

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ТЕХНИКА

УДК 681.7.069.24

ФЕМТОСЕКУНДНЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛАХ Yb:KYW С ПОДАВЛЕНИЕМ СУЖЕНИЯ СПЕКТРА В РЕГЕНЕРАТИВНОМ УСИЛИТЕЛЕ ПУТЕМ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСА

© 2013 г. G. H. Kim*, Ph.D.; J. H. Yang*; D. S. Lee*, Ph.D.; В. Е. Яшин** доктор физ.-мат. наук;
А. В. Кулик*; Е. Г. Салль*; С. А. Чижев*; U. Kang*, Ph.D.

* Russia Science Seoul, KERI, Seoul, Korea

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: vyashin@yandex.ru

Описан фемтосекундный лазерный регенеративный усилитель на двух кристаллах Yb:KYW с прямой продольной накачкой мощными полупроводниковыми инжекционными лазерными линейками с волоконным выходом. Для предотвращения сужения спектра при усилении и соответствующего удлинения усиленного импульса при его компрессии использовались комбинация двух кристаллов Yb:KYW со сдвинутыми относительно друг друга спектральными максимумами усиления и профилирование спектра усиливаемого излучения. Средняя мощность лазера до компрессии достигала 12 Вт при частоте следования импульсов в диапазоне 50–500 кГц и ширине спектра 10 нм, что примерно в 2 раза превышает ширину спектра без профилирования. Длительность импульса после сжатия в компрессоре была равна 182 фс, а средняя мощность превышала 8 Вт. Разработанная лазерная система может использоваться как источник мощных фемтосекундных световых импульсов для микрообработки материалов и биомедицинских применений.

Ключевые слова: фемтосекундный генератор, фемтосекундные импульсы, длительность импульса, диодный лазер, Yb:KYW активный элемент.

Коды OCIS: 140.3480, 140.7090.

Поступила в редакцию 25.06.2012.

1. Введение

В последние десятилетия достигнут существенный прогресс в области получения сверхкоротких лазерных импульсов. Источники пико- и фемтосекундных лазерных импульсов становятся более компактными и надежными, что делает возможным их эффективное применение в различных областях науки и технологии. Для некоторых из этих применений, таких, например, как высокоскоростная прецизионная микрообработка [1], важно получение импульсов достаточно большой энергии (десятки микроджоулей) с высокой частотой следования (сотни килогерц) и максимально короткой (менее 200 фемтосекунд) длительностью импульса. Такая относительно большая энергия фемтосекундных импульсов генерируется обычно в лазерных системах с уси-

лением chirпированных импульсов (так называемые CPA-системы) [2].

В течение долгого времени основным поставщиком таких импульсов служили мощные лазерные системы на сапфире, активированном титаном (Ti:Al₂O₃) [3]. Однако эти лазеры имеют ряд недостатков, препятствующих их практическому применению, главным из которых является отсутствие эффективных лазерных диодов накачки, что обуславливает их высокую стоимость.

В последние десять лет появились новые фемтосекундные лазерные системы, в которых в качестве активной среды используются иттербий-активированные кристаллы [4], и в частности, вольфраматы (Yb:KYW, Yb:KGW и др.) [5], допускающие прямую эффективную накачку лазерными диодами. Эти системы более эффективны, компактны,

дешевле и проще поддаются оптимизации по сравнению с системами на титан-сапфире. В связи с этим они более подходят для практического использования.

Стандартные Yb:KYW/Yb:KGW CPA-лазерные системы, работающие с большой частотой следования импульсов (10–1000 КГц), генерируют лазерные импульсы с энергией несколько десятков или сотен микроджоулей при длительности более 300 фс [6–8]. Хотя такие импульсы и являются достаточно короткими для многих применений, для оптимизации процессов микрообработки материалов, с точки зрения повышения точности обработки и ее скорости, необходимы более короткие импульсы.

Изменение длительности импульса на выходе лазерных систем с усилением чирпированных импульсов по сравнению с длительностью задающего генератора определяется искажением спектра в основных элементах лазера – стретчере, усилителе и компрессоре. Спектральная мощность выходного импульса определяется следующим выражением:

$$P_{out}(\omega) = P_{in}(\omega)T_{st}(\omega)G(\omega)T_c(\omega), \quad (1)$$

где $P_{in}(\omega)$ – спектральная мощность входного импульса, $T_{st}(\omega)$ и $T_c(\omega)$ – спектральное пропускание стретчера и компрессора, $G(\omega)$ – спектральная зависимость усиления.

