

Генерация фемтосекундных импульсов в несколько осцилляций поля из излучения пикосекундного лазера накачки с последующим усилением

И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.В.Палашов

На основе нового подхода, при котором генерация фемтосекундных импульсов в несколько осцилляций поля осуществляется напрямую из излучения пикосекундного лазера накачки, получены импульсы микроджоульного уровня энергии с частотой следования 10 кГц и длительностью менее 26 фс в спектральном диапазоне 1.3–1.4 мкм. В процессе генерации данного излучения использован метод, обеспечивающий пассивную стабилизацию фазы между колебаниями электромагнитного поля и его медленной огибающей. Спектр излучения преобразовывался в диапазон параметрического усиления в кристаллах ВВО путем широкополосной генерации 2-й гармоники, импульс параметрически усиливался до микроджоульного уровня и сжимался chirпированными зеркалами до длительности 28 фс.

Ключевые слова: фемтосекундные импульсы, генерация суперконтинуума, пассивная стабилизация фазы, параметрическое усиление.

1. Введение

Создание фемтосекундных лазеров тераваттного и петаваттного уровня мощности является одним из наиболее востребованных направлений лазерной физики. Важными параметрами для их практического применения являются частота следования излучаемых импульсов, эффективность, стабильность, величина контраста и т. д. При этом многие из параметров определяются сочетанием характеристик лазера накачки и источника фемтосекундного излучения. Например, их оптическая синхронизация позволяет значительно повысить стабильность фемтосекундного лазера высокой мощности, а стабилизация фазы между колебаниями электромагнитного поля и его медленной огибающей важна для генерации вторичного излучения. Ширина полосы излучения фемтосекундного источника задает минимально возможную длительность и, соответственно, максимальную пиковую мощность, а тепловые эффекты в лазере накачки ограничивают частоту следования импульсов высокоомощного фемтосекундного лазера.

В работах [1–3] предложена и реализована новая схема построения высокоомощных фемтосекундных лазеров, основанная на относительно широкой полосе усиления итербиевых лазеров. Согласно новому подходу фемтосекундные импульсы реализуются напрямую из пикосекундного лазера накачки путем генерации суперконтинуума, достаточно широкополосного благодаря короткой длительности исходного сигнала. Затем путем последующих параметрических преобразований усиливаются необходимые спектральные компоненты суперконтинуума, а генерация разностной частоты позволяет получать излучение с пассивной стабилизацией фазы огибающей электромагнитного поля [4]. В работе [1] генерация суперконтинуума осуществлялась сравнительно короткими

(350 фс) импульсами (для чего использовался дополнительный регенеративный усилитель с активным Yb:KYW-элементом), при этом источником накачки параметрических усилителей служили Nd:YAG-лазеры с длительностью импульса 50 пс. В работе [3] для генерации суперконтинуума использовались длинные (800 фс) импульсы непосредственно от высокоомощного пикосекундного дискового лазера. Вторым подходом значительно упрощает оптическую синхронизацию сигнала и накачки, позволяя использовать пикосекундную накачку и растяжение/сжатие фемтосекундных импульсов chirпированными зеркалами, но ограничивает спектральный состав генерируемого суперконтинуума. Поэтому для генерации суперконтинуума в [3] использовалась дополнительная генерация кросс-поляризованного импульса длительностью 466 фс.

В настоящей работе объединены основные идеи работ [1, 3], что позволило продемонстрировать возможность генерации широкополосного излучения в ближнем ИК диапазоне (700–900 нм) с использованием метода пассивной стабилизации фазы между электромагнитным полем и его медленной огибающей напрямую из пикосекундного импульса лазера накачки. В первой части работы представлены результаты измерения характеристик суперконтинуума, генерируемого из излучения пикосекундного лазера с конечным усилителем на кристалле Yb:YAG. Следующая часть содержит описание оптической схемы и результаты по генерации разностной частоты между излучениями суперконтинуума и источника накачки. В последней части работы приведены результаты по параметрическому усилению 2-й гармоники разностной частоты до субмикроджоульного уровня энергии.

