

УДК 535:621.373.826

Разработка криогенной лазерной системы на керамике, активированной ионами иттербия, с диодной накачкой

В.В. Петров, Е.В. Пестряков, В.И. Трунов, А.В. Кирпичников,
М.А. Мерзляков, А.В. Лаптев*

*Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3*

Поступила в редакцию 12.10.2011 г.

Представлены разработанные принципы, особенности и схема усиления фемтосекундных импульсов до субтераваттного уровня, описана элементная база лазерной системы на керамических и кристаллических материалах, активированных ионами иттербия (Yb:Y₂O₃, Yb:KYW и др.), и нелинейно-оптических кристаллах LBO. Показана возможность создания тераваттной фемтосекундной лазерной системы с диодной накачкой при частоте повторения до 1000 Гц и гибридном (параметрическое и лазерное) методе усиления chirпованных импульсов с оптической синхронизацией излучения каналов накачки и усиления. Экспериментально исследована работа накачиваемого излучением диодов начального каскада криогенной лазерной системы, состоящего из криогенного задающего генератора на лазерной керамике Yb:Y₂O₃ (100 МГц, 160–180 фс), стретчера, диоднонакачиваемого регенеративного усилителя и компрессора.

Ключевые слова: нанокерамические среды, ионы иттербия, разупорядоченные материалы, криогенные температуры, фемтосекундные импульсы, высокоинтенсивные лазерные системы, лазерная диодная накачка; nanoceramic active media, ytterbium ions, disordered materials, cryogenic temperatures, femtosecond pulses, high-intensity laser systems, laser diode pumping.

Введение

Развитие фемтосекундных лазерных систем с диодной лазерной накачкой, работающих с высокой частотой повторения, стало возможным вследствие стремительного роста технологии изготовления новых лазерных материалов, активированных ионами иттербия. Особенностью таких материалов является то, что широкие спектральные полосы и значительные коэффициенты усиления менее критичны к выбору источников полупроводниковой накачки, а использование в усилительных каскадах кристаллов и лазерных нанокерамик на основе сложных оксидов с примесными ионами иттербия с неоднородно уширенными полосами усиления позволяет поддерживать генерацию и усиление импульсов с предельно короткой длительностью, в том числе при понижении температуры активных элементов до криогенных значений.

Среди материалов, активированных ионами Yb³⁺, лазерные керамики на основе полуторных оксидов Yb:Y₂O₃ и Yb:Sc₂O₃ привлекательны для создания на их основе высокоинтенсивных лазер-

ных систем, поскольку обладают отличной теплопроводностью, широкими полосами усиления фемтосекундных импульсов и изотропностью строения. Материалы, такие как Yb:Y₂O₃, имеют теплопроводность выше, чем известный лазерный кристалл Yb:YAG, широкие полосы поглощения и излучения, высокий нелинейный показатель преломления, облегчающий реализацию режима синхронизации мод за счет эффективного включения керровского механизма [1]. Совершенствование технологии изготовления позволяет создавать для усилителей элементы с большой апертурой и высокими оптическим качеством и однородностью. Также вязкость разрушения керамики в 5 раз выше, чем для монокристаллов. Высокие запасаемые плотности энергии накачки и плотности энергии насыщения позволяют масштабировать высокоинтенсивные лазерные установки до мультитераваттного уровня [2, 3]. Использование усилительных каскадов на основе лазерных стекол для генерации импульсов с пиковой мощностью уже тераваттного уровня не позволяет поднять частоту повторения импульсов выше единиц герц [4]. Применение диодной накачки в высокоинтенсивных лазерных системах дает возможность увеличить частоту повторения импульсов на несколько порядков благодаря снижению тепловой нагрузки на активные элементы генераторов и усилительных каскадов [5]. В усилителях, работающих на лазерном принципе, одним из основных недостатков является сужение полосы усиления при многопроходном усилении. Наши исследования,

* Виктор Валерьевич Петров (vpstv@laser.nsc.ru); Ефим Викторович Пестряков (pefvic@laser.nsc.ru); Владимир Иванович Трунов (trunov@laser.nsc.ru); Анатолий Васильевич Кирпичников (kirp@laser.nsc.ru); Михаил Александрович Мерзляков (mm@laser.nsc.ru); Алексей Викторович Лаптев (alaptev@laser.nsc.ru).

направленные на увеличение частоты следования усиливаемых импульсов и на поиск путей расширения полосы их усиления, показали, что оптимальным является путь, использующий широкополосное параметрическое усиление фемтосекундных импульсов и лазерное усиление с диодной накачкой источников излучения накачки параметрического усилителя.