Искажения спектра в стретчере и компрессоре обусловлены хроматическими и поперечными абберациями оптических элементов этих устройств (линзы, зеркала, дифракционные решетки). В принципе эти абберации могут быть устранены при переходе к отражательной оптике и использовании оптических элементов с меньшей светосилой [9], однако обычно это приводит к увеличению габаритов стретчера и компрессора.

Наиболее существенные искажения спектра, приводящие к его сужению, происходят при усилении. Поэтому для сокращения длительности импульса до предельно малого значения на выходе лазерной системы необходимо компенсировать эффект сужения ширины спектра [10–13] при достаточно большом общем усилении G (10^4 – 10^5) в многопроходном или регенеративном усилителе.

Величину сужения спектра импульса при его усилении в активной среде с полосой усиления $\Delta\lambda_{lum}$ гауссовой формы можно оценить с помощью следующей формулы [12]:

$$\Delta\lambda_{out} = \Delta\lambda_{in} \left[1 + \ln(G) \left(\frac{\Delta\lambda_{in}}{\Delta\lambda_{lum}} \right)^2 \right]^{-1/2}, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda_{out}$ и $\Delta\lambda_{in}$ – ширины спектра выходного и входного импульсов, G – полное усиление в системе. Так, например, при общем усилении $G = 10^4$ и ширине входного спектра, сравнимом с шириной спектра люминесценции, выходной спектр сузится более чем в 3 раза, а длительность сжатого импульса будет также в 3 раза больше длительности входного импульса.

Значительное регенеративное сужение спектра может быть предотвращено различными способами: модификацией спектра усиливаемых импульсов [9, 13], расширением спектра усиления при использовании активных сред со сдвинутыми спектральными максимумами усиления [11, 12–16], пространственно-дисперсионным усилением [17, 18], нелинейным уширением спектра при фазовой самомодуляции [19, 20]. Однако использование одного из этих методов бывает недостаточно для предотвращения существенного сужения спектра или приводит к значительному его искажению, препятствующему эффективному сжатию импульсов в дисперсионном компрессоре.

В настоящей статье исследовано подавление сужения спектра в Yb:KYW CPA-лазерной системе на основе одновременного использования двух методов: расширения спектральной полосы усиления при использовании двух кристаллов со сдвинутыми максимумами усиления и оптимального профилирования спектра усиливаемых импульсов. Это позволило получить на выходе компрессора фемтосекундные импульсы с длительностью менее 200 фс.

2. Экспериментальная установка

Оптическая схема лазерной системы приведена на рис. 1. Фемтосекундные импульсы длительностью 110 фс с шириной спектра 9 нм по полувысоте генерировались в задающем генераторе с самосинхронизацией аксиальных мод, описанном в нашей предыдущей статье [21]. В новом варианте лазера, в отличие от описанного в этой статье, использовался кристалл Yb:KYW с N_p -срезом (оптическая ось индикатрисы показателя преломления N_p была параллельна направлению распространения лазерного излучения) при направлении поляризации генерируемого излучения вдоль оси N_m . Это дало возможность сдвинуть центральную дли-

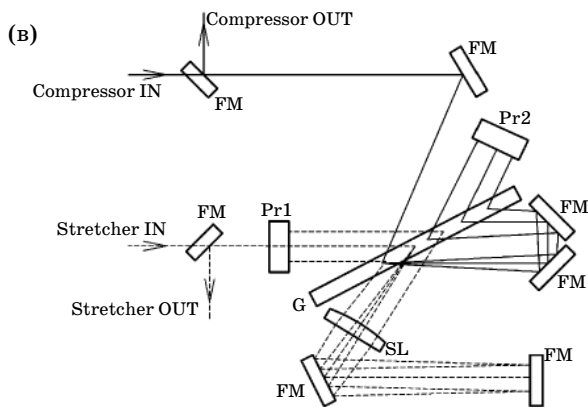
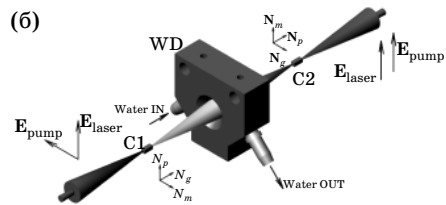
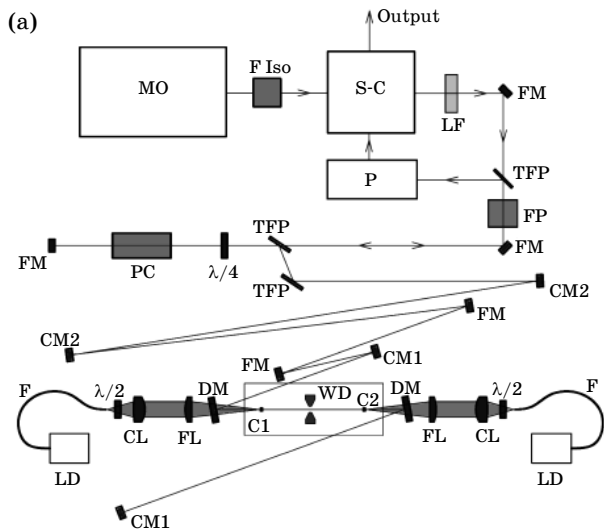


