

PACS 42.55.Wd; 42.60.By; 42.60.Jf; 42.65.Re

Фемтосекундный эрбиевый волоконный лазер с субмикроджоульной энергией в импульсе для генерации дисперсионных волн в спектральной области короче 1 мкм

Л.В.Котов, М.Ю.Коптев, Е.А.Анашкина, С.В.Муравьев, А.В.Андрианов, М.М.Бубнов, А.Д.Игнатъев, Д.С.Липатов, А.Н.Гурьянов, М.Е.Лихачев, А.В.Ким

Демонстрируется фемтосекундная волоконная эрбиевая лазерная система, построенная в соответствии с концепцией «задающий генератор и мощный усилитель» (МОРА). Оконечный каскад усилителя выполнен на специально разработанном активном световоде с большой площадью поля моды, накачка которого осуществляется в оболочку излучением многомодовых лазерных диодов. Система способна генерировать импульсы субмикроджоульного уровня энергии на длине волны около 1.6 мкм: получены импульсы с энергией 400 нДж и длительностью 530 фс. Показано, что излучение разработанной системы может быть преобразовано в диапазон длин волн короче 1 мкм в результате генерации дисперсионных волн в пассивном нелинейном волокне. Получены ультракороткие импульсы со спектральной шириной ~100 нм на центральной длине волны 0.9 мкм с энергией 7 нДж, которые могут быть применены при разработке петаваттных лазерных систем в качестве затравочного сигнала в параметрических усилителях.

Ключевые слова: волоконные лазерные системы с высокой пиковой мощностью, эрбиевые усилители, волокна с большой площадью поля моды, ультракороткие импульсы, дисперсионные волны.

1. Введение

Прогресс в разработке волоконных лазерных систем в ближнем ИК диапазоне для генерации ультракоротких импульсов с высокой пиковой мощностью во многом обусловлен необходимостью решения практических задач в области двухфотонной спектроскопии, биомедицины, прецизионной обработки материалов и др. В настоящее время широкое распространение получили лазерные системы, использующие эрбиевые активные световоды и хорошо отработанную телекоммуникационную волоконно-оптическую компонентную базу [1]. Уступая по энергетическим характеристикам твердотельным системам, волоконные

лазеры и нелинейно-оптические устройства обладают такими преимуществами, как высокая эффективность преобразования энергии накачки в энергию излучения, обусловленная волноводной геометрией, эффективный отвод тепла и высокое качество пространственного профиля лазерного пучка, а также низкая стоимость, компактность, отсутствие юстировок в процессе работы.

Наиболее распространенные лазерные схемы основаны на использовании задающего генератора и мощного усилителя (МОРА) [1]. Поскольку энергия формируемых сигналов часто ограничивается нелинейными свойствами активных световодов оконечного каскада усилителя, для получения больших энергий выбирается режим усиления растянутого импульса (СРА), а для компенсации частотной модуляции применяют внешние дисперсионные компрессоры на объемных элементах – призмах, решетках или их комбинациях [1, 2]. Для уменьшения нелинейных эффектов также весьма популярно использование световодов с большой площадью поля моды (LMA), что позволяет получать импульсы с высоким уровнем энергии и пиковой мощности [3–5]. Отметим, что в случае эрбиевых световодов с накачкой в оболочку увеличение диаметра сердцевинки необходимо не только для уменьшения нелинейных эффектов, но и для создания приемлемой инверсии [6].

В настоящей работе исследуются две схемы волоконной эрбиевой лазерной системы МОРА с высокой пиковой мощностью, базирующиеся на использовании одного и того же задающего лазера и специально разработанного активного LMA-световода в оконечном каскаде усилителя. Система способна генерировать лазерное излучение в двух режимах: субмикроджоульные импульсы длительностью ~500 фс в схеме СРА (с использованием решетчатого компрессора) и импульсы с энергией ~10 нДж длительностью ~100 фс в полностью волоконном формате без внешнего компрессора. Демонстрируемая лазерная система, помимо прочих приложений, может эффективно применяться для формирования ультракоротких сиг-

Л.В.Котов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

М.Ю.Коптев, С.В.Муравьев, А.В.Андрианов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: max-koptev@ya.ru, alex.v.andrianov@gmail.com

Е.А.Анашкина, А.В.Ким. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: elena.anashkina@gmail.com, kim@ufp.appl.sci-nnov.ru

М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: likhachev@fo.gpi.ru, bubnov@fo.gpi.ru

А.Д.Игнатъев. ООО «Инновационное предприятие “НЦВО-Фотоника”», Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

Д.С.Липатов. Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; Институт химии высококичистых веществ им Г.Г.Девярых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49; e-mail: lipatovds@mail.ru

А.Н.Гурьянов. Институт химии высококичистых веществ им Г.Г.Девярых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 12 марта 2014 г.

налов в спектральном диапазоне короче 1 мкм в результате генерации дисперсионных волн, исследованию которых посвящены работы [7–12] и др. Волоконный источник фемтосекундных оптических импульсов с широкополосным спектром на центральной длине волны около 0.9 мкм может быть использован в качестве задающего генератора в параметрических усилителях чирпованных импульсов (ОПСРА) на основе широкоапертурных кристаллов DKDP [13]. К настоящему моменту в таких усилителях достигнуты пиковые мощности 0.56 ПВт [14]. В настоящей работе экспериментально получен сигнал с центром на длине волны 0.9 мкм и шириной спектра 100 нм, что может иметь важное практическое значение при разработке ОПСРА с пиковой мощностью в несколько петаватт.