Основные принципы построения системы

Развиваемый метод создания фемтосекундной лазерной системы с диодной накачкой основан на гибридном (параметрическое + лазерное) методе усиления [2] в двух параллельных каналах импульсов, генерируемых стартовым фемтосекундным Yb-лазером (рис. 1).

Одним из них является канал вырожденного параметрического усиления отрицательно chirпованных фемтосекундных импульсов, прошедших через фотонный кристалл. В фемтосекундном канале усиления в фотонном кристалле осуществляются нелинейное преобразование импульса стартового генератора (центральная длина волны 1030 нм, длительность ~ 200 фс) и обогащение его спектра до 400 нм, а также его временная растяжка до 7–10 пс в стретчере. Для усиления спектрально обогащенных импульсов используется квазивырожденное широ-

кополосное параметрическое усиление в кристаллах LiB_3O_5 (LBO). Таким образом, после широкополосного компрессора на базе chirпованных зеркал и оптических материалов с положительной дисперсией данная схема усиления позволяет получать импульсы длительностью ~5–10 фс, усиленные до 5–10 мДж.

Вторым является канал накачки, усиливающий положительно chirпованные импульсы стартового Yb-лазера до пиковых мощностей, необходимых для эффективного преобразования во вторую гармонику и накачки параметрического усилителя первого канала. Канал накачки, состоящий из последовательности криогенных Yb-усилителей, накачиваемых излучением лазерных диодов, формирует после стретчера на дифракционных решетках высокоинтенсивные импульсы пикосекундной длительности для реализации эффективного параметрического усиления. Особенность канала накачки параметрического усилителя состоит в криогенном режиме его работы. В качестве активных сред были исследованы керамические и кристаллические материалы, активированные ионами иттербия ($\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$, Yb:YVO_4 , $\text{Yb:(Y}_{1-x}\text{Gd}_x)\text{VO}_4$ и $\text{Yb:KY(WO}_4)_2$). При понижении температуры активированные иттербием лазерные среды работают по 4-уровневой схеме, что приводит к значительному повышению их эффективности и уменьшению тепловой нагрузки на активный элемент.