Рис. 1. Оптические схемы лазерной системы (а), зоны усиления (б) и модуля stretcher-компрессора (в). MO – задающий генератор, S-C – модуль stretcher-компрессор, P – оптический затвор на основе ячейки Поккельса, PC-ячейка Поккельса, F Iso – изолятор Фарадея, FR – вращатель Фарадея, LD- лазерная диодная линейка, WD-охлаждаемая водой диафрагма, C1, C2 – лазерные кристаллы, CL и FL – коллимирующие и фокусирующие дублеты, DM – дихроичное зеркало, FM – плоские диэлектрические зеркала, CM1, CM2 – вогнутые диэлектрические зеркала, TFP – тонкопленочные диэлектрические поляризаторы, G – пропускающая дифракционная решетка, SL – сферическая линза с фокусным расстоянием 10 см, Pr1, Pr2 – призмы-крышки.

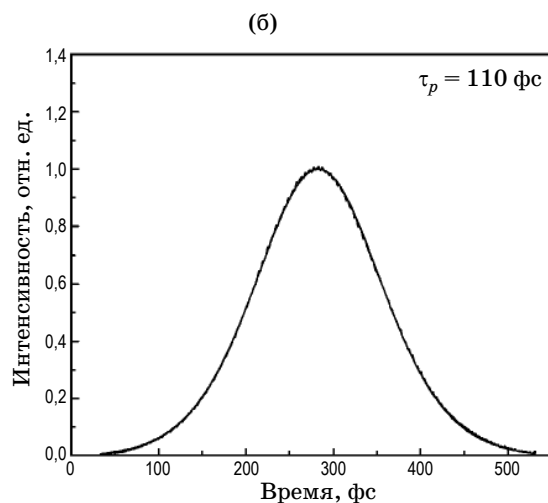
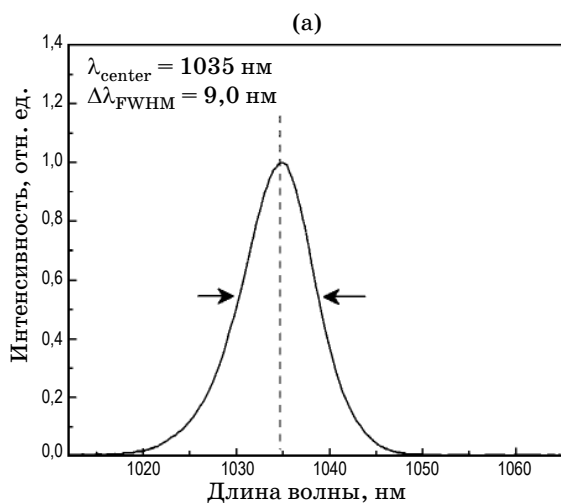


Рис. 2. Спектр (а) и автокорреляционная функция (б) импульсов после задающего генератора.

ну волны спектра генерации на 1035 нм, что, как будет показано дальше, близко к центральной длине волны контура усиления в регенеративном усилителе. Зарегистрированная с помощью автокоррелятора PulseCheck (компания

APC) автокорреляционная функция и спектр фемтосекундных импульсов приведены на рис. 2.

Цуг фемтосекундных импульсов после задающего генератора поступал на удлинитель

импульсов (стретчер), собранный на пропускающей дифракционной решетке. На этой же решетке был собран и компрессор, что позволило сделать модуль стретчер–компрессор весьма компактным. Оптическая схема модуля приведена на рис. 1в.