2. Оптимизация конструкции эрбиевого LMA-световода

Концепция построения мощной лазерной системы МОРА базируется на использовании волоконного задающего лазера, трехкаскадного усилителя чирпированных импульсов с оконечным каскадом на LMA-световоде и дисперсионного решеточного компрессора.

Основным фактором, ограничивающим максимальную энергию генерируемых импульсов, является порог возникновения нелинейных эффектов в оконечном усилительном каскаде. По этой причине именно на оптимизацию конструкции выходного усилителя были направлены значительные усилия в рамках настоящей работы. Недавно нами [15] был предложен оригинальный дизайн эрбиевого LMA-световода с двойной оболочкой, имеющего сердцевину диаметром 35 мкм, солегированную алюминием и фтором. Такой состав позволил, с одной стороны, в достаточной степени подавить кластеризацию ионов эрбия (вследствие относительно высокой концентрации оксида алюминия) [16], а с другой – снизить разность показателей преломления сердцевины и оболочки до $\Delta n \approx 0.0012$ (вследствие легирования фтором), что обеспечило работу такого световода в одномодовом режиме даже при относительно больших радиусах изгиба.

На рис.1 штриховой линией показана расчетная зависимость от концентрации ионов эрбия эффективности преобразования накачки (980 нм) в сигнал (1585 нм) в схеме усилителя на основе алюмосиликатного световода такой конструкции. Видно, что может быть получена эффективность вплоть до 40%, однако достигается она при относительно низких концентрациях эрбия, что приводит к необходимости использования активного световода длиной 40–50 м [15]. Хотя такая длина не является критичной для лазеров и усилителей, работающих в непрерывном режиме, она неприемлема для задач усиления коротких импульсов в силу низкого порога развития нелинейных эффектов. Уменьшение длины активного световода может быть достигнуто путем увеличения концентрации ионов эрбия в сердцевине, однако, как видно из рис.1, это сопровождается существенным снижением эффективности, что связано с увеличением кластеризации ионов эрбия [15]. Как было показано в [17], использование фосфоалюмосиликатной матрицы стекла сердцевины позволяет снизить уровень кластеризации. При этом использование близких концентраций алюминия и фосфора позволяет создавать световоды со сколь угодно малой разностью Δn и, таким образом, реализовывать

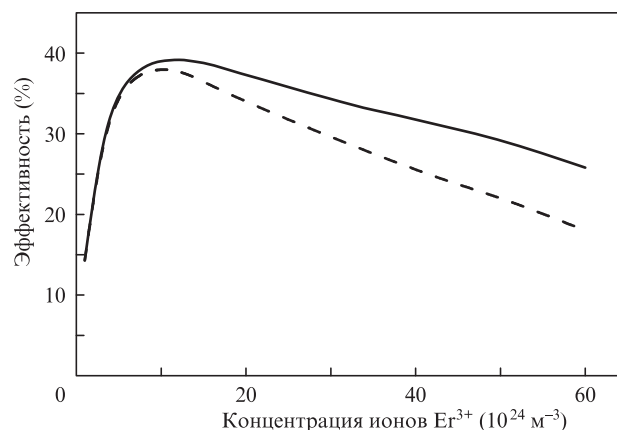


Рис.1. Расчётная эффективность преобразования накачки (980 нм) в сигнал (1585 нм) для алюмо- (штриховая линия) и фосфоалюмосиликатного (сплошная линия) эрбиевых LMA-световодов.

одномодовые световоды с большим диаметром сердцевины. На рис.1 сплошной линией показаны результаты расчетов для фосфоалюмосиликатных световодов с диаметрами сердцевины и оболочки 35 и 125 мкм соответственно. Видно, что хотя максимально достижимая эффективность меняется не сильно, но, по сравнению со случаем алюмосиликатного стекла сердцевины, снижение эффективности с ростом концентрации происходит значительно медленнее. Таким образом, эрбиевые световоды с сердцевиной из $Al_2O_3-P_2O_5-SiO_2$ лучше подходят для создания усилителей с высоким порогом нелинейных эффектов, чем стандартные алюмосиликатные световоды.

3. Характеристики изготовленного световода и усилителя

Заготовка эрбиевого световода была создана методом MCVD; сердцевина заготовки содержала ~7 мол. % Al_2O_3 , ~8 мол. % P_2O_5 и ~0.1 мол. % Er_2O_3 . Затем из нее был вытянут световод в полимерном покрытии, обеспечивающем числовую апертуру ~0.46 для излучения накачки. Для улучшения поглощения накачки поперечное сечение оболочки было выполнено в форме квадрата со стороной 115 мкм. Площадь такого сечения примерно равна площади сечения круглого световода диаметром 125 мкм, что позволяет сваривать активный световод со стандартными объединителями накачки и сигнала с пренебрежимо малыми потерями для излучения накачки. Поглощение слабого сигнала из оболочки составило 3 дБ/м на длине волны 980 нм. Измеренный профиль показателя преломления и рассчитанное распределение поля основной моды на 1550 нм приведены на рис.2. Диаметр поля моды составил 24.7 мкм, дисперсия групповых скоростей на длине волны 1.56 мкм была оценена в $27 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$.