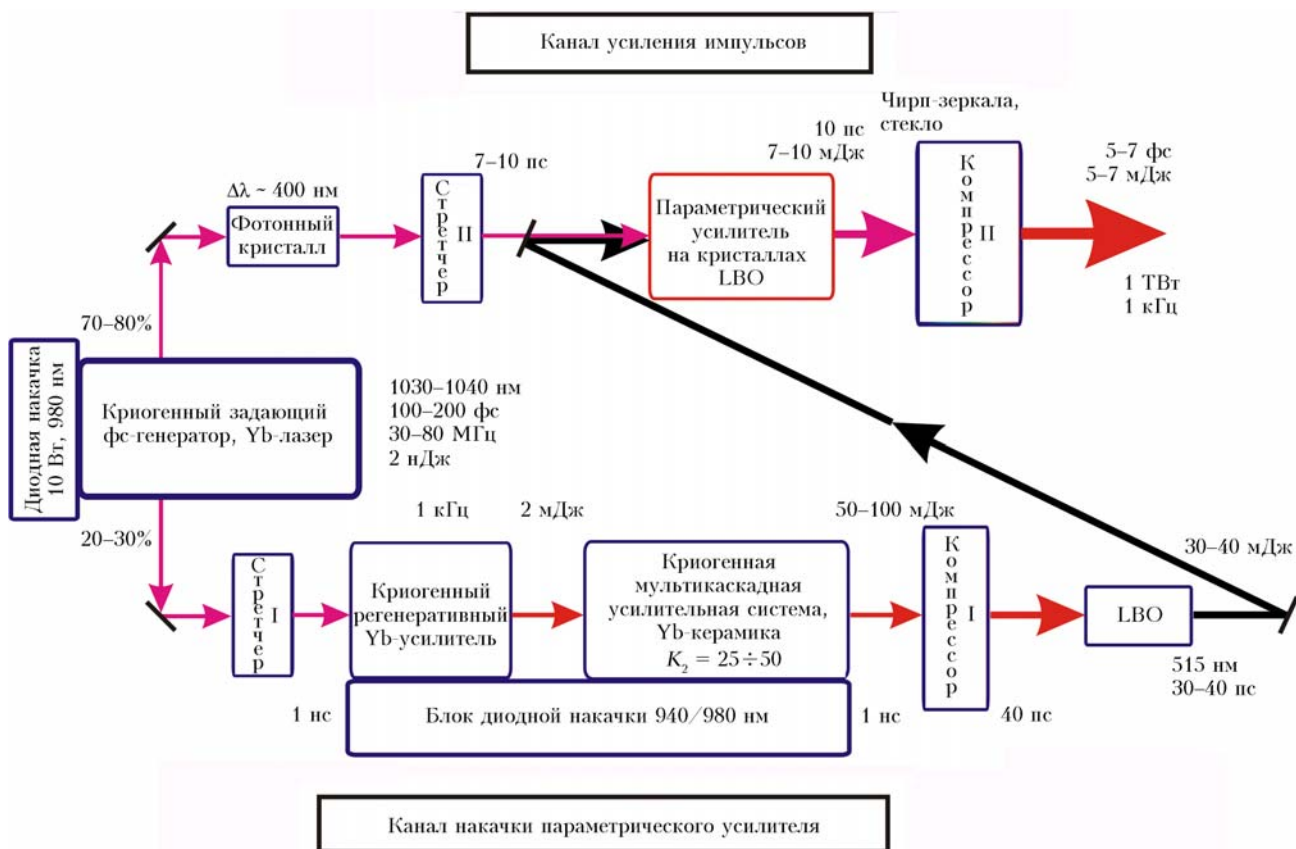


Рис. 1. Тераваттная фемтосекундная лазерная система с диодной накачкой и высокой частотой повторения импульсов на материалах, активированных ионами иттербия

Оптическая синхронизация канала усиления фемтосекундных импульсов и канала его накачки достигается разделением излучения единого стартового генератора фемтосекундных импульсов. Данная схема обладает рядом существенных достоинств:

во-первых, автоматически достигается оптическая синхронизация импульсов излучения каналов усиления и накачки;

во-вторых, параметрическое усиление в первом канале происходит в режиме, близком к вырожденному, так как усиление практически идет в режиме «генерации субгармоники», что обеспечивает максимальный коэффициент усиления в параметрическом процессе;

в-третьих, при криогенных температурах лазерные среды, активированные иттербием, переходят в режим работы по четырехуровневой схеме, что повышает в несколько раз эффективность их усиления;

в-четвертых, при криогенных температурах с ростом теплопроводности и уменьшением величины термооптических постоянных и коэффициентов теплового расширения твердотельных активных элементов уменьшается величина тепловой нагрузки на активный элемент и становится возможной работа с высокой средней мощностью и с частотой повторения импульсов до десятков килогерц;

в-пятых, для достижения тераваттного уровня на выходе системы при формировании и усилении в параметрическом канале импульсов со спектральной шириной ~ 400 нм в области 1030 нм (что эквивалентно длительности спектрально ограниченного импульса 5 фс) необходимая энергия в выходном импульсе составляет всего лишь 5 мДж.

Принципиальным является использование параметрического усиления импульсов в элементах из нелинейно-оптических кристаллов с высокой квадратичной нелинейностью и высокой стойкостью к оптическому пробую. Большеразмерные кристаллы LBO позволяют масштабировать усилительные каскады системы до мультитераваттного уровня и при этом обеспечивают спектральную полосу усиления, достаточную для поддержания усиления импульсов длительностью вплоть до 5 фс.

Численное моделирование показало, что применение в каскаде накачки волоконного стретчера на основе одномодового волокна с сохранением поляризации более эффективно по сравнению с решеточным. При этом уменьшаются геометрические размеры стретчера и длительность chirпованного импульса, подаваемого в регенеративный усилитель, можно увеличить с 100 фс до ~ 1 пс при длине волокна около 1 км [6].

Эксперименты при криогенных температурах

Экспериментально исследована работа накачиваемого излучением диодов начального каскада тераваттной фемтосекундной лазерной системы с длительностью выходных импульсов ~ 250 фс, с частотой повторения до 10 кГц, состоящего из криогенного задающего генератора на лазерной керамике $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$

(100 МГц, 160–180 фс), решеточного стретчера, диодно-накачиваемого регенеративного усилителя на кристалле Yb:KYW и компрессора.

Резонатор задающего генератора был собран по X-образной схеме с дополнительным полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SESAM) и парой брюстеровских призм из материала SF-10, обеспечивающих компенсацию групповых скоростей, при диодной накачке (9 Вт, 976 нм). После прохождения через фокусирующую линзовую систему и угловое зеркало резонатора луч накачки мощного полупроводникового лазера с волоконным выходом фокусировался в активном элементе в пятно размерами $\sim 100 \times 150$ мкм. Элемент толщиной 0,8 мм из керамики $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ (10 ат.% Yb^{3+}) был установлен под углом Брюстера в охлаждаемом до температуры 80 К вакуумном криостате.

