

Иттербиевая лазерная система для исследований параметрического усиления фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны ~ 2 мкм

И.Б.Мухин, М.Р.Волков, И.А.Викулов, Е.А.Перевезенцев, О.В.Палашов

Разработана лазерная система с оптической синхронизацией фемтосекундного сигнала и канала накачки. Сигнал задающего волоконного иттербиевого лазера с частотой следования растянутых фемтосекундных импульсов 60 МГц усиливается по энергии с нескольких наноджоулей до 0.4 мДж при частоте следования 3 кГц в широкополосном усилителе, после чего сжимается до длительности 250 фс. Это излучение используется для генерации фемтосекундных лазерных импульсов с центральной длиной волны ~ 2 мкм, энергией в импульсе более 20 мкДж, длительностью в несколько осциллирующих поля и стабилизацией фазы между электромагнитным полем и огибающей. Другой импульс задающего волоконного лазера, обеспечивающий оптическую синхронизацию и минимальную временную задержку, направляется в регенеративный дисковый Yb:YAG-усилитель, где усиливается до энергии 4 мДж при частоте следования импульсов 3 кГц и длительности 20 пс. С целью дальнейшего увеличения энергии импульсов накачки разработан многопроходный дисковый усилитель циркулирующих импульсов до энергии в 70 мДж при частоте следования импульсов 10 Гц и длительности 400 пс для исследований параметрического усиления с использованием субнаносекундной накачки.

Ключевые слова: волоконный иттербиевый лазер, фемтосекундные импульсы, дисковый Yb:YAG-усилитель, компрессия импульсов, параметрическое усиление.

1. Введение

Развитие лазерных источников с экстремально высокой пиковой мощностью излучения в области ИК диапазона является одним из наиболее перспективных направлений для исследований взаимодействия излучения с веществом. В настоящее время такие источники имеют множество научных и технических приложений. Так, при генерации гармоник высокого порядка энергия фотонов растет с увеличением длины волны исходного излучения [1], а стабилизация фазы между электромагнитным полем и огибающей позволяет генерировать изолированные аттосекундные импульсы [2]. С увеличением длины волны растет пондеромоторная сила, что приводит к более эффективному ускорению электронов [3]. Эффективность генерации терагерцевого излучения растет с увеличением длины волны воздействующего фемтосекундного лазерного излучения как λ^5 [4], а ширина спектра может достигать нескольких октав. На сегодняшний день нам известны только две лазерные установки мультитераваттного уровня мощности, работающие в ИК области спектра [5, 6], причем в обе установки входит высокоинтенсивный фемтосекундный титан-сапфировый лазер для накачки параметрического усилителя. Такая система не является оптимальной, поскольку для этой цели можно использовать иттербиевые пикосекундные лазеры [7, 8], обладающие высокой энергией в импульсе при частоте следования импульсов (ЧСИ) в десятки и сотни герц, при этом они гораздо более дешевые и простые в применении. Возможность

такого подхода продемонстрирована, например, в работе [9]. В настоящей работе представлены первые результаты разработки лазерной системы для исследований параметрического усиления фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны ~ 2 мкм и накачкой пикосекундными импульсами иттербиевого лазера.

Блок-схема лазерной системы приведена на рис. 1. В качестве единого источника излучения выступает коммерческий субпикосекундный иттербиевый лазер, состоящий из волоконного источника с ЧСИ 60 МГц и усилителя импульсов до энергии 0.3 мДж с ЧСИ до 15 кГц и длительностью 250 фс. Усиленный сигнал используется для генерации широкополосного фемтосекундного излучения в области 2 мкм на основе подходов, близких к описанным в работах [9, 10]. Накачкой в данном случае служит другой импульс излучения с ЧСИ 60 МГц, прошедший через разрабатываемые иттербиевые дисковые усилители и имеющий на выходе энергию в десятки мДж. Такая система обеспечивает оптическую синхронизацию фемтосекундного импульса и импульса накачки, причем правильно выбрав (из последовательности импульсов с частотой 60 МГц) усиливаемый в дисковых усилителях импульс, можно минимизировать длину линии задержки, необходимую для синхронизации. Далее фемтосекундное излучение и излучение накачки направляются в разрабатываемые узлы параметрического усиления и диагностики параметров усиленного излучения.

2. Накачка на основе иттербиевых дисковых усилителей

Для исследований параметрического усиления разработано два дисковых иттербиевых усилителя с различными выходными параметрами. Первый представляет собой регенеративный дисковый Yb:YAG-усилитель с сигналом наноджоулевого уровня на входе. Используемый в усили-

И.Б.Мухин, М.Р.Волков, И.А.Викулов, Е.А.Перевезенцев, О.В.Палашов. Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: mib_1982@mail.ru; bearuck@mail.ru

Поступила в редакцию 19 февраля 2020 г.