2. Генерация суперконтинуума с использованием пикосекундного лазера накачки

Принципиальная схема разработанной лазерной установки представлена на рис. 1. В качестве источника излучения использовался волоконный субпикосекундный ла-

И.Б.Мухин, И.И.Кузнецов, О.В.Палашов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: mib_1982@mail.ru

Поступила в редакцию 16 февраля 2018 г.

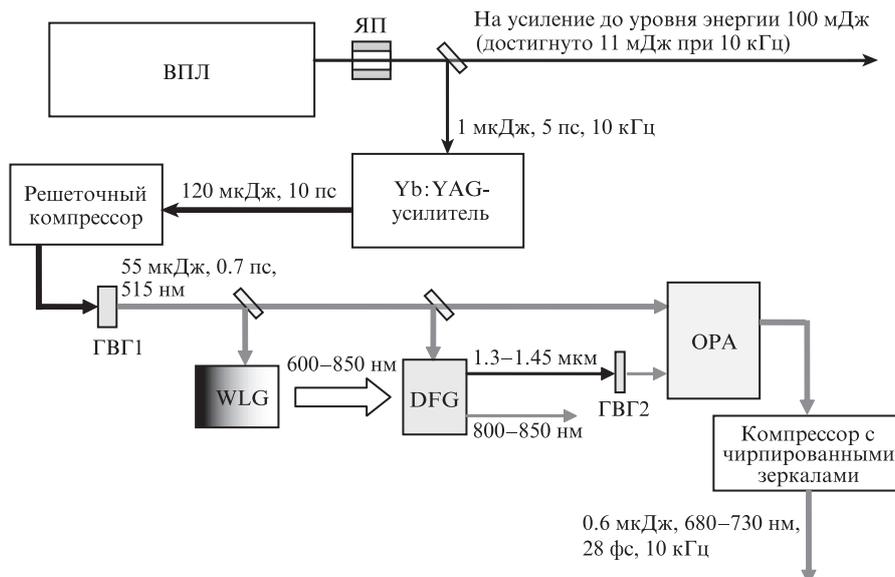


Рис.1. Принципиальная схема разработанной лазерной установки с указанием достигнутых характеристик излучения.

зер (ВПЛ) с энергией на выходе более 1 мкДж и частотой следования импульсов 3 МГц. Сигнал на выходе волоконного лазера растягивался до длительности в 50 пс, при этом ширина спектра составляла 8 нм с центральной длиной волны 1030 нм. Из цуга импульсов ячейкой Пококельса (ЯП) с частотой 10 кГц последовательно вырезались два импульса: первый предназначался для усиления в гибридной лазерной системе с дисковым оконечным усилителем [5], а второй, следующий примерно через 300 нс (что необходимо для компенсации большего оптического пути в высокомоощном лазере накачки при оптической синхронизации), служил задающим сигналом для фемтосекундной части установки. Задающий сигнал усиливался в четырехпроходном усилителе с активным элементом в виде тонкого стержня [6] из алюмоиттриевого граната (Yb:YAG) до энергии ~120 мкДж с сужением спектра примерно до 1.5 нм, а затем сжимался решеточным компрессором до длительности 0.9 пс. Длительность импульса измерялась с помощью сканирующего автокоррелятора, работающего на основе неколлинеарной генерации 2-й гармоники. Среднеквадратичное отклонение энергии в импульсе составило 2.5%.