Для спектрального профилирования фемтосекундных импульсов был выбран достаточно простой, но эффективный интерференционно-поляризационный фильтр или фильтр Лию (см., например, обзор [22]) на основе кварцевой двулучепреломляющей пластинки. Этот фильтр достаточно широко применялся ранее в лазерах на титане с сапфиром [10, 22] и лазерах на неодимовом стекле [23].

Затем фемтосекундные импульсы вводились в регенеративный усилитель, где после достаточного усиления, определяемого временными воротами ячейки Поккельса на кристалле ВВО, выводились из схемы усиления. Ячейка Поккельса могла работать на частотах 10–500 кГц, существенно снижая, таким образом, частоту следования импульсов после задающего генератора. Это необходимо для тушения плазмы между импульсами при использовании фемтосекундных импульсов в процессе микрообработки.

Оптическая схема регенеративного усилителя показана на рис. 1а. В качестве активных элементов в регенеративном усилителе использовались два кристалла Yb:KYW (N_p - и N_g -срезов) длиной 5 мм с 3%-ным содержанием иттербия. Кристаллы крепились на медный теплоотвод, охлаждаемый водой, и непрерыв-

но накачивались отдельно двумя лазерными диодными модулями (компания NLight) с волоконным выходом со средней мощностью 50 Вт каждый. Излучение накачки коллимировалось и фокусировалось в активные элементы в пятно диаметром примерно 300 мкм, что позволяло создать достаточно большую плотность мощности (примерно до 50 кВт/см²), необходимую для эффективного усиления в квазитрехуровневых активных средах. Как это показано на рис. 1б, где схема накачки и усиления показана более подробно, в одном кристалле вектор поляризации усиливаемого излучения был направлен вдоль оси N_m , а в другом – вдоль оси N_p . В силу анизотропии спектрально-люминесцентных параметров кристалла Yb:KYW сечения вынужденного излучения при таких ориентациях поляризации имеют различные спектральные зависимости [25], что иллюстрируется на рис. 3 [26]. На этом же рисунке показано, что при совместной работе двух кристаллов спектральная ширина контура усиления может примерно в 1,5 раза превышать соответствующую ширину для каждого кристалла по отдельности. Существует возможность изменять форму спектральной зависимости коэффициента усиления путем использования различной мощности накачки активных элементов. Если мощность накачки в кристалле, где направление поляризации параллельно оси N_p ($E_{\text{laser}} \parallel N_p$), в несколько раз превышает мощность накачки при $E_{\text{laser}} \parallel N_m$, то можно, как это видно из рис. 3б, компенсировать различие в поперечных сечениях вы-

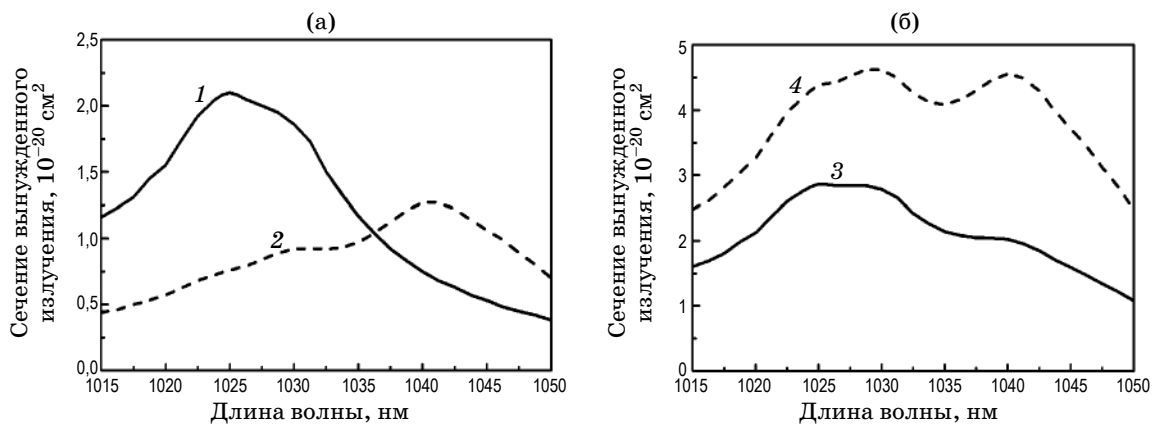


Рис. 3. Спектры поперечного сечения вынужденного излучения Yb:KYW для кристаллов различной ориентации (а) и комбинированный спектр (б) [26]. 1 – вектор поляризации лазерного излучения E_{laser} параллелен оси N_m , 2 – вектор поляризации лазерного излучения E_{laser} параллелен оси N_p , 3 – комбинированный спектр усиления при равной накачке активных элементов, 4 – комбинированный спектр усиления для случая, когда мощность накачки кристалла, в котором $E_{\text{laser}} \parallel N_p$, в 3 раза превышает мощность накачки в кристалле при $E_{\text{laser}} \parallel N_m$.

