял около 80 мкм. Активный элемент лазера размещался в охлаждаемой оправе.

Режим пассивной синхронизации мод Yb: KYW-лазера достигался за счет использования зеркала с насыщающимся поглотителем. Насыщаемое поглощение этого зеркала линейно уменьшается от 0.9 % на длине волны 1030 нм до 0.7 % на длине волны 1060 нм, время релаксации поглотителя составляет менее 10 пс, плотность энергии насыщения равна 120 мкДж/см². Для компенсации дисперсии групповой скорости применялись два специальных зеркала, каждое из которых обеспечивало отрицательную дисперсию групповой скорости около 450 фс² в области 1040–1070 нм при однократном отражении излучения от зеркала. Эти зеркала совместно с зеркалом с насыщающимся поглотителем обеспечивали устойчивый режим синхронизации мод лазера и длительность импульсов 250–300 фс в зависимости от длины волны излучения. На рис.2 приведена характерная автокорреляционная функция импульсов и их спектр. Импульсы не были близки к спектрально-ограниченным, что свидетельствовало о неполной компенсации дисперсии групповой скорости в резонаторе лазера. Максимальная средняя выходная мощность излучения лазера при накачке излучением мощностью 4 Вт составляла 130 мВт на длине волны 1045 нм.

В режиме синхронизации мод и в непрерывном режиме длина волны излучения лазера перестраивалась с помощью призмы, установленной перед выходным зеркалом резонатора. Центральная длина волны излучения лазера могла быть перестроена в импульсном режиме в диапазоне 1038–1053 нм, а в непрерывном – в диапазоне 1030–1070 нм.

Введение выходного излучения Yb: KYW-лазера в волоконный Yb-усилитель (диаметр сердцевины 15 мкм) проводилось с помощью двух зеркал, микрообъектива и волокна SMF-28 длиной 1 м, которое сваривалось с Yb-волоконном. Для устранения обратной световой связи меж-

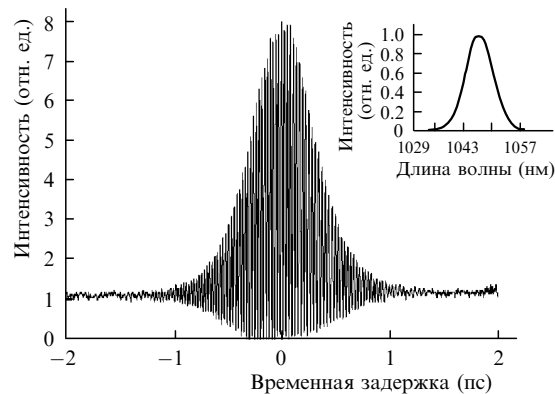


Рис.2. Автокорреляционная функция импульсов Yb: KYW-лазера. На вставке – спектр импульсов.

ду лазером и усилителем устанавливался фарадеевский изолятор. В результате потерь излучения при прохождении через фарадеевский изолятор и микрообъектив мощность излучения на входе в волоконный усилитель составляла 100 мВт.

Накачка усилителя осуществлялась линейкой диодных лазеров с длиной волны 980 нм и мощностью излучения 8 Вт (модуль ML500-SP). Выходное волокно диодного модуля сваривалось с входным волокном для накачки GTWave-усилителя, внешний диаметр обоих волокон был стандартным – 125 мкм. Небольшая часть излучения накачки (~ 10 %), выходящего из «накачного» волокна, возвращалась назад зеркалом (зеркало ЗН3 на рис.1). Мощность излучения на выходе из усилителя составляла 4 Вт при работе Yb: KYW-лазера как в непрерывном, так и в импульсном режиме. На рис.3 приведены спектры усиленного излучения при работе Yb: KYW-лазера в обоих режимах. Спектр усиленного непрерывного излучения содержит заметный дополнительный пик в области максимального усиления вблизи 1070 нм. Спектр усиленного импульсного излучения состоит только из одного пика шириной около 10 нм. Измеренная с помощью сканирующего автокоррелятора длительность усиленных импульсов не превышала 0.9 пс (рис.4). Увеличение длительности импульсов на выходе из усилителя является следствием их фазовой модуляции, приобретенной при прохождении относительно протяженного (4 м) волоконного усилителя. При необходимости длительность усиленных импульсов может быть уменьшена до начальной длительности (250–300 фс) и менее с помощью стандартных методов компрессии при использовании двух дифракционных решеток или с помощью микроструктурированного волокна [8]. Энергия усилен-