В настоящей работе одним из ключевых моментов при реализации генерирования фемтосекундных импульсов длительностью в несколько осцилляций поля является генерация разностной частоты между сигналом на несущей длине волны и излучением суперконтинуума, образованного этим сигналом. Такой подход позволяет обеспечить пассивную стабилизацию фазы между электромагнитным полем и его медленной огибающей (SER-stabilization [4]), что является важным преимуществом для многих приложений. Необходимо также учесть, что подавляющее большинство высокомоощных фемтосекундных лазеров работает в ближнем ИК диапазоне (в частотности, из-за наличия достаточно моощных лазеров накачки). Поэтому, во избежание перехода в средний ИК диапазон при генерации разностной частоты, усиленный и «сжатый» сигнал преобразуется в импульс на длине волны 2-й гармоники (ГВГ1 на рис.1). Энергия в импульсе излучения 2-й гармоники составила 55 мкДж. Данный сигнал

делится на три части и используется как для генерации суперконтинуума, так и для дальнейших параметрических преобразований излучения.

Часть сигнала 2-й гармоники (~5 мкДж) используется для генерации суперконтинуума в кристалле YAG (блок WLG на рис.1). Для этого сигнальный пучок диаметром 2 мм (по половине интенсивности) фокусируется сферическим зеркалом ($f = 15$ см), а затем после генерации суперконтинуума коллимируется зеркалом с $f = 5$ см. Энергия в импульсе излучения суперконтинуума составила 2 мкДж при среднеквадратичном отклонении 3.7%, а ширина спектра длинноволновой части суперконтинуума – от 515 до 850 нм (рис.2). Отметим, что в работе [1] близкий по ширине спектр суперконтинуума получен с использованием сигнала длительностью ~300 фс, а в работе [3] ширина спектра длинноволновой части суперконтинуума находилась в диапазоне 515–770 нм при длительности импульса 460 фс. Широкая полоса генерации суперконтинуума в настоящей работе была достигнута благодаря тщательному подбору энергии в импульсе и диаметра пучка сигнала 2-й гармоники, а также за счет выбора фокусного расстояния зеркала при заданной длине кристалла, что хорошо согласуется с результатами [7].

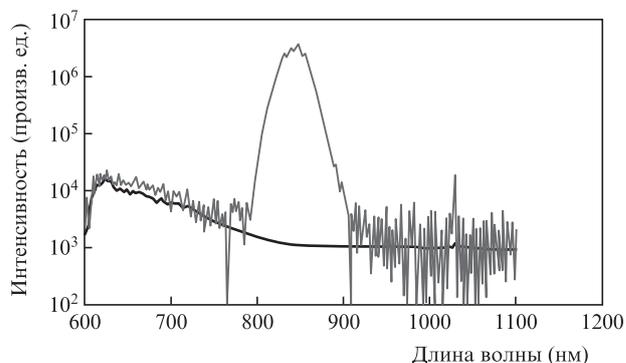


Рис.2. Длинноволновая часть спектра излучения суперконтинуума до (черная кривая) и после (серая кривая) параметрического усиления при генерации разностной частоты.

3. Генерация разностной частоты в кристалле ВВО

Для пассивной стабилизации фазы между электромагнитным полем импульса и его медленной огибающей сигнал суперконтинуума параметрически взаимодействует с частью сигнала накачки (20 мкДж) для генерации разностной частоты (блок DFG на рис.1). Пучки излучения суперконтинуума и 2-й гармоники совмещаются на дихроичном зеркале и коллинеарно фокусируются в кристалл ВВО серебряным зеркалом ($f = 17.5$ см) для взаимодействия по 1-му типу синхронизма. Временное совпадение двух пучков обеспечивается линией задержки. Толщина кристалла ВВО с ориентацией $\theta = 23.4^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ составляет 4 мм, нелинейный кристалл настроен относительно падающего излучения таким образом, что обеспечивает эффективное параметрическое усиление в диапазоне 800–900 нм. Для дополнительного уширения спектра излучения на разностной частоте организовано два прохода через нелинейный кристалл с небольшой разницей углов падения ($\sim 2^\circ$). Такой подход позволил получить излучение на разностной частоте в диапазоне 1250–1450 нм (рис.3), а также значительно увеличить энергию в импульсе за счет более эффективного преобразования при довольно слабом сигнале суперконтинуума в диапазоне 800–900 нм. После фильтрации излучения ИК фильтром энергия в импульсе излучения на разностной длине волны составила 2 мкДж.