нужденного излучения для этих кристаллов. Центральная длина волны интегрального контура усиления находится вблизи длины волны 1035 нм, что совпадает с центральной длиной волны задающего генератора.

Для оптимального спектрального профилирования входного излучения минимум пропускания фильтра Лيو должен быть близок к центральной длине волны контура усиления, а спектральная ширина $\Delta\nu_{\text{FSR}}$ – близка к ширине этого контура. Так, для нашего случая ширина контура усиления по полувысоте составляет примерно 30 нм. Тогда толщина кварцевой пластинки l , определяемая соотношением $\Delta\nu_{\text{FSR}} = c/(\Delta n l)$, должна быть около 8 мм ($\Delta n = n_o - n_e$ – разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн). Пластика такой толщины была изготовлена из искусственного кристаллического кварца.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Влияние модуля стретчер-компрессор на ширину спектра и длительность импульса определялось путем измерения ширины спектра и длительности импульса задающего генератора после последовательного прохождения стретчера и компрессора. В модуле стретчер-компрессор использовались пропускающие дифракционные решетки компании Wasatch Photonics с частотой штрихов 1700 мм^{-1} и 1500 мм^{-1} . При этом влияние сферической aberrации, вносимой линзой стретчера для более высокочастотной решетки было более зна-

чительным из-за большего поперечного размера пучка на линзе. Эта более сильная aberrация проявилась и в результатах измерений. Так, измеренная автокоррелятором длительность импульса после модуля стретчер-компрессор превышала длительность исходного импульса в 2,15 раза для решетки 1700 мм^{-1} и только в 1,45 раза для решетки 1500 мм^{-1} .

Отметим, что использование менее высокочастотной решетки уменьшает длительность растянутого во времени импульса после стретчера примерно до 50 пс вместо 100 пс для решетки 1700 мм^{-1} . Однако и длительности 50 пс достаточно для подавления самофокусировки в процессе усиления при достижимых в данной системе уровнях энергии [23].

Используемая нами двулучепреломляющая кварцевая пластинка позволяет существенно модифицировать спектр импульса после задающего генератора путем вращения оси пластинки вокруг оптической оси. Это демонстрируется на рис. 4а, где показаны спектр задающего генератора, спектр пропускания пластинки и результирующий спектр лазерного импульса после пластинки. При увеличении глубины спектральной модуляции, вносимой пластинкой, ширина спектра излучения увеличивается, но увеличиваются и потери энергии. Соответствующая расчетная кривая вместе с нанесенными на нее экспериментальными точками (рис. 4б) показывает, что ширина спектра импульса по уровню половинной интенсивности может быть увеличена в 1,6 раза при потере 55% энергии. Эти потери энергии могут быть скомпенсированы в регенератив-