Для выбора оптимальной длины световода в усилителе были проведены измерения зависимости эффективности преобразования излучения накачки в сигнал от длины волны сигнала для длин активного световода 6 и 3.5 м в схеме с попутной накачкой по оболочке. В качестве источников усиливаемого сигнала использовались волоконные лазеры с шириной спектра менее 1 нм и выходной мощностью ~100 мВт, что соответствует работе усилителя в режиме усиления мощности. Полученные результаты приведены на рис.3, где можно видеть, что длина волны, обеспечивающая максимальную эффективность усиления для сигнала с узким спектром, смещается от 1575 до 1560 нм при умень-

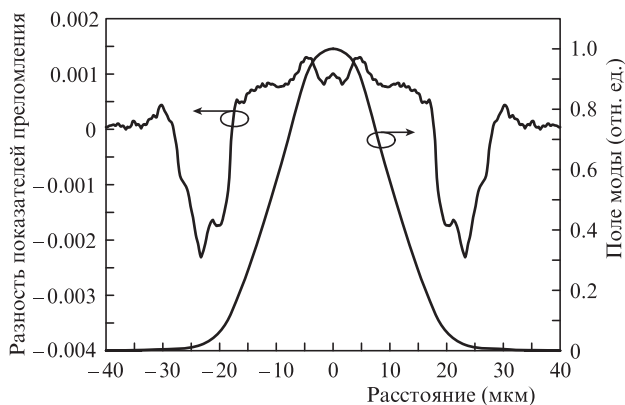


Рис.2. Разность показателей преломления (эксперимент) и распределение поля основной моды (расчёт) эрбиевого LMA-световода.

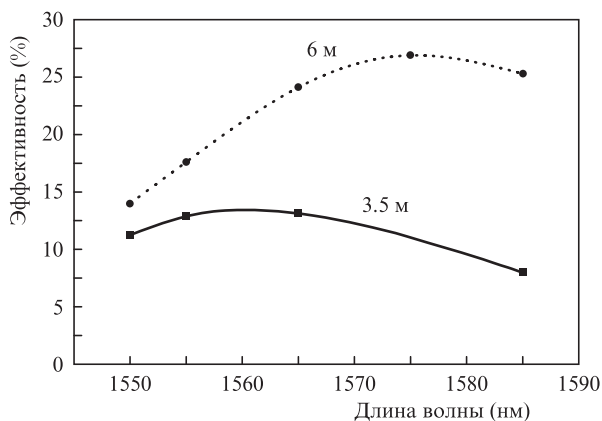


Рис.3. Зависимости эффективности преобразования излучения накачки в сигнал от длины волны для эрбиевых LMA-световодов длиной 3.5 и 6 м.

шении длины световода с 6 до 3.5 м. Стоит отметить, что общее снижение эффективности связано с увеличением доли непоглощенной накачки при уменьшении длины световода. Кроме того, в случае усиления ультракоротких импульсов спектр излучения является достаточно широким и может искажаться из-за различия коэффициентов усиления для разных спектральных составляющих.

Для изучения возможности использования разработанного усилителя в качестве оконечного каскада схемы CPA исследовались также спектры усиления. Сигналом служило излучение непрерывного суперлюминесцентного эрбиевого источника диапазона 1520–1600 нм. На рис.4 изображены измеренные спектры усиления эрбиевого световода длиной 6 м при мощностях входного сигнала 1, 7 и 50 мВт и выходной мощности ~ 1 Вт, а также спектр усиления световода длиной 3.5 м при входной мощности 10 мВт и выходной 2 Вт. Видно, что уменьшение мощности входного сигнала приводит к росту коэффициента усиления коротковолнового края спектра из-за увеличения инверсии населенностей. В то же время, как было показано в [15], увеличение инверсии в результате уменьшения длины волны при усилении сигнала с узким спектром приводит к увеличению негативного влияния кластеризации и, как следствие, к снижению эффективности работы эрбиевых световодов с двойной оболочкой. Именно этим и объясняется тот факт, что длина волны (1563 нм) максимального усиления широкого спектра (рис.4) не совпадает с длиной волны (1575 нм), соответствующей максимальной эффективности (рис.3). Из рис.4 также следует, что существенное

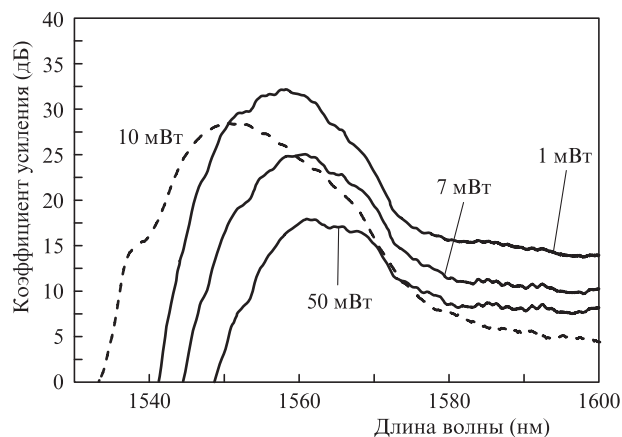


Рис.4. Спектры усиления на выходе эрбиевых LMA-световодов длиной 3.5 (штриховая кривая) и 6 м (сплошные кривые) при различных мощностях входного сигнала.

уменьшение длины волны максимального усиления можно получить при уменьшении длины активного световода. Ширина спектра усиления для обеих длин эрбиевого световода составила ~ 15 нм по уровню -3 дБ. Несмотря на меньшую эффективность, усилитель на основе эрбиевого световода длиной 3.5 м обладает большим порогом нелинейных эффектов, поэтому именно он был выбран для построения схемы CPA.