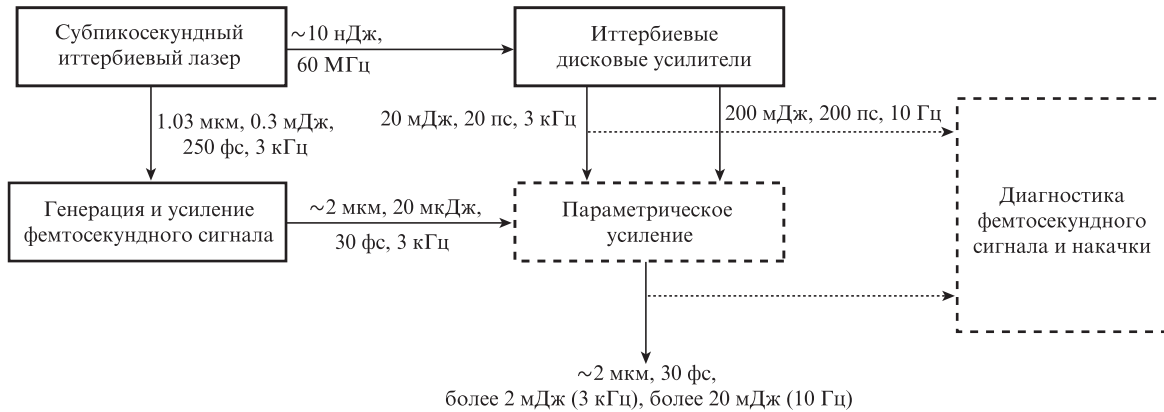


Рис.1. Блок-схема лазерной системы. Штриховой линией указаны узлы, разработка которых планируется в дальнейшем.

теле квантрон описан в работе [11], где представлены результаты исследований основных характеристик и продемонстрирована высокая эффективность лазерной генерации. Излучение субпикосекундного лазера с ЧСИ 60 МГц, шириной полосы ~ 10 нм и длительностью импульсов 200 пс направляется в регенеративный усилитель, схема которого представлена на рис.2. Изолятор Фарадея обеспечивает развязку входного и усиленного излучений. Ячейка Поккельса (ЯП) с водяным охлаждением электрооптического кристалла ВВО (с апертурой 4 мм) и временем переключения 15 нс изменяет добротность резонатора с дисковым активным элементом (АЭ) для реализации режима регенеративного усиления. Диаметр пучка накачки на диско-

вом АЭ составляет 3.5 мм (согласно [12] оптимальный диаметр сигнала на АЭ равен 0.75 от диаметра пучка накачки). На основе этих параметров рассчитан резонатор регенеративного усилителя (рис.2,б); длина обхода резонатора составила 6 м, что эквивалентно ~ 20 нс и больше времени переключения ЯП. В расчетах основной моды учитывалось, что дисковый АЭ имеет параболическую составляющую фазового набега [13], эквивалентную действию положительной тонкой линзы с фокусом 9 м. В то же время влияние термонаведенной тепловой линзы на оптимальную геометрию резонатора не учитывалось, поскольку оптическая сила такой линзы составляет, как правило, $\sim 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ [14]. Оптический резонатор с дисковым