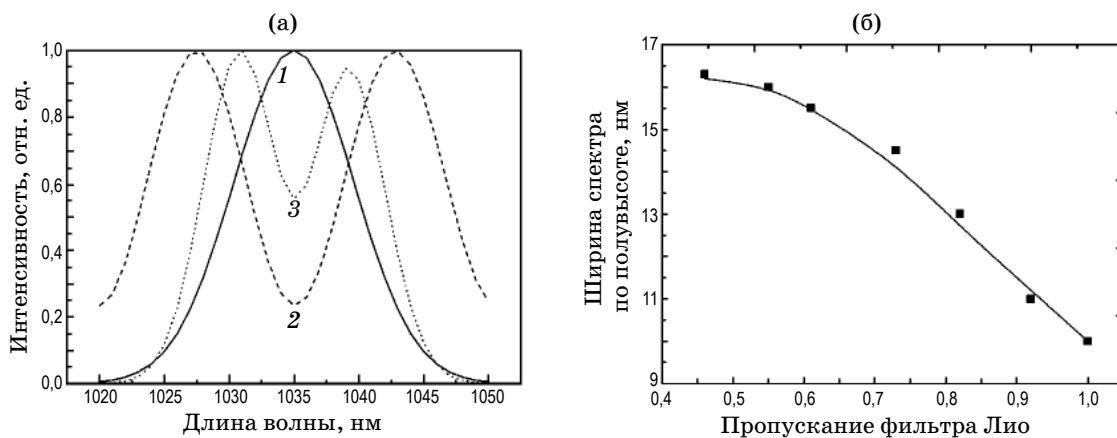


Рис. 4. Спектры задающего генератора (1), фильтра Лيو (2) при угле поворота оси двулучепреломляющей пластинки на 25° (относительно направления вектора поляризации лазерного импульса) и на выходе из фильтра Лيو (3) – (а); ширина спектра импульса по полувысоте на выходе из селектора как функция пропускания фильтра Лيو (кривая – результаты расчета, точки – результаты измерения) – (б).

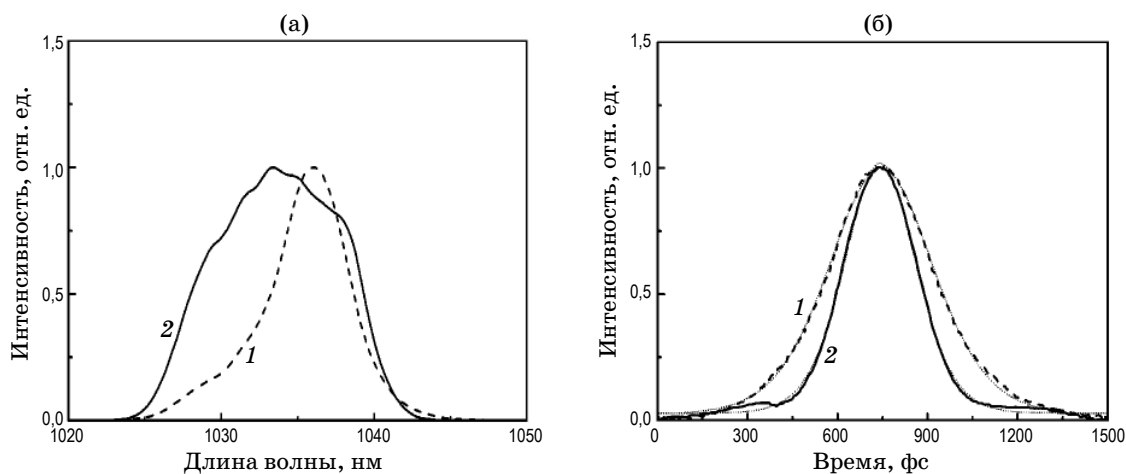


Рис. 5. Спектры (а) и автокорреляционные функции (б) импульсов без профилирования спектра (1) и с профилированием (2).

ном усилителе путем организации дополнительных проходов излучения через активную среду и, соответственно, общего усиления G . Оценка с помощью формулы (2) показывает, что таким образом ширину спектра для нашей ситуации можно увеличить примерно на 30% по сравнению со случаем, когда спектральный фильтр не используется. Отметим только, что такая оценка носит весьма приблизительный характер, так как реальная спектральная кривая усиления очень существенно отличается от гауссовой формы.

Проведенные нами измерения модификации спектра и длительности усиленного импульса приведены на рис. 5. Как видно из рис. 5а, формы спектров существенно отличаются от гауссовых и ширина спектра при предварительной спектральной селекции почти вдвое превышает ширину спектра без такого спектрального профилирования (6 нм и 11 нм соответственно). Однако ширины автокорреляционных функций, характеризующих длительность импульса, отличаются примерно лишь на 30% (265 фс и 182 фс соответственно). При этом, как показали предыдущие исследования модуля стретчер-компрессор, длительность импульса 182 фс близка к предельной длительности 160 фс, определяемой сферической aberrацией стретчера. При устранении этой aberrации импульс может быть, по-видимому, сжат до длительности, близкой к исходной длительности задающего генератора в соответствии с шириной спектра.