4. Разработка фемтосекундной субмикроджоульной лазерной системы (схема CPA)

Схема установки показана на рис.5. Основой её является разработанный ранее фемтосекундный эрбиевый волоконный лазер с кольцевым резонатором и диодной накачкой на 975 нм. Пассивная синхронизация мод в лазере осуществляется с помощью нелинейного вращения эллипса поляризации фемтосекундного импульса в результате оптического эффекта Керра. Задающий лазер генерирует импульсы длительностью 230 фс с частотой повторения 50 МГц на длине волны 1.56 мкм [10]. Далее в схеме расположены изолятор Фарадея и волоконный стретчер, выполненный на двух последовательно соединенных отрезках германо-силикатных световодов длиной 40 и 55 м с дисперсиями групповых скоростей на длине волны 1.56 мкм -54 и -37 пс·нм $^{-1}$ ·км $^{-1}$ соответственно. В стретчере происходит небольшое уширение спектра, вызванное фазовой самомодуляцией на начальном участке распространения. Чирпированные импульсы усиливаются в первом эрбиевом предусилителе до средней мощности 50 мВт, затем частота повторения импульсов с помощью акустооптического модулятора (АОМ) понижается до 1 МГц, чтобы уменьшить требуемую среднюю мощность накачки в оконечном каскаде усилителя при формировании субмикроджоульных импульсов. Прореженные импульсы усиливаются во втором предусилителе до средней мощности 5 мВт. Спектры сигнала после стретчера и обоих предусилителей приведены на рис.6. Полоса усиления активных волокон уже спектра входного сигнала, поэтому в режиме CPA после каждого усилительного каскада наблюдается сужение спектра.

После второго предусилителя импульсы через изолятор Фарадея поступают в оконечный каскад, выполнен-

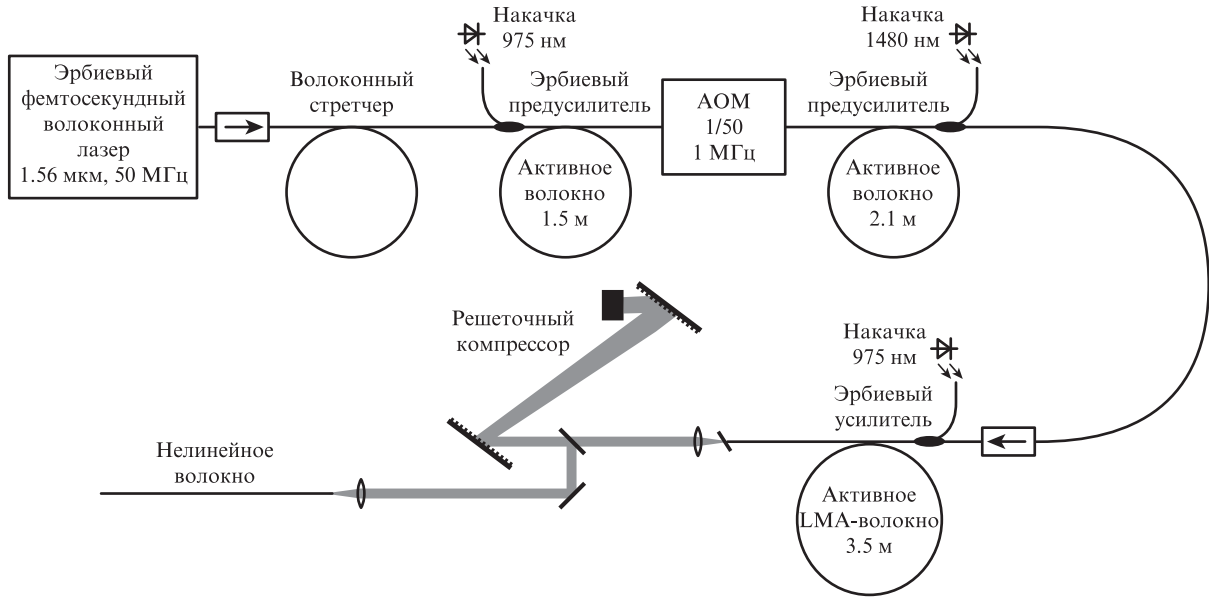


Рис.5. Экспериментальная установка по схеме CPA.

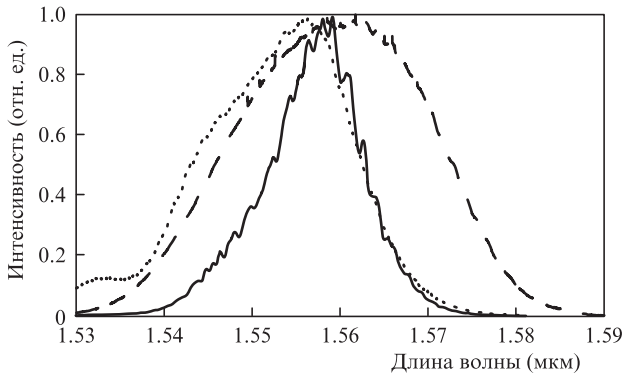


Рис.6. Спектры сигнала в схеме CPA после стретчера (штриховая кривая), а также первого (пунктирная кривая) и второго (сплошная кривая) предусилителей.

ный на разработанном эрбиевом LMA-световоде. На выходе такого световода длиной 3.5 м мы получили сигнал со средней мощностью 1 Вт, что соответствует энергии ~ 1 мкДж при оцененной длительности ~ 50 пс. Выходная мощность сигнала ограничивалась мощностью накачки. Для компенсации частотной модуляции усиленных импульсов применялся дисперсионный компрессор, построенный на паре дифракционных решеток 600 штрих./мм (Spectrogon). После компрессора импульсы имели длительность 530 фс. В силу низкой эффективности используемого компрессора при работе в области 1.55 мкм максимальная средняя мощность после сжатия составила 400 мВт, что соответствует энергии ~ 400 нДж. Для диагностики импульсов применялся метод оптического стробирования со спектральным разрешением FROG [18]. По экспериментальному набору спектров суммарной гармоники от двух реплик измеряемых импульсов с различными временами задержки одной относительно другой с помощью итерационного алгоритма восстанавливалось временное и спектральное распределение интенсивности и фазы импульсов.

