

Регенеративный усилитель фемтосекундных импульсов на Cr : форстерите гигаваттного уровня мощности с частотой следования 10 Гц

М.Б.Агранат, С.И.Ашитков, А.А.Иванов, А.В.Конященко, А.В.Овчинников, А.А.Подшивалов

Разработан кольцевой регенеративный усилитель на Cr : форстерите ($\text{Cr}^{4+} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$) с накачкой импульсным излучением Nd : YAG-лазера, позволяющий усиливать энергию фемтосекундных импульсов от задающего генератора на длине волны 1240 нм до 450 мкДж. Усиленные импульсы, следующие с частотой 10 Гц, сжимались в компрессоре (пропускание 75 %) по длительности до 70 фс, что соответствует пиковой мощности 4 ГВт.

Ключевые слова: Cr : форстерит, фемтосекундные импульсы, регенеративный усилитель.

1. Введение

Типичная средняя мощность непрерывных лазеров с керровской самосинхронизацией мод, в которых активной средой является Cr : форстерит ($\text{Cr}^{4+} : \text{Mg}_2\text{SiO}_4$), составляет 100–200 мВт при температуре кристалла около 5 °С [1–9]. При обычной длине резонатора лазера 1.5 м (частота следования импульсов в пуге 100 МГц) энергия фемтосекундных импульсов невелика и составляет 1–2 нДж. Увеличить энергию импульса можно, удлив резонатор лазера (уменьшив период следования импульсов при сохранении средней мощности). Подобным образом были получены фемтосекундные импульсы с энергией до 15 нДж [10]. Другой путь увеличения энергии импульса – метод разгрузки резонатора – позволяет повысить энергию импульса от фемтосекундного генератора более чем на порядок [11]. Дальнейшее увеличение энергии фемтосекундного импульса возможно только с применением импульсных усилителей – регенеративных или многопроходовых [1, 2].

Отличие от лазеров на Ti : сапфире, где усиление на проход может быть 8–10-кратным [2], усиление в кристаллах форстерита не превышает двух [3–6, 12]. В связи с этим для получения импульсов с энергией несколько сотен микроджоулей требуется использование регенеративного усилителя (РУ) с усилением порядка 10^5 .

Поскольку при прямом усилении фемтосекундного импульса пороговая интенсивность возникновения нелинейных эффектов (самовоздействия и самофокусировки) достигается уже при малых (порядка микроджоуля) энергиях импульса, применяют так называемый метод усиления chirпированного импульса [13]. Суть метода за-

ключается в том, что для предотвращения нежелательных нелинейных эффектов в процессе регенеративного усиления фемтосекундный импульс предварительно пропускают через устройство с положительной дисперсией групповой скорости, в качестве которого обычно используется стретчер на основе дифракционных решеток. В нем световой импульс растягивается по длительности в 1000–3000 раз, затем усиливается по энергии в РУ и далее пропускается через компрессор – устройство, обладающее такой же дисперсией, что и стретчер, но другого знака. В результате на выходе компрессора усиленный импульс восстанавливает исходную длительность.

Практически увеличение длительности импульса в стретчере (до 100–200 пс) ограничивается разумными размерами дифракционных решеток. При таком растяжении усиление в РУ может достигать $\sim 10^6$ (энергия выходного импульса увеличивается до 1 мДж) без превышения порогов нелинейных эффектов. Чтобы реализовать дальнейшее усиление импульса по энергии, необходимо увеличивать диаметр перетяжки лазерного пучка в кристалле форстерита в последующих каскадах усиления.

Цель настоящей работы заключалась в разработке и исследовании входящего в состав тераваттной системы «Лазерный фемтосекундный комплекс» ИТЭС ОИВТ РАН [14] регенеративного усилителя фемтосекундных импульсов на Cr : форстерите с импульсной накачкой излучением Nd : YAG-лазера.

2. Задающий генератор и стретчер

На рис.1 изображена структурная схема лазерной установки. Для усиления использовалось излучение фемтосекундного лазера (модель CrF-65, ООО «Авеста-Проект») на Cr : форстерите с керровской самосинхронизацией мод, подробно описанного в [8, 9], с накачкой излучением волоконного иттербиевого лазера (модель PYL-10P, «ИРЭ – Полнос»). Параметры задающего лазера в экспериментах были следующими: длительность импульса $\tau = 55$ фс, средняя мощность излучения $P = 220$ мВт, частота следования импульсов в пуге $f = 88$ МГц, длина волны $\lambda = 1260$ нм.

Импульсы излучения задающего лазера растягивались во временном расширителе (стретчере), который

М.Б.Агранат, С.И.Ашитков, А.В.Овчинников. Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, Ижорская ул. 13/19

А.А.Иванов. Центр фотохимии РАН, Россия, 117421 Москва, ул. Новаторов, 7а

А.В.Конященко. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53

А.А.Подшивалов. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

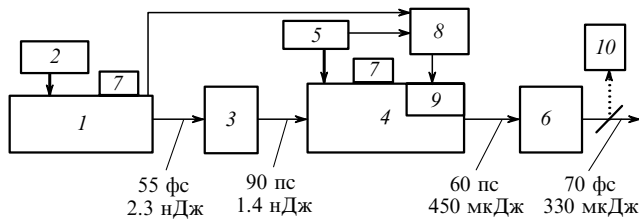


Рис. 1. Структурная схема лазерной установки:

1 – задающий лазер на Cr: форстерите; 2 – волоконный иттербиевый лазер накачки; 3 – стретчер; 4 – регенеративный усилитель; 5 – лазер накачки регенеративного усилителя; 6 – компрессор; 7 – термоконтроллеры для стабилизации температуры активных элементов; 8 – устройство синхронизации и регулируемой задержки импульсов; 9 – электрооптический затвор; 10 – система контроля параметров выходного излучения.