Нами было выполнено также измерение длительности импульса с помощью сканирующего автокоррелятора, работающего на основе неколлинеарной генерации 2-й гармоники. Минимальный шаг автокоррелятора равен 8.3 фс; для измерений использовался кристалл KDP толщиной 0.2 мм. К сожалению, такое разрешение автокоррелятора не позволяет выполнять точные измерения длительностей импульсов в диапазоне в несколько осцилляций поля (10 фс и менее), однако позволяет с хорошей точностью оценивать длительности более 20 фс. На выходе блока генерации разностной частоты длительность импульса составила 96 фс, что объясняется наличием небольшого чирпа сигнала. При добавлении к оптическому пути эталона плавного кварца с оптимальной толщиной (2 см) удалось сжать импульс до длительности 26 фс (рис.4), что близко к спектрально-ограниченной длительности импульса (см. рис.3).

4. Параметрическое усиление импульса 2-й гармоники излучения разностной частоты

В работе [1] для перехода в ближний ИК диапазон из области длин волн разностной частоты использовался еще один каскад генерации суперконтинуума от импуль-

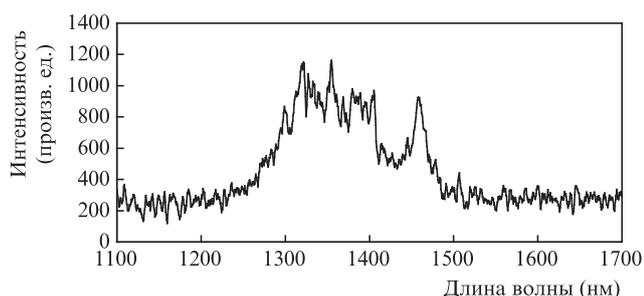


Рис.3. Спектр излучения на разностной частоте.

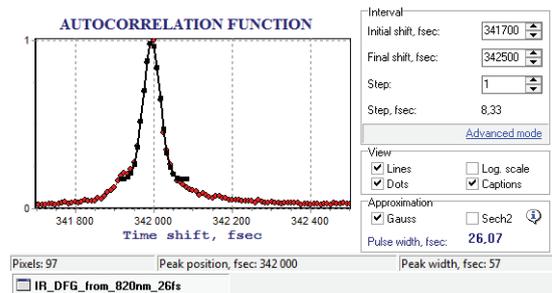


Рис.4. Автокорреляционная функция и длительность сигнала на разностной частоте после компрессии (копия окна программного обеспечения автокоррелятора).

са на разностной длине волны. Этот способ позволяет обеспечить очень широкополосное (более октавы) излучение, однако эффективность такого преобразования довольно мала. Кроме того, в высокоомощных лазерных системах мультитераваттного уровня и более ширина спектра усиленного фемтосекундного излучения составляет несколько десятков нанометров и редко превышает 200–300 нм. В настоящей работе предложен и использован другой подход, позволяющий осуществлять гораздо более эффективное преобразование разностной частоты в ближний ИК диапазон путем генерации 2-й гармоники (ГВГ).

На рис.5 представлены спектральные распределения излучения 2-й гармоники, полученного на выходе кристалла ВВО толщиной 1 мм. Отметим, что в зависимости от настройки кристаллов для генерации разностной частоты (в блоке DFG) и кристалла ВВО для ГВГ от разностной частоты имеется возможность регулировки как центральной длины волны, так и ширины спектра излучения в диапазоне более 100 нм (серая кривая на рис.5), что достаточно для многих высокоомощных лазерных систем. Еще более широкополосное излучение можно получить за счет неколлинеарной генерации разностной частоты, как это показано в работе [3]. В настоящей работе в блоках DFG и ГВГ2 выбраны длины волн излучения, позволяющие наилучшим способом его визуализировать и обеспечивать наибольшую квантовую эффективность.