На рис.7 показаны спектры сигнала после дисперсионного компрессора: экспериментально измеренный и восстановленный из FROG-спектрограммы, а также времен-

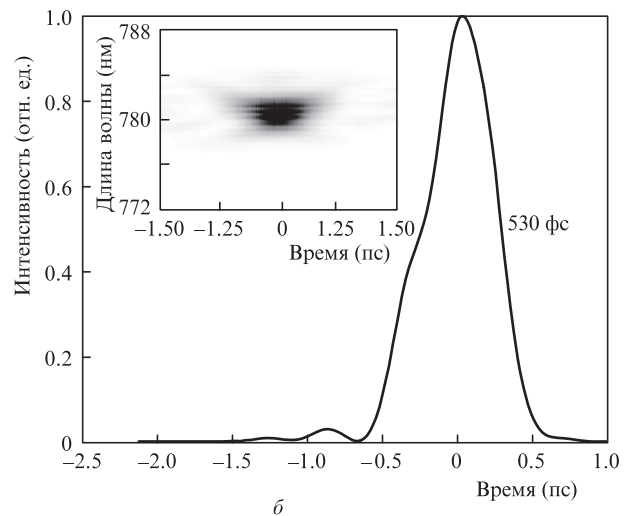
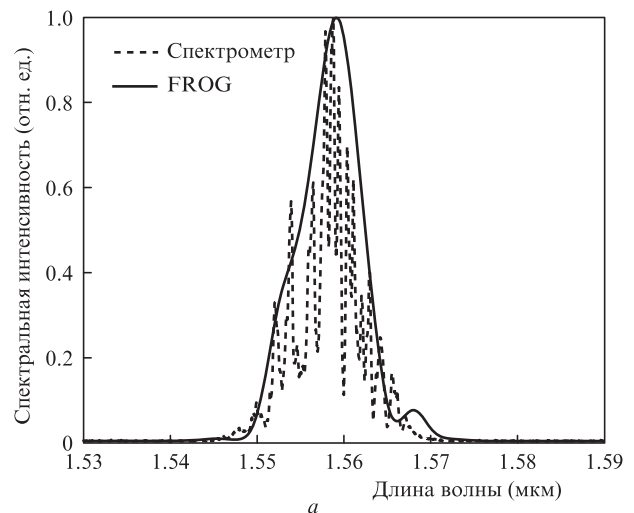


Рис.7. Спектры сигнала после дисперсионного компрессора (а): измеренный с помощью спектрометра (штриховая кривая) и восстановленный из FROG-спектрограммы (сплошная кривая), а также временная форма импульса (б), восстановленная из FROG-спектрограммы (вставка).

ное распределение интенсивности импульса. Производство спектральной ширины на длительность импульса $TBP = 0.5$. Оценка пиковой мощности импульса по порядку величины как отношение его энергии к длительности дает 750 кВт.

5. Преобразование субмикроджоульных импульсов в сверхширокополосном диапазоне длин волн в нелинейном кварцевом волокне

Полученные в схеме CPA субмикроджоульные импульсы использовались в экспериментах по преобразованию излучения в сверхширокополосном, превышающем октаву, диапазоне длин волн. Излучение после дисперсионного компрессора с помощью линзы заводилось в нелинейное волокно Flexcore 1060 длиной 1.5 м (см. рис.5). Средняя мощность сигнала на выходе составила 100 мВт. На приведенном на рис.8 спектре отчетливо виден пик на центральной длине волны 0.9 мкм, ширина которого составляет 100 нм (по уровню 3 дБ). Измеренная с помощью кремниевого фотодиода Thorlabs S120C, регистрирующего излучение в диапазоне 400–1100 нм, средняя мощность сигнала составила 7.5 мВт, что соответствует энергии ~ 7 нДж в импульсе на центральной длине волны 0.9 мкм. Кроме того, в спектре сигнала присутствуют и длинноволновые компоненты, ширина суперконтинуума составляет 1400 нм (от 0.8 до 2.2 мкм).

Наиболее эффективный механизм формирования коротковолнового излучения связан с генерацией линейных дисперсионных волн в области нормальной дисперсии оптического волокна при сжатии в процессе распространения солитонного импульса высокого порядка, расположенного в области аномальной дисперсии [7]. Отметим, что волоконно-оптические преобразователи позволяют сформировать на основе данного механизма когерентное излучение высокого качества в сверхшироком диапазоне

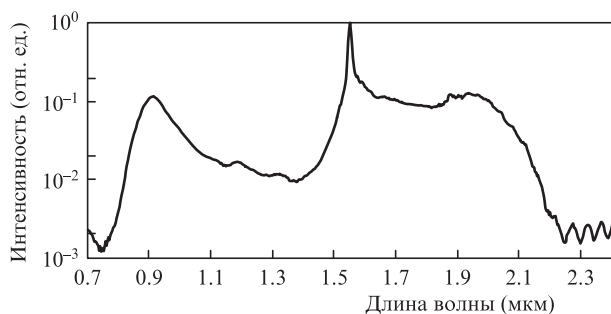


Рис.8. Спектр сигнала на выходе нелинейного волокна при его накачке излучением с выхода системы в схеме CPA.

длин волн, недоступном для лазерной генерации [9]. Экспериментальный результат преобразования фемтосекундных импульсов из полуторамикронного диапазона в диапазон длин волн 0.8–1 мкм находится в хорошем согласии с теоретическим исследованием его возможности [12]. Ранее нами также экспериментально демонстрировалась генерация волновых пакетов дисперсионных волн на длине волны около 1 мкм при энергии исходного полуторамикронного сигнала ~ 2 нДж [10, 11]. В настоящей работе формирование более коротковолнового излучения стало возможным благодаря повышению на два порядка энергии преобразуемого сигнала.