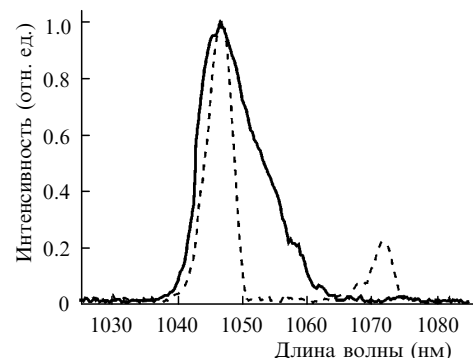


Рис.3. Спектр усиленного излучения: штриховая кривая – непрерывное излучение, сплошная – импульсное излучение.

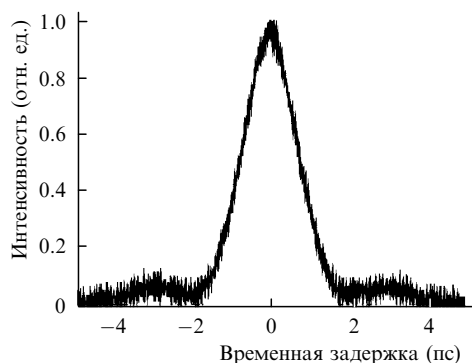


Рис.4. Автокорреляционная функция усиленных импульсов (неколлинеарная схема регистрации).

ных импульсов составляла 40 нДж при частоте следования 100 МГц. Задающее излучение было линейно поляризовано на входе в усилитель, а на выходе из него степень поляризации усиленного излучения не превышала 63 %.

Необходимо отметить высокую эффективность волоконного GTWave-усилителя при работе на длинах волн вблизи 1045 нм: мощность усиленного излучения составляла около 50 % от мощности накачки (рис.5). Длина волны 1045 нм соответствует максимальной выходной мощности излучения Yb: KYW-лазера, но значительно отличается от длины волны ~1070 нм, отвечающей максимальному усилению волоконного Yb-усилителя. На рис.6 приведена зависимость измеренного нами коэффициента усиления используемого волоконного GTWave-усилителя от длины волны задающего непрерывного излучения при мощности излучения накачки 0.9 Вт. Эта мощность соответствует максимальной мощности накачки, при которой спектр усиленного излучения повто-

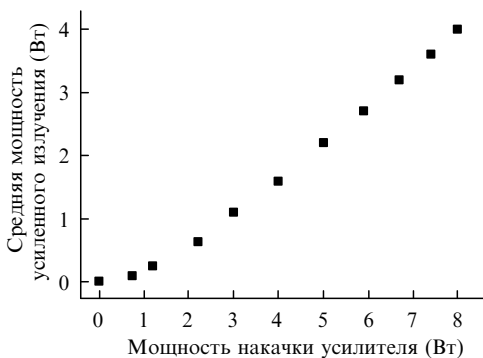


Рис.5. Зависимость средней мощности усиленного излучения от мощности накачки усилителя.

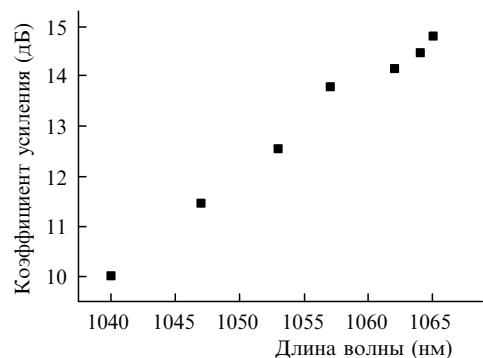


Рис.6. Зависимость коэффициента усиления GTWave-усилителя на иттербии от длины волны.