В резонаторе активная среда помещалась между двумя дихроичными зеркалами с радиусами кривизны 100 и 250 мм. Угол между плечами резонатора $\sim 10^\circ$ не обеспечивал полной компенсации астигматизма. Размеры лазерной моды в области фокусировки, рассчитанные с помощью методов матричной оптики, составили 70×80 мкм. Для пассивной синхронизации мод использовалась полупроводниковая структура SESAM со следующими характеристиками – изменение коэффициента отражения 2% на длине волны 1040 нм, плотность энергии насыщения 70 мкДж/см², постоянная времени релаксации 500 фс. Внутри резонатора лазерный пучок фокусировался дополнительным зеркалом радиусом 150 мм на SESAM в пятно диаметром 80 мкм. В качестве спектрально-ограничивающего элемента в резонатор была внесена щелевая диафрагма перед выходным зеркалом. Подложка выходного зеркала имела клин $30'$ для исключения паразитных отражений от обратной поверхности.

При прохождении через однорешеточный стретчер со спектральной полосой пропускания более 100 нм (решетка $40 \times 90 \times 16$ мм, 1000 штр/мм, фокусирующее зеркало $R = 1500$ мм и два плоских зеркала) входящий в стретчер 160-фс импульс на выходе растягивается до ~ 50 пс. При работе регенеративного усилителя излучение накачки через дихроичное зеркало с пропусканием $T = 85\%$ на длине волны излучения накачки и отражением $R > 99,8\%$ в диапазоне длин волн 1015–1100 нм фокусируется согласованной парой ахроматических дублетов с фокусами 50 мм в активный элемент, в пятно диаметром ~ 200 мкм.

Резонатор регенеративного усилителя (рис. 2) образован плоскими зеркалами M_1, M_2, M_3, M_4 и сферическим зеркалом M ($R = 700$ мм). В резонаторе установлена пластинка $\lambda/4$ и электрооптический затвор на основе кристалла DKDP (ЭОЗ). В оптическом блоке расположены также зеркала Z_1 и Z_2 , предназначенные для инъекции излучения в резонатор регенеративного усилителя, широкополосный изолятор Фарадея FI, вращающий плоскость поляризации на 90° , тонкопленочный поляризатор П, работающий на отражение s-поляризации ($R_s > 98\%$), вспомогательное зеркало $Z_{\text{вых}}$ для направления излучения в выходное отверстие.

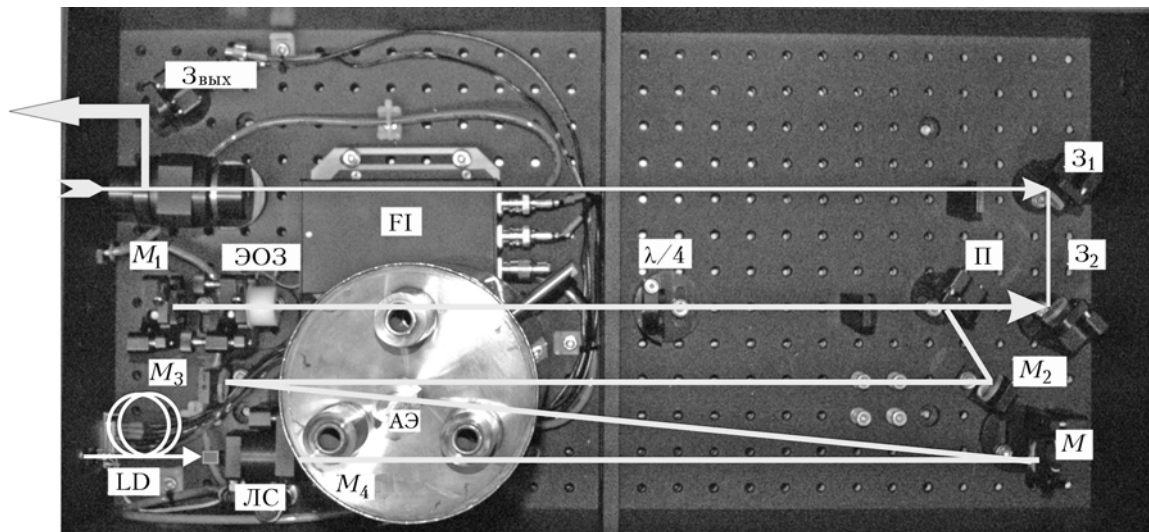


Рис. 2. Криогенный регенеративный усилитель и оптическая схема

На выходе системы импульс сжимается решеточным компрессором (решетка $40 \times 90 \times 16$ мм, 1000 штр/мм и плоское зеркало, полоса пропускания компрессора > 100 нм) до 250 фс. Максимальная мощность накачки составляет 35 Вт на длине волны 980 нм. При работе усилителя при комнатной температуре на длине волны вблизи 1030 нм на выходе лазерной системы энергия в импульсе достигает 250 мкДж.