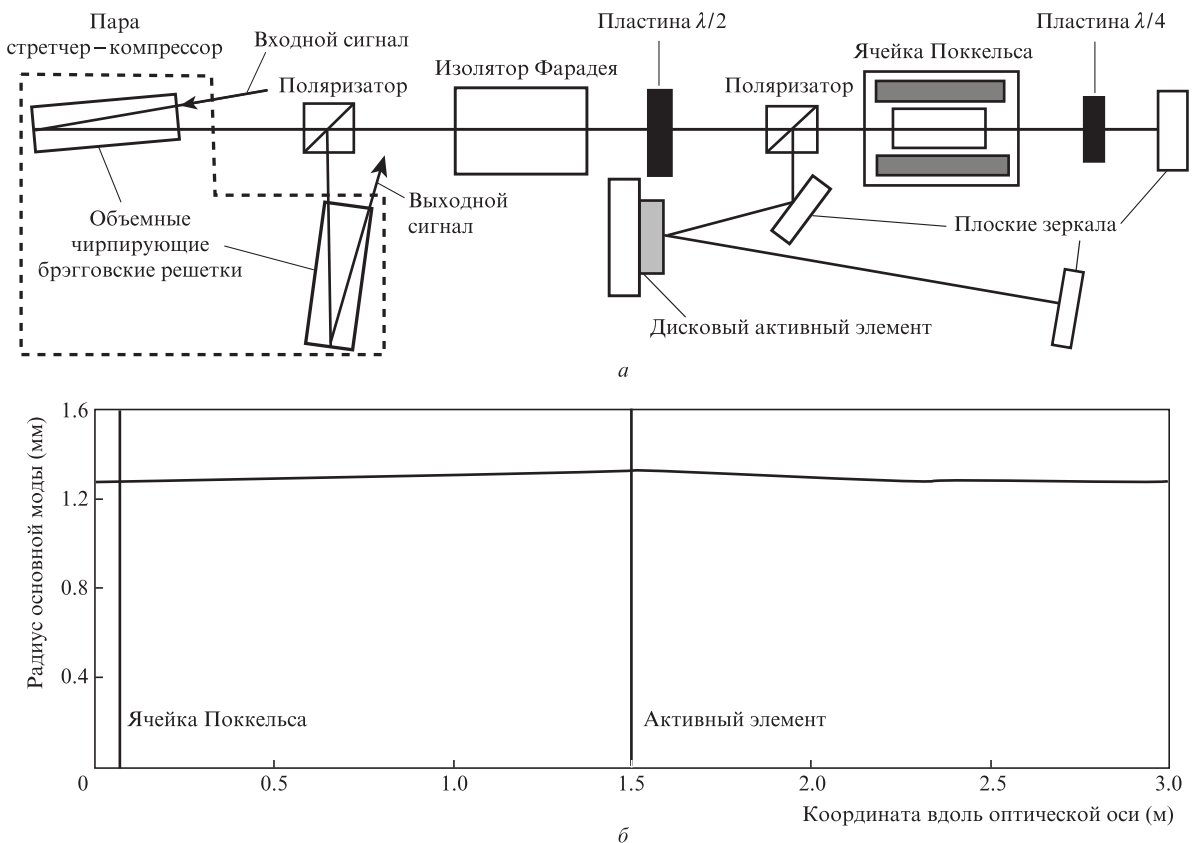


Рис.2. Оптическая схема регенеративного дискового усилителя (штриховой линией показан планируемый к установке узел стретчер–компрессор) (а) и зависимость радиуса пучка в регенеративном дисковом усилителе от продольной координаты (черными вертикальными линиями обозначено положение активного элемента и ячейки Поккельса, конечные зеркала резонатора регенеративного усилителя установлены в точках 0 и 3 м) (б).

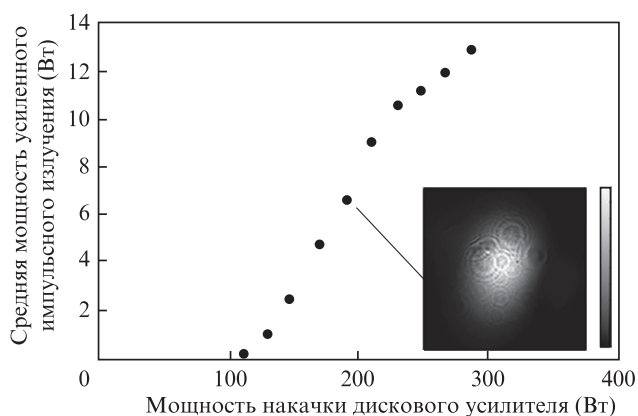


Рис.3. Зависимость средней мощности излучения на выходе регенеративного усилителя от средней мощности накачки. На вставке показано поперечное распределение выходного пучка.

АЭ был протестирован в режиме свободной генерации, и во всем диапазоне мощности накачки параметр качества пучка $M^2 \leq 2$.

Результаты экспериментов представлены на рис.3. В режиме регенеративного усиления средняя мощность излучения составила 13 Вт при частоте следования усиливаемых импульсов 3 кГц, что соответствует энергии в импульсе 4.3 мДж. Поперечное распределение пучка на выходе близко к гауссову, небольшой астигматизм связан с астигматизмом фазового профиля дискового АЭ. Долговременная стабильность выходной мощности составила 3% rms. В первых экспериментах в регенеративный усилитель направлялся растянутый до 200 пс сигнал волоконного задающего лазера с шириной спектра 10 нм, который в процессе усиления сужался примерно до 1 нм. Это приводило к уменьшению его длительности примерно до 20 пс, при которой порог пробоя диэлектрических покрытий составляет ~ 1 Дж/см². Учитывая, что в кристалле ВВО диаметр пучка равен 2.4 мм, дальнейшее увеличение энергии на выходе регенеративного усилителя может привести к пробую электрооптического элемента.

Отметим, что относительно низкий оптический КПД регенеративного усилителя связан в основном с большими потерями в электрооптическом элементе (около 0.3% на каждой грани кристалла) из-за просветляющих покрытий плохого качества. В настоящее время ведутся работы по изготовлению ЯП с кристаллом ВВО с улучшенными до 0.1% отражающими покрытиями, что позволит повысить дифференциальную эффективность до 20%. Отметим, что лазерный резонатор регенеративного усилителя был протестирован в режиме одномодовой генерации в отсутствие электрооптического элемента, и дифференциальная эффективность составила 26% при выходной мощности до 70 Вт. Для повышения энергии в импульсе на входе и выходе усилителя также будут установлены объемные чирпирующие брэгговские решетки (Optigrate) с дисперсией 190 пс/нм и апертурой 8×8 мм для растягивания импульсов излучения с шириной полосы 1 нм до 190 пс и обратного сжатия примерно до 20 пс (см. рис.2). Такой подход, а также небольшое увеличение диаметра основной моды регенеративного усилителя позволят повысить энергию в импульсе до 20 мДж без пробоя оптических элементов. Кроме того, поскольку усиленные в регенеративном усилителе импульсы оптически синхронизированы с импульсами описанной ниже фемтосекундной системы, путем выбора усиливаемого импульса (из последовательно-