Длинноволновое крыло спектра образовано последовательно сформированными солитонными импульсами, центральная длина волны которых плавно смещается при распространении по волокну вследствие ВКР [19].

Таким образом, демонстрируемая эрбиевая волоконная лазерная схема может с успехом применяться как для формирования широкополосного излучения на длине волны короче 1 мкм, так и для генерации суперконтинуума шириной более октавы.

6. Формирование импульсов длительностью 100 фс с уровнем пиковой мощности 100 кВт в полностью волоконной схеме без внешнего компрессора

Также исследовалась возможность получения фемтосекундных импульсов с высокой пиковой мощностью без внешнего компрессора только путем оптимизации параметров стретчера с нормальной дисперсией. В этом случае система имеет полностью волоконный формат, что делает ее весьма удобной для приложений. Эксперимент проводился по схеме, приведенной на рис.9. После изолятора Фарадея импульсы усиливались в эрбиевом предусилителе до средней мощности 150 мВт, далее chirпировались в световоде длиной 3.5 м с дисперсией -37 пс·нм⁻¹·км⁻¹ на 1.56 мкм и усиливались в эрбиевом LMA-световоде длиной тоже 3.5 м до средней мощности ~ 700 мВт. Энергетическая эффективность преобразования накачки в сигнал составила 10%.

По мере распространения сигнала по усилителю с аномальной дисперсией происходило его сжатие в результате компенсации chirпа. Кроме того, сжатие при больших пиковых мощностях может быть обусловлено также и многосолитонными эффектами [19, 20]. При большой длине волокна с нормальной дисперсией компенсация chirпа неполная, импульс на выходе остается частотно-модулированным. При малых длинах стретчера возможно развитие нескольких сценариев, в результате которых импульс может усиливаться как единое целое или после-

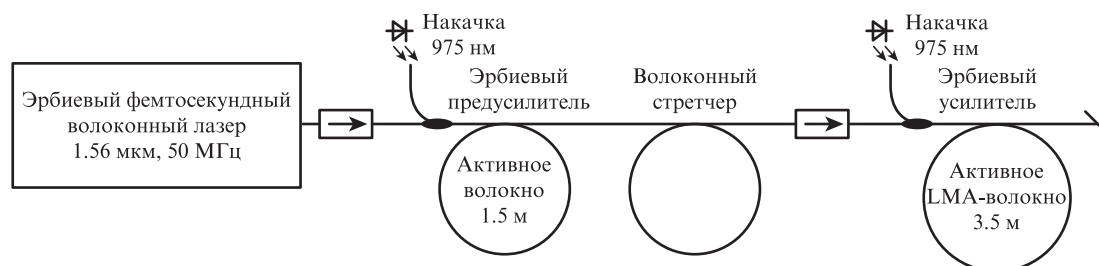


Рис.9. Полностью волоконная схема без внешнего компрессора.

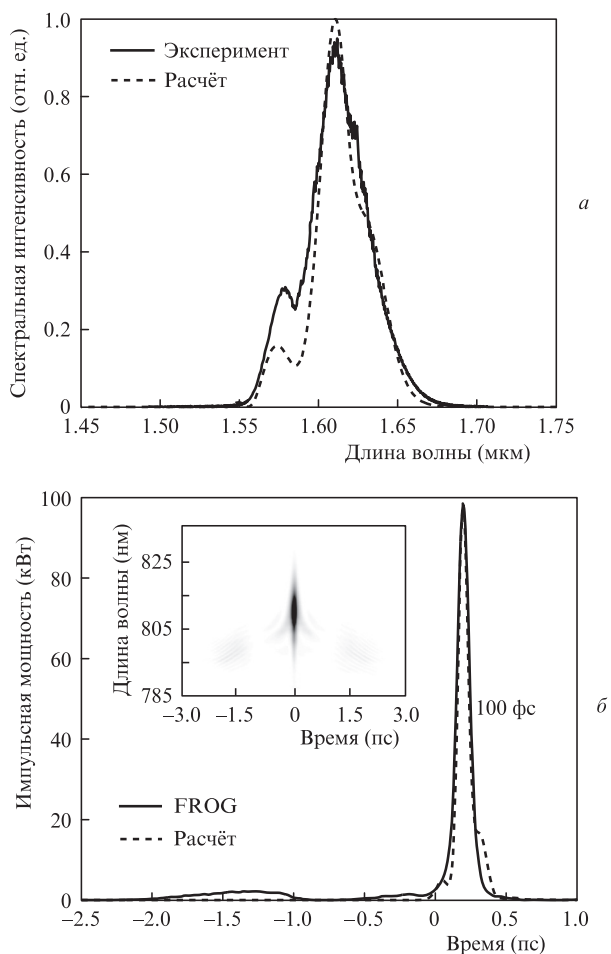


Рис.10. Оптические спектры сигнала на выходе полностью волоконной схемы без внешнего компрессора (а): экспериментальное измерение с помощью спектрометра (сплошная кривая) и численный расчет в рамках уравнения (1) (пунктирная кривая), а также распределения интенсивности импульса (б): восстановленное из показанной на вставке экспериментальной FROG-спектрограммы (сплошная кривая) и полученное в рамках численного расчета (пунктирная кривая).

довательно разбиться на два и более [20]. Нас интересовало одноимпульсный режим усиления.