В разработанном криогенном лазере на керамике $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ дифференциальный кпд лазера на длине волны 1032 нм при комнатной температуре составил $\sim 30\%$, тогда как при температуре жидкого азота кпд вырос почти в 2 раза. При понижении температуры кроме повышения выходной мощности наблюдаются существенное расширение диапазона перестройки лазерной генерации в спектральных областях вблизи 1030 и 1080 нм и сдвиг полосы усиления в коротковолновую область спектра (рис. 3).

Анализ экспериментальных результатов показывает, что при синхронизации всего контура усиления лазерной среды $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$, выходящего в генерацию (спектральная область вблизи 1030 нм, полуширина 20 нм), длительность импульсов излучения может быть менее 50 фс. Повышение эффективности работы лазера при низких температурах достигается путем наилучшего согласования параметров накачки и основного излучения. Кроме того, разрабатываемый на основе диодной линейки JOLD-30-FC12 (Германия) с волоконным выходом мощный источник лазерной диодной накачки с длиной волны излучения вблизи 945–950 нм позволяет использовать при низких температурах для накачки интенсивные широкие полосы поглощения вблизи 950 нм.

При понижении температуры и наблюдаемом росте коэффициента усиления в несколько раз (4–10) для эффективного усиления требуется уменьшать температурные спектральные сдвиги контуров усиления генератора и усилителя, например путем

понижения температуры активных элементов всей лазерной системы.

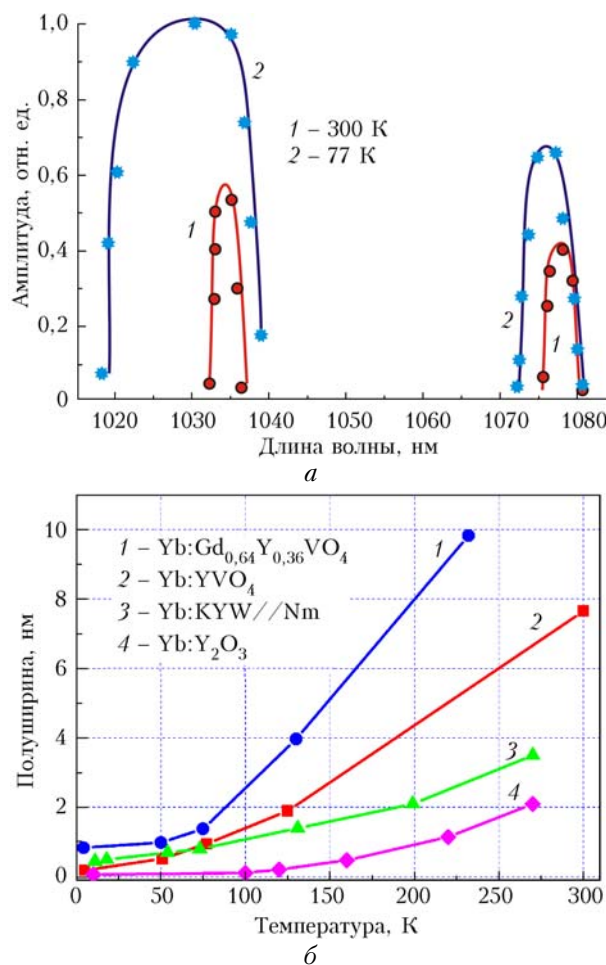


Рис. 3. Характеристики активных сред при низких температурах: а – диапазоны перестройки излучения $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ -лазера; б – температурная зависимость ширины полос поглощения активных сред в области спектра излучения лазера накачки

В числе трудностей работы при криогенных температурах стоит отметить температурный сдвиг спектральных контуров усиления и поглощения, составляющий по величине единицы нанометров, и уменьшение ширины полосы поглощения накачки. Эти факторы могут быть преодолены использованием кристаллических и нанокерамических материалов с разупорядоченной кристаллической структурой. Вклад в эффективную ширину полос излучения и поглощения таких сред $\Delta v_{eff} = \Delta v_{inhomo} + \Delta v_{homo}(T)$ дает неоднородное и однородное уширение, зависящее от температуры. Была исследована зависимость ширины полосы поглощения на 0–0-переходе ${}^2F_{7/2} - {}^2F_{5/2}$ ионов Yb^{3+} в кристаллах $Gd_{0,64}Y_{0,36}VO_4$, которые можно рассматривать как кристаллы с частично разупорядоченной структурой, YVO_4 , KYW и в лазерной керамике Y_2O_3 , от температуры в диапазоне от 6 до 270 К (см. рис. 3).