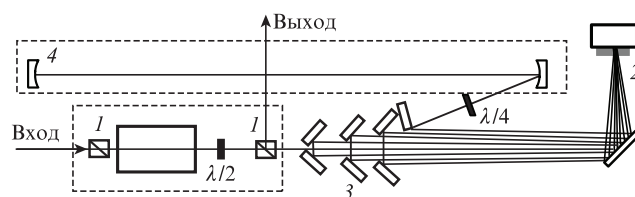


Рис.4. Оптическая схема многопроходного дискового усилителя: 1 – изолятор Фарадея; 2 – дисковый активный элемент; 3 – 45°-ные зеркала многопроходной схемы; 4 – телескоп.

сти с ЧСИ 60 МГц) можно минимизировать временную задержку между этими импульсами. Ожидаемый джиттер между импульсом накачки и фемтосекундным импульсом согласно результатам работы [15] составляет ~ 1 пс.

Часть сигнала регенеративного усилителя планируется направить во второй дисковый Yb:YAG-усилитель для увеличения энергии в импульсе. Оптическая схема многопроходного усилителя представлена на рис.4. Усиливаемый пучок диаметром 3 мм направляется через изолятор Фарадея 1 в дисковый АЭ 2 толщиной 2.5 мм с уровнем легирования 3 ат.%. Далее излучение последовательно отражается от нескольких 45°-ных зеркал 3 и четыре раза проходит через АЭ. Для организации еще четырех проходов излучение направляется в телескоп 4 и отражается обратно от второго зеркала телескопа. Пластина $\lambda/4$ обеспечивает поляризационную развязку, выводя излучение, отраженное от поляризатора изолятора Фарадея. Излучение диодной накачки с максимальной пиковой мощностью 1.1 кВт и регулируемой длительностью импульсов (около 1 мс) дважды проходит через дисковый АЭ. Частота следования импульсов накачки может регулироваться вплоть до нескольких сотен герц.

Первые эксперименты с многопроходным дисковым усилителем для минимизации тепловых эффектов выполнены при длительности импульсов накачки 1.12 мс и ЧСИ 10 Гц. В дальнейшем ЧСИ будет увеличена примерно до 100 Гц. Дисковый многопроходный усилитель протестирован входным сигналом с энергией 1.5 мДж, растянутым до 300 пс. Результаты эксперимента представлены на рис.5. Достигнута энергия в импульсе 70 мДж и усиление более 40. Поперечное распределение пучка в ближней зоне близко к гауссову. Дальнейшее увеличение мощности накачки приводит к пробую оптических элементов усилителя, что,

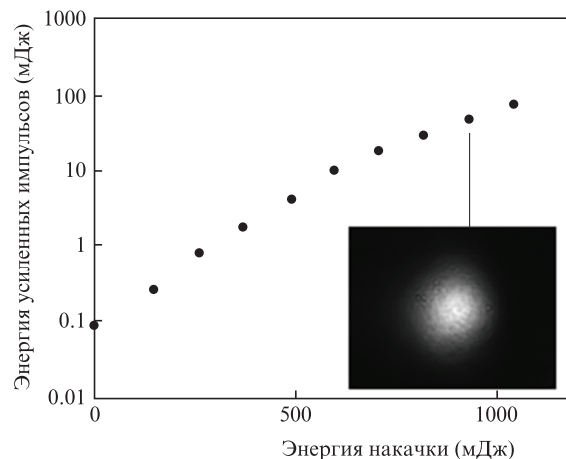


Рис.5. Зависимость выходной энергии от энергии импульсов накачки многопроходного усилителя. На вставке – поперечное распределение пучка на выходе усилителя.

возможно, связано с воздействием временных искажений импульса в режиме усиления с насыщением (эффект нака-та, или pulse rolling) [16].

Планируемое повышение энергии в импульсе до 200 мДж на выходе многопроходного усилителя будет достигнуто при увеличении входной энергии импульса с 1.5 до 5 мДж и энергии импульса накачки до 1.5 Дж. В частности, это позволит увеличить апертуру усиливаемого пучка с 3.5 до 5 мм и значительно повысить порог пробоя. Дополнительно для подавления эффекта наката будет применено предварительное временное профилирование лазерного импульса (как в [17]). Для работы при ЧСИ 100 Гц будет уменьшена толщина АЭ до 1 мм и повышен уровень легирования.