На рис.10 показаны спектры импульсов на выходе эрбиевого LMA-световода и временной профиль интенсивности, восстановленный по FROG-спектрограмме. Длительность импульсов составляет 100 фс, энергия в пике оценивается в 12 нДж. Отметим, что в данном эксперименте была достигнута пиковая мощность 100 кВт, что близко к рекордному значению для фемтосекундных систем без внешних компрессоров [5]. Подчеркнем, что в данном случае пиковая мощность оценивалась с учетом реальной формы импульса (а не простым делением энергии на длительность, как в схеме CPA).

При дальнейшем увеличении мощности накачки система выходила из одноимпульсного режима, сигнал дробился на два и более импульса, что обуславливалось совместным действием фазовой самомодуляции и аномальной дисперсии в усилителе, а также ВКР [20]. Отметим, что в усилителях с аномальной дисперсией возможен режим формирования двух синхронизированных импульсов на различных длинах волн: при последовательном разбиении первый образовавшийся солитон в результате рамановского самосмещения частоты покидает полосу

усиления, а оставшийся в полосе усиления сигнал снова усиливается [21].

Проведенное математическое моделирование усиления импульсов в эрбиевом LMA-световоде показало достаточно хорошее количественное согласие с экспериментом (рис.10). Описание спектрально-временной эволюции импульсов в активных световодах, легированных редкоземельными ионами эрбия, проводилось в рамках обобщенного нелинейного уравнения Шрёдингера, в котором помимо дисперсии, керровской и рамановской нелинейностей учитывалась также однородно уширенная полоса усиления, соответствующая лазерному переходу ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ в районе полутора микрон [20, 22]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{A}(z, \omega)}{\partial z} + \frac{i\beta_2 \omega^2}{2} \tilde{A}(z, \omega) + \frac{i\beta_3 \omega^3}{6} \tilde{A}(z, \omega) \\ - i\gamma \left(1 + \frac{\omega}{\omega_0}\right) \hat{F} \left[A(z, \tau) \int R(\tau - \eta) |A(z, \eta)|^2 d\eta \right] \\ = G \exp(-\alpha z) \left(\frac{1}{1 + \omega^2 T_2^2} - \frac{i\omega T_2}{1 + \omega^2 T_2^2} \right) \tilde{A}(z, \omega), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\tilde{A}(z, \omega) = \hat{F}[A(z, \tau)]$; \hat{F} – оператор фурье-преобразования; $A(z, \tau)$ – комплексная огибающая электрического поля; z – координата вдоль волокна; ω – круговая частота, отсчитываемая от центральной частоты ω_0 ; τ – время в сопровождающей системе отсчета; β_2 и β_3 – коэффициенты квадратичной и кубической дисперсии; γ – коэффициент нелинейности; $R(\tau)$ – функция рамановского отклика [19]; α – ненасыщенный коэффициент поглощения накачки; G – константа, описывающая максимальный коэффициент усиления; T_2 – феноменологическое время релаксации поляризации. В уравнении (1) не учитывается насыщение усиления, поэтому в более общем случае моделирование следует проводить на основе системы уравнений Максвелла–Блоха [20, 22]. Однако оцененная нами энергия насыщения для эрбиевого LMA-световода имеет порядок 100 мкДж. Для характерных энергий импульсов около 10 нДж насыщением усиления можно пренебречь, инверсия населенностей в каждой точке волокна за время прохождения импульса почти не меняется, и система уравнений Максвелла–Блоха сводится к уравнению (1) [20]. Численное моделирование было выполнено на основе метода SSFM с использованием быстрого преобразования Фурье [19].

Результаты расчета нелинейного усиления фемтосекундных импульсов для различных длин стретчера представлены на рис.11 в виде зависимости в логарифмическом масштабе длительности импульса и в виде зависимости пиковых мощностей от расстояния вдоль активного волокна. Расчеты показывают, что действительно существует некая оптимальная длина стретчера L_{optim} . При длине стретчера, меньшей L_{optim} , точка максимальной сжатия находится внутри активного волокна, на выходе усилителя импульс успевает расшириться из-за дисперсионных эффектов. Энергия импульса на выходе активного световода практически не зависит от длины стретчера, поэтому пиковая мощность меньше оптимальной. При длине стретчера, большей L_{optim} , импульс не доходит до точки максимальной компрессии, пиковая мощность опять оказывается меньше оптимальной при заданных параметрах усилителя и входного импульса.