Кроме того, в диапазоне от комнатной до температуры жидкого азота поляризованные спектры поглощения кристаллов $Yb:KYW$ детально измерялись со спектральным разрешением 0,3 нм в области 800–1150 нм. Для измерений при гелиевых температурах применялся спектрофотометр Bruker IFS 125HR (Германия), оборудованный криостатом CryoMech ST403, обеспечивающий разрешение 0,05 нм, со стабильностью поддержания температуры $\pm 0,05$ К. Для исследований использовались полированные плоскопараллельные образцы толщиной 0,3 мм и концентрацией ионов Yb^{3+} 5 и 10 ат. %.

Анализ данных показывает, что при достижении температуры 10 К полуширина линии вблизи 981,2 нм уменьшается с 3,5 до 0,4 нм. Дальнейшее понижение до 6 К приводит к уменьшению до 0,2 нм, при этом величина сечения поглощения возрастает в 5 раз. Полуширина полосы излучения при температуре жидкого азота (~6 нм) сравнима с полосой при комнатной температуре (16 нм), а сечение излучения растет до $6 \cdot 10^{-20}$ см².

Полученные результаты важны для оптимизации режима работы и параметров выходного излучения $Yb:KYW$ регенеративного усилителя в криогенном режиме с высокой частотой повторения импульсов. Проведенные исследования показывают перспективность использования системы «генератор – регенеративный усилитель» на начальных стадиях усилительных каскадов с килогерцовой частотой повторения импульсов при разработке криогенных высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных систем, накачиваемых излучением полупроводниковых лазеров.

Для эффективной генерации и усиления ультракоротких импульсов активные среды фемтосекундных лазерных систем должны обладать, прежде всего, широкими полосами усиления. Реализовать широкую полосу усиления и расширить диапазон перестройки при понижении температуры до криогенных значений также можно при использовании комбинированной среды, состоящей из активных сред с перекрывающимися контурами усиления, помещенных в общий лазерный резонатор [7]. Этот принцип был развит для активированных иттерби-

ем активных сред и реализован на примере среды на базе керамики $Yb:YAG$ – кристалла $Yb:YVO_4$ при диодной накачке [8]. Сравнительно недавно были получены фемтосекундные импульсы в полностью керамическом лазере $Yb:Y_2O_3 - Yb - Sc_2O_3$ при комнатной температуре [9]. Этот подход позволяет создавать различные комбинации лазерных сред не только при комнатной температуре, но и при криогенном охлаждении всех сред либо некоторых из них.

Система сжатия и растяжения импульсов

При усилении фемтосекундных импульсов для исключения пробоя оптических элементов усилителя используется метод усиления chirпованных импульсов. Суть этого метода состоит в том, что исходный импульс пропускается через линию задержки с большой дисперсией групповой скорости (стретчер), после которой становится chirпованным, а его длительность увеличивается на сотни порядков. После усиления импульс, проходя через линию задержки, имеющую ту же дисперсию групповой скорости противоположного знака (компрессор), приобретает исходную длительность.

Важным моментом наряду с большим коэффициентом растяжения и широкой полосой пропускания является точная компенсация дисперсии групповой скорости, возникающей в стретчере при последующем прохождении через компрессор. Рассогласование системы «компрессор–стретчер» приводит к наличию остаточной дисперсии, а значит, к увеличению длительности и ухудшению качества импульса. Все это ужесточает требования к конструкции и точности выставления углов и расстояний для составных элементов стретчера и компрессора, что соответственно обуславливает точную механику системы настройки.

Наиболее эффективным регулятором дисперсии групповой скорости является регулятор в виде пары отражательных дифракционных решеток [10]. Набег фаз при прохождении излучения между двумя дифракционными решетками

$$\varphi = \frac{\omega_0}{c} L \cos(\beta), \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \omega^2} = \frac{-4\pi^2 c L}{\omega_0^3 d^2 \cos^2(\beta)}, \quad (2)$$

где L – расстояние между решетками по нормали; ω_0 – несущая частота импульса; c – скорость света; β – угол дифракции; d – период дифракционной решетки.

Как видно из (2), регулировка дисперсии групповой скорости достигается простым изменением расстояния между решетками. Длительность спектрально ограниченного импульса с гауссовой огибающей при прохождении линии с дисперсией групповой скорости

$$\tau = \tau_0 \sqrt{1 + \frac{(\varphi_2)^2}{\tau_0^4} - 16(\ln 2)^2}, \quad (3)$$

где τ_0 — длительность входного импульса.

Для усовершенствования системы сжатия и расширения импульса была разработана схема двухрешеточного однозеркального стретчера. Наряду с использованием только отражательных элементов и простой конструкции, требующей лишь одно радиусное зеркало, преимущество этого стретчера состоит в том, что в нем полностью отсутствуют сферические aberrации [11]. Схема двухрешеточного однозеркального стретчера и его эквивалентная схема представлены на рис. 4.