3. Генерация и усиление фемтосекундного сигнала

Основной сигнал субпикосекундного иттербиевого лазера направляется в канал генерации и усиления фемтосекундного импульса. Первые результаты исследования этого канала представлены в работе [18]. Улучшенная схема генерации фемтосекундных импульсов в ИК диапазоне приведена на рис.6. Сигнал с энергией в импульсе более 0.3 мДж, длительностью 250 фс и регулируемой ЧСИ до 15 кГц направляется в кристалл ВВО 1, где часть энергии сигнала (~100 мкДж) преобразуется во 2-ю гармонику. Далее дихроичное зеркало 2 разделяет сигналы с длинами волн 1030 и 515 нм, а дихроичное зеркало 3 дополнительно разделяет сигнал 2-й гармоники в соотношении 1:3. Меньшая часть сигнала фокусируется в кристалл YAG 4 для генерации суперконтинуума в диапазоне 400–800 нм. Длинноволновая часть данного излучения коллимируется сферическим зеркалом 5, селекционируется дихроичным зеркалом 6 и направляется в нелинейный кристалл ВВО 7 толщиной 1.5 мм. Большая часть сигнала 2-й гармоники направляется через линию задержки 8 в кристалл ВВО 7 для коллинеарного параметрического усиления длинноволновой части спектра суперконтинуума в диапазоне длин волн 650–720 нм. При этом генерируется излучение разностной частоты с длиной волны в диапазоне 1800–2500 нм. Как описано в [19], это излучение обладает стабилизированной фазой между электромагнитным полем и огибающей, что является важным преимуществом в аттосекундной физике. Далее сигнал на разностной частоте селекционируется дихроичным зеркалом 9 и фильтром 10 и направляется на каскад неколлинеарного параметрического усиления в кристалле ВВО 11 толщиной 2 мм. Одновремен-

но благодаря использованию линии задержки 12 в этот кристалл приходит излучение с фундаментальной длиной волны 1030 нм, оставшееся после генерации 2-й гармоники. Угол неколлинеарного взаимодействия в воздухе равен примерно 2°. Диаметр пятна пучка параметрической накачки составляет 2 мм при максимальной энергии до 200 мкДж. Излучения накачки и сигнала дважды проходят через нелинейный элемент 11 с одинаковым углом синхронизма ($\theta \approx 21.4^\circ$), что позволяет значительно увеличить эффективность преобразования. Для вывода излучения импульсы сигнала и накачки отражаются под небольшим углом в вертикальной плоскости (ортогональной к плоскости рис.6). Указанный выше угол синхронизма обеспечивает широкополосное параметрическое усиление в ВВО в области 1800–2400 нм [20].

Результаты измерений показаны на рис.7 и 8. Все измерения выполнялись при ЧСИ иттербиевого регенеративного усилителя 3 кГц. При энергии импульса накачки 205 мкДж энергия усиленного импульса с центральной длиной волны 2250 нм составила 26 мкДж с эффективностью преобразования более 12% (рис.7). Долговременная стабильность средней мощности усиленного излучения равна 2% rms. Ширина спектра усиленного излучения составила более 200 нм с перестройкой центральной длины волны от 1950 до 2250 нм, что соответствует длительности спектрально ограниченного импульса менее 40 фс. Перестройка осуществлялась изменением угла синхронизма кристалла ВВО 7. Отметим, что в данной схеме ширина полосы усиленного сигнала была ограничена шириной полосы синхронизма коллинеарного взаимодействия при генерации разностной частоты в кристалле

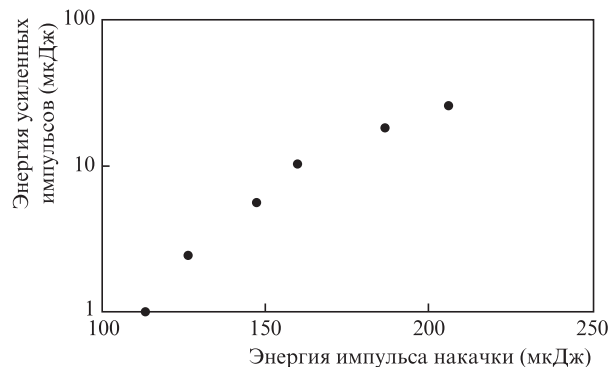


Рис.7. Зависимость энергии усиленных фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны 2250 нм от энергии импульсов накачки.

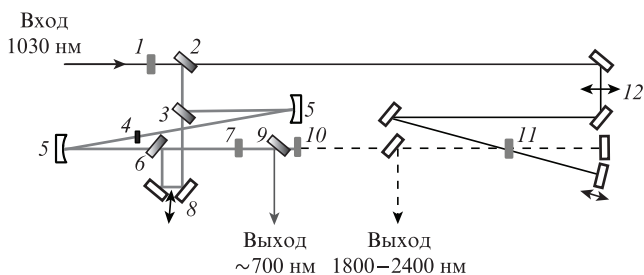


Рис.6. Оптическая схема генерации и параметрического усиления фемтосекундных импульсов (черными линиями показано излучение с длиной волны 1030 нм, серыми – в видимой и ближней ИК областях, штриховыми – в области 2 мкм): 1, 7, 11 – кристаллы ВВО; 2, 3, 6, 9 – дихроичные зеркала; 4 – кристалл YAG; 5 – сферические зеркала; 8, 12 – линии задержки, 10 – фильтр ИКС.