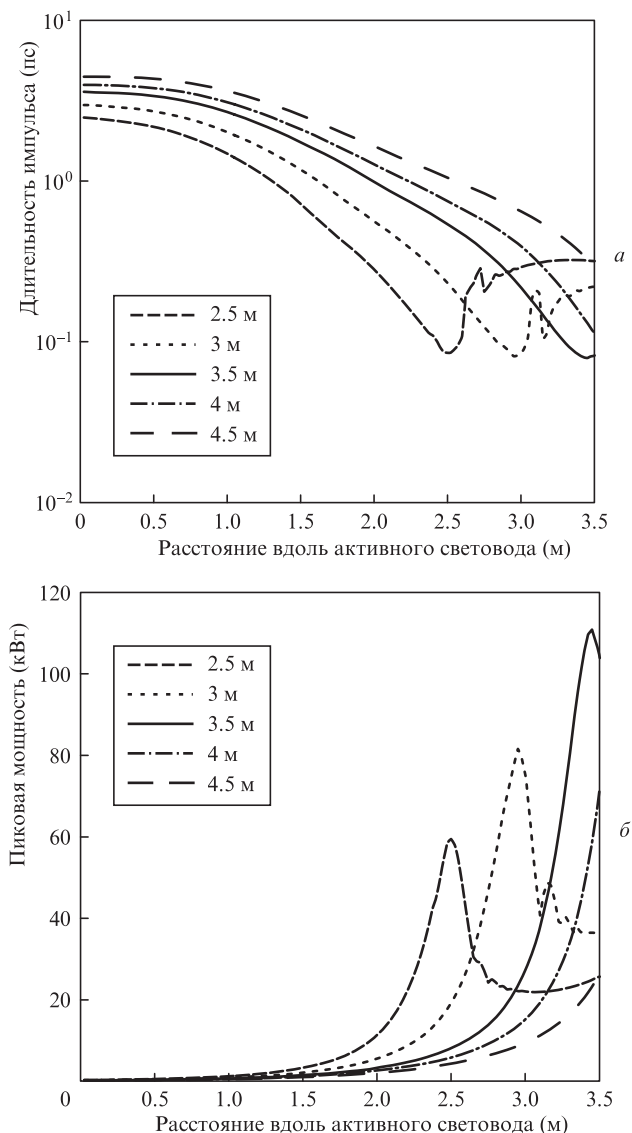


Рис.11. Расчетные зависимости длительностей импульсов (а) и их пиковых мощностей (б) от расстояния вдоль активного световода при различных длинах стретчера.

7. Заключение

Продемонстрирована фемтосекундная лазерная волоконная эрбиевая система, построенная в соответствии с концепцией МОРА. Оконечный усилительный каскад выполнен на специально разработанном эрбиевом LMA-световоде. Исследована схема усиления chirпированных импульсов с использованием дисперсионного компрессора на паре дифракционных решеток и полностью волоконная схема без внешнего компрессора.

В схеме CPA получены импульсы на длине волны 1.6 мкм с энергией 400 нДж длительностью 530 фс, пиковая мощность которых оценивается примерно в 750 кВт. Продемонстрировано, что эти импульсы могут быть эффективно преобразованы в нелинейном кварцевом волокне в область длин волн короче 1 мкм. Получены ультракороткие импульсы со спектральной шириной ~ 100 нм на

центральной длине волны 0.9 мкм с энергией 7 нДж, которые могут быть применены при разработке петаваттных лазерных систем в качестве затравочного сигнала в параметрических усилителях растянутых импульсов. Кроме того, получен спектральный суперконтинуум в диапазоне 0.8–2.2 мкм шириной более октавы.

В полностью волоконной схеме без внешнего компрессора получены импульсы длительностью 100 фс с энергией 12 нДж и пиковой мощностью ~ 100 кВт. Экспериментальные результаты поддержаны математическим моделированием нелинейного усиления сигналов в эрбиевом LMA-световоде.

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения», РФФИ (гранты № 12-08-33101, 13-02-00755, 14-02-31645) и гранта МК-5947.2014.2 Президента Российской Федерации. Авторы благодарят Е.М.Дианова за постоянную поддержку и проявленный интерес к данной работе. Е.А.Анашкина также выражает благодарность Фонду некоммерческих программ «Династия».

- Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27**, 63 (2010).
- Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G., Harter D. *Appl. Phys. B*, **65**, 259 (1997).
- Taverner D., Richardson D.J., Dong L., Caplen J.E., Williams K., Pentry R.V. *Opt. Lett.*, **22**, 378 (1997).
- Lim E.-L., Alam S., Richardson D.J. *Opt. Express*, **20**, 18803 (2012).
- Jasapara J.C., Andrejco M.J., DeSantolo A., Yablon A.D., Varallyay Z., Nicholson J.W., Fini J.M., DiGiovanni D.J., Headley C., Monberg E., DiMarcello F.V. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 3 (2009).
- Курков А.С., Парамонов В.М., Яшков М.В., Гончаров С.Е., Залевский И.Д. *Квантовая электроника*, **37**, 343 (2007).
- Austin D.R., de Sterke C.M., Eggleton B.J. *Opt. Express*, **14**, 11997 (2006).
- Roy S., Bhadra S.K., Agrawal G.P. *Phys. Rev. A*, **79**, 023824 (2009).
- Tu H., Lægsgaard J., Zhang R., Tong S., Liu Y., Boppart S.A. *Opt. Express*, **21**, 23188 (2013).
- Andrianov A.V., Anashkina E.A., Muraviov S.V., Kim A.V. *Opt. Lett.*, **35**, 3805 (2010).
- Андрьянов А.В., Анашкина Е.А., Муравьев С.В., Ким А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 256 (2013).
- Анашкина Е.А., Андрьянов А.В., Ким А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 263 (2013).
- Хазанов Е.А., Сергеев А.М. *УФН*, **178**, 1006 (2008).
- Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N., Katin E.V., Khazanov E.A., Kirsanov A.V., Luchinin G.A., Mal'shakov A.N., Martyanov M.A., Palashov O.V., Poteomkin A.K., Sergeev A.M., Shaykin A.A., Yakovlev I.V. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 421 (2007).
- Kotov L.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Lhermite J., F evrier S., Cormier E. *Opt. Lett.*, **38**, 2230 (2013).
- Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.Ю., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Сысолятин А.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 559 (2005).
- Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Opt. Lett.*, **34**, 3355 (2009).
- DeLong K.W., Fittinghoff D.N., Trebino R., Kohler B., Wilson K. *Opt. Lett.*, **19**, 2152 (1994).
- Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (London: Elsevier, 2013).
- Chi S., Chang C.W., Wen S. *Opt. Commun.*, **106**, 193 (1994).
- Koptev M.Yu., Anashkina E.A., Andrianov A.V., Muraviev S.V., Kim A.V. *Opt. Lett.*, **39**, 2008 (2014).
- Desurvire E. *Erbium-doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications* (New York: Wiley-Interscience, 2002).