Были проведены также измерения ширины спектра и длительности импульса при

разном усилении импульса в двух кристаллах, когда мощность накачки в кристалле N_p -среза ($E_{\text{laser}} || E_m$) была уменьшена в 1,5 раза. При этом, как это видно из рис. 4б, спектр контура усиления должен быть более симметричным, а его ширина ощутимо увеличивается. Однако, как показали наши измерения, ширина спектра и длительность усиленных импульсов практически остаются на том же уровне при падении выходной мощности примерно в 2 раза. Такое поведение спектра и длительности можно объяснить тем, что ширина спектра импульса все же существенно (в 2–3 раза) меньше ширины спектра люминесценции двух кристаллов Yb:KYW, что, согласно формуле (2), приводит к относительно слабой зависимости спектра выходных импульсов от ширины спектра усиливающей среды.

Мы также провели исследования использования фильтра Лио внутри резонатора регенеративного усилителя, когда спектральная коррекция осуществлялась на каждом из примерно 30 двойных проходов по резонатору. В этом случае ширина спектра и длительность импульса были примерно такими же, как при использовании спектрального фильтра вне резонатора. Внесение дополнительных потерь в резонатор приводило к падению выходной мощности примерно на 15%.

4. Заключение

Таким образом, была разработана компактная фемтосекундная лазерная система на кристаллах Yb:KYW, основанная на регенератив-

ном усилении относительно длинных (50 пс) chirпированных импульсов с последующим их сжатием до фемтосекундной длительности. Благодаря применению в регенеративном усилителе двух кристаллов Yb:KYW различной ориентации с расширенной частотной полосой усиления и спектрального селектора на основе двулучепреломляющей пластинки, расширяющего спектр импульса после задающего генератора, длительность импульса была сокращена до 182 фс, что примерно в два раза короче по сравнению с обычными усилительными системами на этих кристаллах. Вместе с тем, полученная длительность примерно в 1,6 раза превышала длительность импульса задающего генератора, что было обусловлено сферической aberrацией линзы стретчера. Оптимальным, с точки зрения получения максимальной средней мощности при минимальной длительности импульса, является положение спектрального селектора на входе в регенеративный усили-

тель при одинаковом уровне накачки активных элементов.

Полученная выходная средняя мощность (8,7 Вт) при частоте следования импульсов до 500 КГц и хорошая угловая расходимость излучения (параметр качества $M^2 < 1,2$) делают разработанную лазерную систему вполне востребованной для использования в задачах прецизионной микрообработки различных материалов и других применений, требующих высоких пиковых мощностей излучения.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке правительства г. Сеула по исследовательскому контракту программы WR100001.

В.Е. Яшин выражает благодарность Министерству образования и технология (MEST) и Коре́йской федерации обществ науки и технологий (KOFST) за финансовую поддержку по программе Brain Pool.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dausinger F., Lichtner F., Lubatschowski H.* Femtosecond Technology for Technical and Medical Applications. Berlin: Springer, 2004. 326 p.
2. *Strickland D., Mourou G.* Compression of Amplified Chirped Optical Pulses // *Opt. Commun.* 1985. V. 56. P. 219–221.
3. *Backus S.C., Durfee G., Murnane M.M., Kapteyn H C.* High power ultrafast lasers // *Rev. Sci. Instrum.* 1998. V. 69. P. 1207–1223.
4. *Druon F., Balembois F., Georges P.* New Materials for Short-Pulse Amplifiers // *IEEE Photonics Journal.* 2011. V. 3. P. 268–272.
5. *Kuleshov N.V., Lagatsky A.A., Podlipensky A.V., Mikhailov V.P., Huber G.* Pulsed laser operation of Yb-doped KY(WO₄)₂ and KGd(WO₄)₂ // *Opt. Lett.* 1997. V. 22. P. 1317–1319.
6. *Nickel D., Stolzenburg C., Giesen A., Butze F.* Ultrafast thin-disk Yb:KY(WO₄)₂ regenerative amplifier with a 200-kHz repetition rate // *Opt. Lett.* 2004. V. 29. P. 2764.
7. *Delaigue M., Manek-Hoenninger I., Salin F., Hoenninger C., Rigail P., Courjaud A., Mottay E.* 300 kHz femtosecond Yb:KGW regenerative amplifier using an acousto-optic Q-switch // *Appl. Phys. B.* 2006. V. 84. P. 375–378.
8. *Liu H., Nees J., Mourou G., Biswal S., Spuehler G.J., Keller U., Kuleshov N.V.* Yb:KGd(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifiers // *Opt. Commun.* 2002. V. 203. P. 315–321.
9. *Cheriaux G., Rousseau P., Salin F., Chambaret J.P., Walker B., Dimauro L.F.* Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification // *Opt. Lett.* 1996. V. 21. P. 414–416.
10. *Barty C., Korn G., Raksi F., Rose-Petruck C., Squier J., Tian A., Wilson K., Yakovlev V., Yamakawa K.* Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses // *Opt. Lett.* 1996. V. 21. P. 219–221.
11. *Raybaut P., Balembois F., Druon F., Georges P.* Numerical and experimental study of gain narrowing in ytterbium-based regenerative amplifiers // *IEEE J. Quantum Electron.* 2005. V. 41. P. 415–426.
12. *Rouyer C., Mazataud E., Allais I., Pierre A., Sez nec S., Sauteret C., Mourou G., Migus A.* Generation of 50-TW femtosecond pulses in a Ti:sapphire/Nd:glass chain // *Opt. Lett.* 1993. V. 18. P. 214–216.