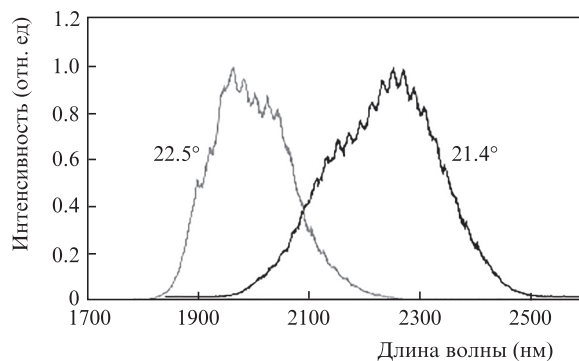


Рис.8. Спектральное распределение интенсивности усиленных фемтосекундных импульсов при углах синхронизма кристалла ВВО 7 $\theta = 21.4^\circ$ и 22.5° .

ВВО 7. Уменьшение его толщины с 1.5 до 0.5 мм при небольшом уменьшении диаметра пучка накачки излучением 2-й гармоники позволит увеличить ширину спектра сигнала разностной частоты примерно в 3 раза и обеспечить его широкополосное усиление в диапазоне 1900–2400 нм.

К сожалению, область длин волн более 2 мкм затруднена для исследований поперечного и временного распределений импульса. В работе [18] в близкой к описанной выше схеме исследовано сжатие фемтосекундного импульса с центральной длиной волны 1.4 мкм до длительности 30 фс. В настоящей работе также проведено исследование компрессии усиленных фемтосекундных импульсов до спектрально ограниченной длительности. Измерения выполнялись коммерческим прибором на основе подхода SHG-FROG [21]. Спектральная чувствительность данного прибора ограничена длиной волны 2100 нм из-за резкого снижения спектральной чувствительности используемой CCD-матрицы при $\lambda > 1050$ нм. Поэтому исследовались импульсы фемтосекундного излучения в более коротковолновом диапазоне длин волн при $\theta = 22.5^\circ$ (см. рис.8), которому соответствует более узкая полоса излучения. Согласно выполненным измерениям добавление пластинки ZnSe толщиной 4 мм (обладающей в данном диапазоне длин волн дисперсией групповой скорости, равной приблизительно $300 \text{ фс}^2/\text{мм}$) позволило сжать импульсы излучения от 100 до 50 фс при длительности спектрально ограниченного импульса 40 фс (рис.9). Ошибка алгоритма FROG составила 2.1%. Разумно ожидать, что импульсы излучения со спектром, соответствующим углу $\theta = 21.4^\circ$, можно сжать до длительности менее 40 фс.

Для дальнейшего усиления фемтосекундного сигнала на длине волны ~ 2 мкм в миллиджоулевой диапазон энергий необходимо использовать метод усиления chirпированных импульсов [22], позволяющий минимизировать различные нелинейные эффекты, возникающие при распространении импульсов как в воздухе, так и в усиливающей среде. В рамках настоящей работы рассмотрены два различных варианта экспериментальной реализации растяжения и сжатия фемтосекундных импульсов для следующего каскада параметрического усиления с накачкой импульсами регенеративного усилителя длительностью 20 пс.

1. Применение классического стретчера и компрессора с chirпированием в 10–15 пс и неколлинеарной ОРСПА-схемы на основе кристалла ВВО. Для решения данной задачи возможно применение стретчера по схеме Мартинеза [23, 24] или Оффнера [25] на базе коммерчески доступных дифракционных решеток (ДР) (Thorlabs) с 600 штр./мм и размерами 50×50 мм. Используя в стретчере сферическое зеркало с фокусным расстоянием 200 мм в паре с плоским, можно собирать компактный однорешеточный стретчер с характерными габаритами 250×100 мм и регулируемой длительностью выходного излучения в требуемом диапазоне 10–20 пс. К сожалению, из-за небольшой дисперсии нет технической возможности использовать классическую схему компрессора Трейси [26], в которой, согласно расчетам, расстояние между ДР составляет 1–2 см. Решеточный компрессор на базе такой же ДР может быть собран по аналогии со стретчером, но со смещением ДР в противоположном направлении вдоль оптической оси системы. Достоинством рассмотренной пары является возможность точного согласования дисперсий стретчера и компрессора, а также возможность подстройки дисперсии компрессора для компенсации набега фазы в усилителе. При энергии фемтосекундного импульса до 1 мДж пробоя можно избежать с помощью увеличивающего телескопа. Недостатками являются невысокая лучевая стойкость решетки и высокие потери компрессора ($\sim 35\%$), что актуально при дальнейшем масштабировании системы с использованием более мощной накачки. В качестве альтернативы возможна компрессия за счет дисперсии в объеме различных стекол. Это позволит избавиться от указанных выше недостатков, однако потребует согласования между стретчером и компрессором дисперсии следующих порядков.