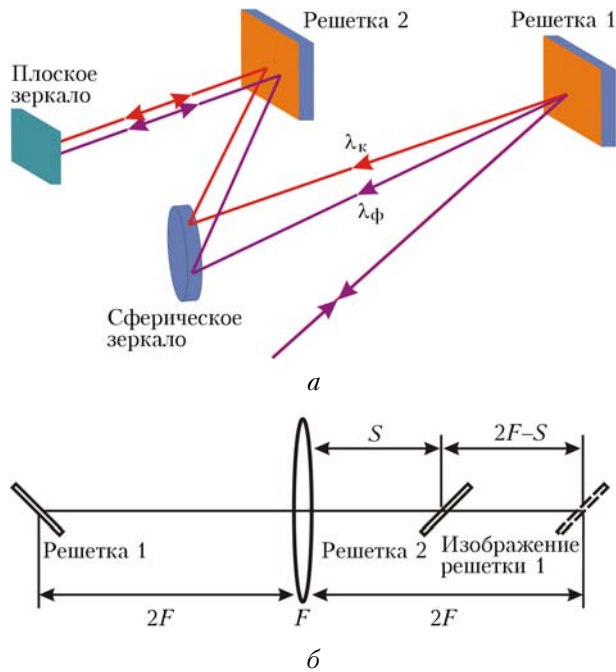


Рис. 4. Двухрешеточный однозеркальный стретчер: а — общий вид; б — эквивалентная оптическая схема

Стретчер состоит из двух параллельных дифракционных решеток, радиусного зеркала и плоского зеркала (для реализации второго прохода). Первая решетка расположена строго в центре кривизны зеркала, и решетки параллельны. Эквивалентное расстояние между решетками в таком стретчере (расстояние между второй решеткой и изображением первой) $L_{eff} = 2F - S$, где $2F = R$; S — расстояние от центра второй решетки до зеркала, или $L_{eff} = L$ (расстояние между решетками). Проход через такой стретчер эквивалентен проходу через пару решеток, в котором оптический путь между решетками на центральной длине волны равен L .

Вследствие рассогласования системы «стретчер—компрессор» возникают временные искажения результирующего импульса. Эти искажения могут быть разделены на два типа [12]: 1) искажения формы и длительности импульса, вызванные высшими порядками дисперсии групповой задержки,

и 2) пространственная неоднородность по сечению луча, вызванная изменением групповой задержки по сечению. Среди факторов, вызывающих эти искажения, могут быть выделены следующие:

1) Рассогласование расстояния между решетками в компрессоре и стретчере. Ввиду разного расстояния между решетками в стретчере и компрессоре после прохождения этой системы у импульса остается остаточная дисперсия второго порядка, которая и вносит основной вклад в искажение импульса.

2) Рассогласование угла падения на первую решетку. Если углы падения на первую решетку стретчера и компрессора отличаются при одинаковом расстоянии между решетками, то это приводит к возникновению нескомпенсированной дисперсии второго порядка. Она может быть скомпенсирована соответствующей отстройкой расстояний между решетками, в этом случае основной вклад в искажение импульса вносит дисперсия третьего порядка.

3) Непараллельность решеток в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции.

4) Непараллельность решеток в плоскости дифракции.

Если между решетками есть небольшой угол ϵ_x в плоскости дифракции, то излучение на выходе компрессора не выходит параллельно падающему. На выходе появляется угловая дисперсия.

5) Непараллельность штрихов решеток.

Расчеты, проведенные для решеток размерами $110 \times 200 \times 30$ мм с числом штрихов $N = 1700$ штр./мм, для угла падения на первую решетку 60° и для центральной длины волны излучения 1030 нм, показали, что при длительности входящего в стретчер импульса 100 фс необходима точность установки расстояний между решетками в системе «стретчер—компрессор» не менее $6,5$ мкм, для того чтобы на выходе из компрессора длительность усиленного импульса изменилась не более чем на 10% от первоначальной. Соответственно, точность установки угла наклона решеток в плоскости, перпендикулярной плоскости дифракции, равна 2 мин, точность установки угла наклона решеток в плоскости дифракции — $0,1$ мин и точность установки угла наклона штрихов решеток — $0,6$ мин.

Заключение

Рассмотрена тераваттная фемтосекундная лазерная система с диодной накачкой при частоте повторения до 1000 Гц, основанная на масштабировании с использованием вырожденного параметрического усиления при высокоинтенсивной пикосекундной накачке, формируемой в канале с лазерным усилением на большемерных кристаллических и керамических Yb-активных средах с использованием для их селективной накачки излучения лазерных диодов. При этом значительно возрастает роль как большемерных лазерных, так и большемерных нелинейно-оптических кристаллических элементов в параметрических каскадах усиления, по-

звolyающих проводить масштабирование и создавать высокоинтенсивные установки лабораторного типа, работающие с высокой частотой повторения.