Сигнал 2-й гармоники излучения разностной частоты далее параметрически усиливается с использованием оставшейся части излучения накачки (блок ОРА на рис.1). Взаимодействующие пучки фокусируются в кристалл ВВО серебряным зеркалом ($f = 15$ см) под углом $\sim 3^\circ$ для неколлинеарного параметрического усиления по 1-му типу синхронизма. Временное совпадение двух пучков обеспечивается линией задержки. Толщина кристал-

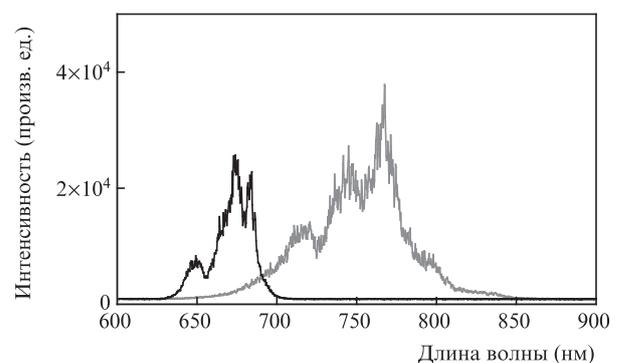


Рис.5. Спектральные распределения сигнала 2-й гармоники излучения разностной частоты для двух различных настроек нелинейных кристаллов при генерации разностной частоты и 2-й гармоники.

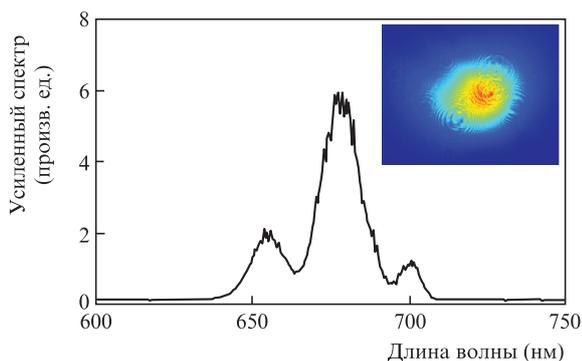


Рис.6. Спектральное распределение сигнала 2-й гармоники излучения разностной частоты после параметрического усиления. На вставке показано поперечное распределение усиленного пучка.

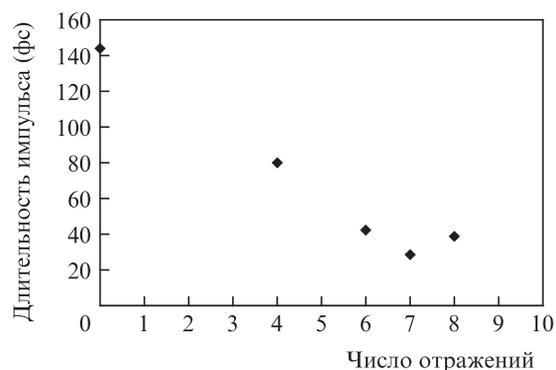


Рис.7. Зависимость длительности выходного импульса от числа отражений от пары чирпированных зеркал.

ла ВВО с ориентацией $\theta = 23.4^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ составляет 1 мм, нелинейный кристалл настроен относительно падающего излучения таким образом, что обеспечивает эффективное параметрическое усиление в диапазоне 600–800 нм. При этом спектр излучения 2-й гармоники близок к показанному на рис.5 (черная кривая). Для увеличения эффективности преобразования организовано два прохода через нелинейный кристалл с небольшой разницей углов падения ($\sim 0.5^\circ$) в нечувствительной плоскости, что позволило усилить импульс до энергии 0.6 мкДж со спектральным распределением, приведенным на рис.6. Отметим, что среднеквадратичное отклонение энергии от импульса к импульсу составило 6%, а поперечное распределение пучка близко к гауссову.