2. Альтернативой первому варианту является недавно предложенный метод High Gain Frequency Domain Optical Parametric Amplification (FOPA) [27]. Сравнение этого подхода с классическим параметрическим усилением chirпированных импульсов подробно описано в работе [28]. К основным достоинствам нового метода относится комбинация системы стретчер–компрессор с полным согласованием дисперсии в одной схеме с усилителем, а также отсутствие необходимости временного профилирования импульса для равномерного усиления во всем спектральном диапазоне. В нашем случае для экспериментальной ре-

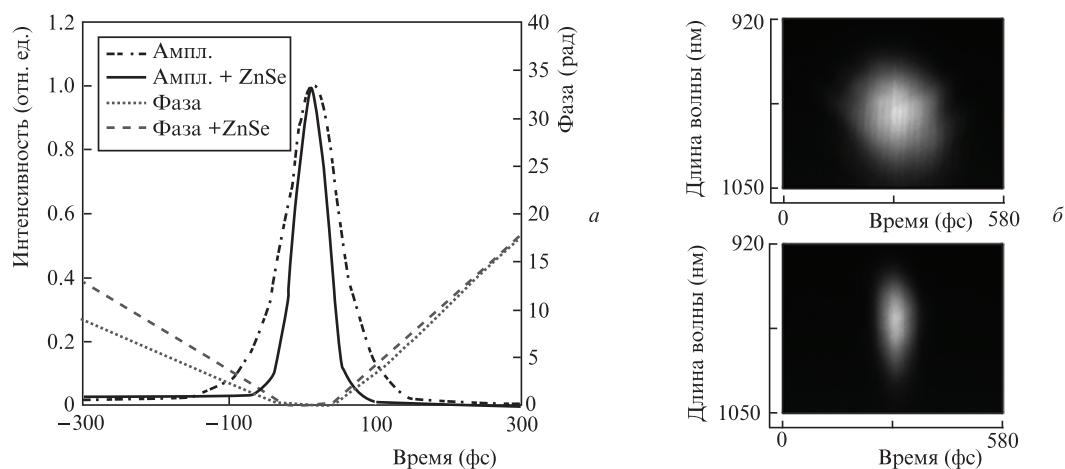


Рис.9. Временные зависимости интенсивности и фазы импульсов, восстановленные методом FROG (а), а также спектрально-временные распределения интенсивности при измерении длительностей импульса до (вверху) и после компрессии с использованием пластины ZnSe (внизу) (б).

лизации удобнее воспользоваться модификацией данной схемы с цилиндрическими зеркалами вместо сферических [5], а упомянутая выше ДР с 600 штр./мм является одной из наиболее подходящих для растяжения импульса до длительности ~ 15 пс внутри усилителя. Однако из-за большого угла расхождения излучения, отраженного от ДР, возникает ряд сложностей при проектировании оптической схемы усилителя. Кроме того, для параметрического усиления необходим нелинейный кристалл ВВО с довольно большой апертурой ($\sim 10 \times 25$ мм). На сегодняшний день рассчитано несколько вариантов для проведения предварительных экспериментов, и окончательное решение будет сформировано исходя из полученных результатов.

С учетом результатов реализации описанных выше вариантов усиления chirпированных фемтосекундных импульсов будет разработан следующий каскад параметрического усиления с накачкой излучением с выхода многопроходного дискового усилителя импульсами с энергией до 200 мДж. При необходимости, излучение после многопроходного усилителя также может быть сжато до длительности в несколько десятков пикосекунд. В результате, при эффективности преобразования более 10% энергия фемтосекундных импульсов может быть увеличена до 30 мДж, и при сжатии их до спектрально ограниченной длительности можно получить 1 ТВт пиковой мощности, что близко к рекордным значениям в ИК диапазоне на сегодняшний день.

4. Заключение

В работе представлены первые результаты разработки лазерной системы с центральной длиной волны в области 2 мкм на основе современных подходов к генерации и усилению фемтосекундных импульсов и создания пикосекундных иттербиевых лазеров. Фемтосекундный канал излучения обеспечивает энергию в импульсе более 20 мкДж с длиной волны в диапазоне 1.9–2.4 мкм. Такая ширина спектра усиления соответствует длительности спектрально ограниченного импульса менее 2 фс. При этом реализована пассивная стабилизация фазы между электромагнитным полем и его огибающей (CEP-stabilization). Оптически синхронизированный с фемтосекундным излучением канал накачки на основе дискового регенеративного усилителя обеспечивает энергию на выходе до 5 мДж при длительности импульсов ~ 20 пс и частоте следования 3 кГц. Для использования в качестве следующего каскада накачки разработан многопроходный дисковый усилитель, первые экспериментальные исследования которого продемонстрировали энергию импульсов на выходе 70 мДж. Также разработан принципиальный дизайн следующего каскада параметрического усиления.

Созданная лазерная система с уровнем энергии более 20 мкДж и центральной длиной волны в районе 2 мкм может быть применима для научных исследований в области ультрабыстрой лазерной спектроскопии, а также некоторых исследований в области аттосекундной физики. В качестве дальнейшего шага энергия имеющегося сигнала будет увеличена до миллиджоулевых значений с использованием в качестве накачки 20-миллиджоулевых импульсов регенеративного усилителя, оптически синхронизированного с разработанной фемтосекундной системой. Также будут разработаны подходы для получения усиленных импульсов с тераваттным уровнем пиковой мощности с ис-

пользованием многопроходного дискового усилителя в качестве источника импульсов накачки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их взаимодействие с веществом» (проект №0035-2018-0023) в части разработки фемтосекундного источника с центральной длиной волны ~ 2 мкм и при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект №075-15-2019-1371, уникальный идентификатор RFMEFI60718X0201) – разработка иттербиевых лазеров накачки.