ряет спектр задающего непрерывного излучения. При накачке усилителя излучением мощностью более 0.9 Вт и длине волны задающего излучения менее 1065 нм в спектре усиленного непрерывного излучения появляется дополнительный спектральный пик в области 1070 нм, соответствующий усиленному спонтанному излучению. Измерения, проведенные при мощности излучения накачки 0.9 Вт и непрерывном задающем излучении позволили оценить соотношение коэффициентов усиления вблизи его максимума на длине волны 1065 нм (14.8 дБ) и на длине волны 1040 нм (10 дБ), соответствующей максимуму выходной мощности излучения Yb: KYW-лазера.

Волоконный GTWave-усилитель на иттербии несколько проигрывает по эффективности используемым в гибридных системах волоконным усилителям, в которых применяется Yb-волокно с двойной оболочкой [6, 9], однако простота эксплуатации усилителя, изготовленного по технологии GTWave, и его достаточно высокая эффективность обеспечивают ему, на наш взгляд, преимущество в системах генератор – усилитель.

3. Заключение

Наблюдающаяся в последние годы тенденция роста числа гибридных объемно-волоконных лазерных систем имеет объяснимые причины: в таких системах используются преимущества как волоконных технологий, так и технологий дискретных лазерно-оптических устройств. В созданной нами системе преимуществом объемного Yb: KYW-лазера с синхронизацией мод является возможность перестройки длины волны субпикосекундных световых импульсов, а несомненным плюсом волоконного Yb-усилителя, изготовленного по GTWave-технологии, – высокая эффективность и простота использования. В силу этого представленная гибридная система выгодно отличается от полностью объемных или полностью волоконных лазерных систем.

Исследованный в данной работе GTWave-усилитель на иттербии может обеспечить высокое усиление не только в системах с твердотельными Yb: KYW/KGW-лазерами, но и в системах с множеством других лазеров, активные среды которых легированы иттербием: CaGdAlO₄: Yb, стекло: Yb, Sr₃Y(BO₃)₃: Yb, CaF₂: Yb, SrY₄(SiO₄): Yb, CaGdO(BO): Yb, YVO₄: Yb.

1. Brunner F., Spuhler G.J., Au J., Krainer L., Morier-Genoud F., Paschotta R., Lichtenstein N., Weiss S., Harder C., Lagatsky A.A., Abdolvand A., Kuleshov N.V., Keller U. *Opt. Lett.*, **25**, 1119 (2000).
2. Klopp P., Griebner U., Petrov V., Mateos X., Bursukova M.A., Pujol M.C., Sole R., Gavalda J., Aguilo M., Guell F., Massons J., Kirilov T., Diaz F. *Appl. Phys. B*, **74**, 185 (2002).
3. Кисель В.Э., Трошин А.Е., Щербичский В.Г., Кулешов Н.В., Павлюк А.А., Брюннер Ф., Пашотта Р., Морие-Геноуд Ф., Келлер У. *Квантовая электроника*, **36**, 319 (2006).
4. Lagatsky A.A., Rafailov E.U., Leburn S.G., Brown S.T.A., Xiang N., Okhotnikov O.G., Sibbett W. *Electron. Lett.*, **39**, 1108 (2003).
5. Liu H., Nees J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **26**, 1723 (2001).
6. Roser F., Rothhard J., Ortac B., Liem A., Schmidt O., Schreiber T., Limpert J., Tunnermann A. *Opt. Lett.*, **30**, 2754 (2005).
7. Grudinin A.B., Payne D.N., Turner P.W., Nilsson L.J.A., Zervas M.N., Ibsen M., Durkin M.K. *Multi-Fibre Arrangements for High Power Fibre Lasers and Amplifiers*. Patent USA No. 6826335, 30.11.2004.
8. Limpert J., Schreiber T., Nolte S., Zellmer H., Tunnermann A. *Opt. Express*, **11**, 3332 (2003).
9. Limpert J., Schreiber T., Clausnitze T., Zollner K., Fuchs H.-J., Kley E.-B., Zellmer H., Tunnermann A. *Opt. Express*, **10**, 628 (2002).