Измерение длительности импульса выполнялось с помощью описанного выше сканирующего автокоррелято-

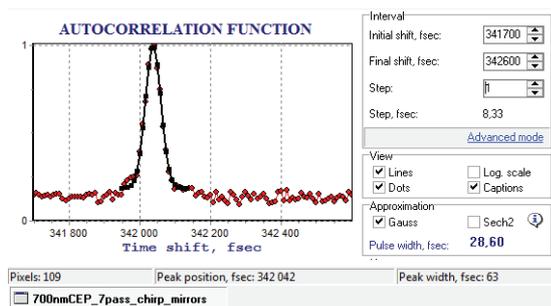


Рис.8. Автокорреляционная функция и длительность выходного сигнала после компрессора (копия окна программного обеспечения автокоррелятора).

ра. Длительность импульса на выходе из блока параметрического усиления составила 144 фс (при наличии положительного чирпа). Поэтому после выхода из блока параметрического усиления сигнал попадал в компрессор на основе пары чирпированных зеркал с дисперсией 100 фс^2 . На рис.7 представлена зависимость длительности импульса от количества отражений от пары чирпированных зеркал. Минимальная длительность импульса составила 28 фс (рис.8), что близко к спектрально-ограниченной длительности импульса (см. рис.6).

5. Заключение

Представлены результаты разработки задающей части мультитераваттной лазерной системы с высокой (единицы кГц) частотой следования лазерных импульсов. На основе нового подхода к генерации фемтосекундных импульсов в несколько осцилляций поля напрямую из излучения пикосекундного лазера накачки получено излучение микроджоульного уровня энергии с частотой следования импульсов 10 кГц и длительностью менее 30 фс в различных спектральных диапазонах. При этом реализован способ пассивной стабилизации фазы между электромагнитным полем и его огибающей. В работе экспериментально продемонстрирована возможность широкополосной генерации суперконтинуума от субпикосекундных лазерных импульсов, а также реализован альтернативный способ преобразования излучения на разностной частоте в «традиционный» для фемтосекундных лазеров диапазон 600–1000 нм путем генерации 2-й гармоники.

Оптическое качество лазерного пучка на выходе близко к дифракционному, а стабильность энергии от импульса к импульсу находится в пределах 6%, что обусловлено в основном стабильностью накачки тонкостержневого усилителя. Разработанная лазерная система с микроджоульным уровнем энергии может быть применима для научных исследований в области ультрабыстрой лазерной спектроскопии, а при дальнейшем планируемом повышении мощности и для генерации гармоник высокого порядка. В качестве следующего шага имеющийся сигнал будет параметрически усилен до субмиллиджоульных энергий с использованием в качестве накачки пикосекундного лазера с энергией 10 мДж, оптически синхронизованного с разработанной фемтосекундной системой.

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом»; элементная база создана в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2014-0107).

1. Budriūnas R., Stanislauskas T., Varanavičius A. *J. Opt.*, **17**, 094008 (2015).
2. Budriūnas R., Stanislauskas T., Adamonis J., Aleknavicius A., Veitas G., Gadonas D., Balickas S., Michailovas A., Varanavičius A. *Opt. Express*, **25** (5), 5797 (2017).
3. Alismail A., Wang H., Altwaijry N., Fattahi H. *Appl. Opt.*, **56** (17), 4990 (2017).
4. Baltuska A., Fuji T., Kobayashi T. *Phys. Rev. Lett.*, **88** (13), 133901-1 (2002).
5. Perevezentsev E.A., Kuznetsov I.I., Mukhin I.B., Palashov O.V. *Appl. Opt.*, **56** (30), 8471 (2017).
6. Kuznetsov I., Mukhin I., Palashov O., Ueda K.-I. *Opt. Lett.*, **41** (22), 5361 (2016).
7. Calendron A.-L., Cankaya H., Cirmi G., Kartner F.X. *Opt. Express*, **23** (11), 13866 (2015).