1. Gaumnitz T., Jain A., Pertot Y., Huppert M., Jordan I., Ardana-Lamas F., Wörner H. *J. Opt. Express*, **25**, 27506 (2017).
2. Jahn O., Leshchenko V.E., Tzallas P., Kessel A., Krüger M., Münzer A., Trushin S.A., Tsakiris G.D., Kahaly S., Kormin D., Veisz L., Pervak V., Krausz F., Major Z., Karsch S. *Optica*, **6**, 280 (2019).
3. Woodbury D., Feder L., Shumakova V., Gollner C., Schwartz R., Miao B., Salehi F., Korolov A., Pugžlys A., Baltuška A., Milchberg H.M. *Opt. Lett.*, **43**, 1131 (2018).
4. Clerici M., Peccianti M., Schmidt B.E., Caspani L., Shalaby M., Giguère M., Lotti A., Couairon A., Légaré F., Ozaki T., Faccio D., Morandotti R. *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 253901 (2013).
5. Gruson V., Ernotte G., Lassonde P., Laramée A., Bionta M.R., Chaker M., Di Mauro L., Corkum P.B., Ibrahim H., Schmidt B.E., Legaré F. *Opt. Express*, **25**, 27706 (2017).
6. Fu Y., Nishimura K., Suda A., Midorikawa K., Takahashi E. *Proc. SPIE LASE*, **10522** (2018).
7. Baumgarten C., Pedicone M., Bravo H., Wang H., Yin L., Menoni C.S., Rocca J.J., Reagan B.A. *Opt. Lett.*, **41**, 3339 (2016).
8. Jung R., Tümmler J., Will I. *Opt. Express*, **24**, 883 (2016).
9. Budriūnas R., Stanislauskas T., Varanavičius A. *J. Opt.*, **17**, 094008 (2015).
10. Alismail A., Wang H., Altwaijry N., Fattahi H. *Appl. Opt.*, **56**, 4990 (2017).
11. Волков М.Р., Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **49**, 354 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 354 (2019)].
12. Saltarelli F., Koenen D., Lang L., Graumann I.J., Phillips C.R., Keller U. *Proc. Laser Congress* (Vienna, OSA, 2019, p. JM5A.35).
13. Volkov M. R., Mukhin I.B., Kuznetsov I.I., Palashov O.V. *J. Opt. Soc. Am. B*, **36**, 1370 (2019).
14. Diebold A., Saltarelli F., Graumann I.J., Saraceno C.J., Phillips C.R., Keller U. *Opt. Express*, **26**, 12648 (2018).
15. Casanova A., D'Acremont Q., Santarelli G., Dilhaire S., Courjaud A. *Opt. Lett.*, **41**, 898 (2016).
16. Schimpf D.N., Ruchert C., Nodop D., Limpert J., Tünnermann A., Salin F. *Opt. Express*, **16**, 17637 (2008).
17. Mironov S.Y., Poteomkin A.K., Gacheva E.I., Andrianov A.V., Zelenogorskii V.V., Vasiliev R., Smirnov V., Krasilnikov M., Stephan F., Khazanov E. A. *Laser Phys. Lett.*, **13**, 055003 (2016).
18. Мухин И.Б., Кузнецов И.И., Палашов О.В. *Квантовая электроника*, **48**, 340 (2018) [*Quantum Electron.*, **48**, 340 (2018)].
19. Baltuška A., Fuji T., Kobayashi T. *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 133901 (2002).
20. Lai C.-J., Hong K.-H., Siqueira J., Krogen P., Chang C.-L., Stein G., Liang H., Keathley P., Laurent G., Moses J., Zapata L., Kärtner F. *J. Opt.*, **17**, 094009 (2015).
21. DeLong K.W., Trebino R., Hunter J., White W.E. *J. Opt. Soc. Am. B*, **11**, 2206 (1994).
22. Strickland D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
23. Martinez O. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 59 (1987).
24. Fiorini C., Sauteret C., Rouyer C., Blanchot N., Seznec S., Migus A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1662 (1994).
25. Offner A. Patent US № 3748015 (priority date July 24, 1973).
26. Treacy E.B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-5**, 454 (1969).
27. Schmidt B.E., Thiré N., Boivin M., Laramée A., Poitras F., Lebrun G., Ozaki T., Ibrahim H., Légaré F. *Nat. Commun.*, **5**, 3643 (2014).
28. Lassonde P., Thiré N., Arissian L., Ernotte G., Poitras F., Ozaki T., Laramée A., Boivin M., Ibrahim H., Légaré F., Schmidt B.E. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **21**, 1 (2015).