13. *Ross I.N., Trentelman M., Danson C.N.* Optimization of a chirped-pulse amplification Nd:glass laser // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. P. 9348–9358.
14. *Buening U., Sayinc H., Wandt D., Morgner U., Kracht D.* Regenerative thin disk amplifier with combined gain spectra producing 500 μJ sub 200 fs pulses // *Opt. Express.* 2009. V. 17. P. 8046–8050.
15. *Buettner A., Buening U., Wandt D., Neumann J., Kracht D.* Ultrafast double-slab regenerative amplifier with combined gain spectra and intracavity dispersion compensation // *Opt. Express.* 2010. V. 18. P. 21973–21980.
16. *Kim G.H., Yang J., Chizhov S.A., Sall E.G., Kulik A.V., Yashin V.E., Lee D.S., Kang U.* High average-power ultrafast CPA Yb:KYW laser system with dual-slab amplifier // *Opt. Express.* 2012. V. 20. P. 3434–3442.
17. *Christov I.P.* Amplification of femtosecond pulses in a spatially dispersive scheme // *Opt. Lett.* 1992. V. 17. P. 742–744.
18. *Chichkov N.B., Bünting Udo, Wandt D., Morgner Uwe, Neumann J., Kracht D.* Spatially dispersive regenerative amplification of ultrashort laser pulses // *Opt. Express.* 2009. V. 17. P. 24075–24083.
19. *Shah L., Liu Z., Hart I., Imeshev G., Gyu G., Cho C., Fermann M.E.* High energy femtosecond Yb cubicon fiber amplifier // *Opt. Express.* 2005. V. 13. P. 4717–4722.
20. *Zaouter Y., Papadopoulos D.N., Hanna M., Boulet J., Huang L., Aguergeray C., Druon F., Mottay E., Georges P., Cormier E.* Stretcher-free high energy nonlinear amplification of femtosecond pulses in rod-type fibers // *Opt. Lett.* 2008. V. 33. P. 107–109.
21. *Kim G.H., Kang U., Heo D., Яшин В.Е., Кулик А.В., Салль Е.Г., Чижов С.А.* Компактный фемтосекундный генератор на кристалле Yb:KYW с прямой лазерной диодной накачкой // *Оптический журнал.* 2010. Т. 77. № 4. С. 3–9.
22. *Lu X., Li C., Leng Y., Wang C., Zhang C., Liang X., Li R., Xu Z.* Birefringent plate design for broadband spectral shaping in a Ti:sapphire regenerative amplifier // *Chinese Optics Letters.* 2007. V. 5. № 8. P. 493–496.
23. *Мак А.А., Фромзель В.А., Сомс Л.Н., Яшин В.Е.* Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1990.
24. *Kobtsev S.M., Svetsitskaya N.A.* Application of birefringent filters in continuous-wave tunable lasers: a review // *Opt. Spectrosc.* 1992. V. 73. № 7. P. 114–123.
25. *Pujol M.C., Bursukova M.A., Güell F., Mateos X., Solé R., Gavalda J., Aguiló M., Massons J., Díaz F., Klopp P., Griebner U., Petrov V.* Growth, optical characterization, and laser operation of a stoichiometric crystal $\text{KYb}(\text{WO}_4)_2$ // *Phys. Rev. B.* 2002. V. 65. P. 165121.
26. *Buening U., Wessels P., Sayinc H., Prochnow O., Wandt D., Kracht D.* Ultrafast Yb:KYW regenerative amplifier with combined gain spectra of the optical axes N_m and N_p // *Proc. SPIE.* 2008. V. 6871. P. 68711C–1–68711C–8.