Проведенный этап исследований показал, что для создания эффективной криогенной фемтосекундной лазерной системы с диодной накачкой необходима реализация активных сред с неоднородно уширенными полосами поглощения и усиления.

Работа выполнена при частичной поддержке исследований программой Президиума РАН «Экстремальные оптические поля и их приложения» и грантом РФФИ № 11-02-12164.

1. *Fan T.Y., Ripin D.J., Aggarwal R.L., Ochoa J.R., Chann B., Tilleman M., Spitzberg J.* Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2007. V. 13, N 3. P. 448–459.
2. *Trunov V.I., Pestryakov E.V., Kirpichnikov A.V., Petrov V.V.* Hybrid high power femtosecond laser system // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6054. P. 210–216.
3. *Mourou G., Tajima T., Bulanov S.V.* Optics in the relativistic regime // *Rev. Mod. Phys.* 2006. V. 78, N 2. P. 309–371.
4. *Siebold M., Hornung M., Boedefeld R., Podleska S., Klingebiel S., Wandt C., Krausz F., Karsch S., Uecker R., Jochmann A., Hein J., Kaluza M.* C. Terawatt diode-pumped Yb:CaF₂ laser // *Opt. Lett.* 2008. V. 33, N 23. P. 2770–2772.
5. *Siebold M., Hein J., Hornung M., Podleska S., Kaluza M.C., Bock S., Sauerbrey R.* Diode-pumped lasers for ultra-high peak power // *Appl. Phys. B.* 2008. V. 90, N 3–4. P. 431–437.
6. *Akahane Y., Aoyama M., Ogawa K., Tsuji K., Tokita S., Kawanaka J., Nishioka H., Yamakawa K.* High-energy, diode-pumped, picosecond Yb:YAG chirped-pulse regenerative amplifier for pumping optical parametric chirped-pulse amplification // *Opt. Lett.* 2007. V. 32, N 13. P. 1899–1901.
7. *Каминский А.А.* ОКГ с комбинированной активной средой // *Письма в ЖЭТФ.* 1968. Т. 7, № 8. С. 260–262.
8. *Pestryakov E.V., Petrov V.V., Trunov V.I., Kirpichnikov A.V., Laptev A.V., Merzliakov M.A., Bagayev S.N., Matrosov V.N.* Hybrid ytterbium doped active medium for femtosecond lasers // *Proc. SPIE.* 2007. V. 6610. P. 66106-1–661006-5.
9. *Tokurakawa M., Shirakawa A., Ueda K., Yagi H., Noriyuki M., Yanagitani T., Kaminskii A.A.* Diode-pumped ultrashort-pulse generation based on Yb³⁺:Sc₂O₃ and Yb³⁺:Y₂O₃ ceramic multi-gain-media oscillator // *Opt. Express.* 2009. V. 17, N 5. P. 3353–3361.
10. *Treacy E.B.* Optical pulse compression with diffraction grating // *IEEE J. Quantum Electron.* 1969. V. 5, N 9. P. 454–458.
11. *Zhang Z., Yagi T., Arisawa T.* Ray-tracing model for stretcher dispersion calculation // *Appl. Opt.* 1997. V. 36, N 15. P. 3393–3399.
12. *Fiorini C., Sauteret C., Rouyer C., Blanchot N., Seznec S., Migus A.* Temporal aberrations due to misalignments of a stretcher-compressor system and compensation // *IEEE J. Quantum Electron.* 1994. V. 30, N 7. P. 1662–1670.

V.V. Petrov, E.V. Pestryakov, V.I. Trunov, A.V. Kirpichnikov, M.A. Merzliakov, A.V. Laptev.
Development of cryogenic diode-pumped Yb-doped ceramic laser system.

The development of femtosecond all-solid-state diode-pumped high power laser systems operating with a high repetition rate is possible due to the rapid growth of technology of new Yb-doped materials. The basic principles, features, and amplification scheme of femtosecond pulses to subterawatt level and element base for laser ceramic and crystalline materials, doped with ytterbium ions (Yb:Y₂O₃, Yb:KYW etc.) and nonlinear LBO optical crystals, are developed. The design of cryogenic terawatt diode-pumped femtosecond laser system at repetition rate up to 1000 Hz and hybrid (parametric and laser) method of chirped pulse amplification with the optical synchronization of the radiation of the pump and amplification channels is discussed. The initial cascade of developed cryogenic hybrid diode-pumped laser system consisted of cryogenic Yb:Y₂O₃ ceramic (100 MHz, 160–180 fs) master oscillator, stretcher, diode pumped regenerative amplifier and compressor is experimentally investigated.