состоял из голографической дифракционной решетки размерами 50×100 мм с плотностью штрихов 600 штр./мм, сферического зеркала с радиусом кривизны 1500 мм и двух плоских зеркал. На выходе из стретчера длительность импульса увеличивалась до 90 пс.

3. Оптическая схема регенеративного усилителя

В настоящей работе была реализована кольцевая оптическая схема резонатора РУ, приведенная на рис.2, достоинством которой по сравнению с распространенной линейной схемой является отсутствие изолятора Фарадея. При точном совпадении пучка инжектируемого излучения с осью резонатора реализуется однонаправленный режим генерации кольцевого усилителя и встречная волна полностью подавляется. Кроме того, контраст излучения РУ с кольцевым резонатором вдвое лучше, чем в случае РУ с линейным резонатором [15]. Резонатор РУ образован двумя плоскими и двумя сферическими зеркалами (радиус кривизны 70 см), между которыми на специальном трансляторе установлен кристалл форстерита. С помощью транслятора кристалл перемещался вдоль оси резонатора, вследствие чего изменялись сечения мод генерации и накачки. Активный элемент из $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Cr}^{4+}$ имел форму параллелепипеда, торцы которого были срезаны под углом Брюстера. Его длина вдоль оси a кристалла составляла 20 мм, вдоль осей b и c – 3.2 мм. Тем-

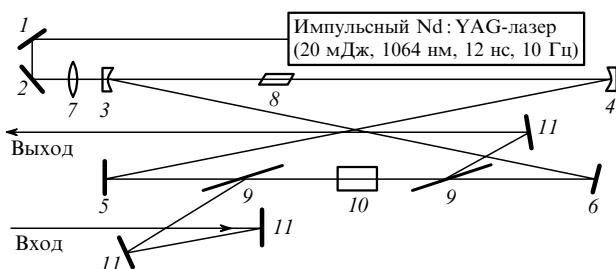


Рис. 2. Оптическая схема регенеративного усилителя на Cr: форстерите:

1, 2 – плоские зеркала; 3, 4 – сферические дихроичные зеркала (радиус кривизны 70 см, коэффициент отражения 100% на $\lambda = 1250$ нм, пропускания – 85% на $\lambda = 1064$ нм); 5, 6 – плоские зеркала резонатора; 7 – фокусирующая линза с фокусным расстоянием 40 см; 8 – активный элемент из кристалла форстерита, вырезанного под углом Брюстера; 9 – тонкопленочный поляризатор; 10 – электрооптический затвор из кристалла DKDP; 11 – поворотные зеркала.

3 Квантовая электроника, т.34, № 11

пература активного элемента стабилизировалась на уровне $+8^\circ\text{C}$ с помощью термоконтроллера с точностью 0.1°C . Излучение накачки, линейно поляризованное вдоль оси b , распространялось вдоль оси a . Накачка осуществлялась излучением импульсного YAG: Nd-лазера, работающего в режиме модуляции добротности (модель Solar LQ-129m). Длительность импульса лазера накачки была равна 12 нс, энергия в импульсе достигала 20 мДж при частоте следования 10 Гц, нестабильность энергии 90% импульсов составляла $\pm 2\%$. Пространственное распределение пучка накачки соответствовало поперечной моде TEM_{00} . Излучение накачки фокусировалось линзой с фокусным расстоянием 40 см так, чтобы минимальный размер пятна находился примерно на равном расстоянии от сферических зеркал резонатора.

Для ввода импульса в резонатор РУ его поляризация должна быть вертикальной. Это достигалось установкой перископа, который согласовывал оптическую высоту временного расширителя импульсов задающего лазера и усилителя и поворачивал плоскость поляризации излучения на 90° .

4. Оптимизация выходной энергии регенеративного усилителя в режиме свободной генерации

Для выбора оптимальной конфигурации резонатора РУ и фокусировки накачки, обеспечивающих максимальную энергию усиливаемого импульса, необходимо знать два эмпирических параметра – зависимость коэффициента усиления от плотности энергии накачки на проход и плотность энергии насыщения. Первый параметр дает необходимое число проходов усиливаемого импульса по резонатору РУ, второй – энергию усиленного импульса при известном диаметре усиливаемой моды. Для обеспечения высокой эффективности усилителя необходимо согласовать диаметры пучка усиливаемого излучения и пучка накачки в активной среде. При фиксированной накачке, в случае уменьшения размеров пучков накачки и инжекции в активном элементе, коэффициент усиления возрастет, но максимальная энергия усиленного импульса будет ограничиваться энергией насыщения. С увеличением размеров пучков можно достичь большей энергии усиливаемого импульса, однако при этом из-за уменьшения коэффициента усиления потребуется большее число проходов импульса по резонатору и, как следствие, возрастут пассивные потери на поглощение и рассеяние. Такие качественные соображения показывают, что существуют оптимальные размеры моды накачки и усиливаемой моды, при которых реализуется максимальная выходная мощность РУ.

Расчет РУ на Cr: форстерите [5, 6] хорошо согласуется с экспериментом, однако требует точного знания сечения усиления в активном элементе. А так как для этого необходимо измерить концентрацию ионов четырехвалентного хрома в различных образцах кристаллов форстерита, что достаточно трудно, то проще определить интегральный коэффициент усиления на проход в конкретном активном элементе при различных энергии и сечении пучка накачки, что и было сделано в настоящей работе.

Предварительно в различных кристаллах форстерита были измерены зависимости коэффициента усиления на проход от плотности энергии накачки; типичная зависимость для кристалла с коэффициентом поглощения излу-

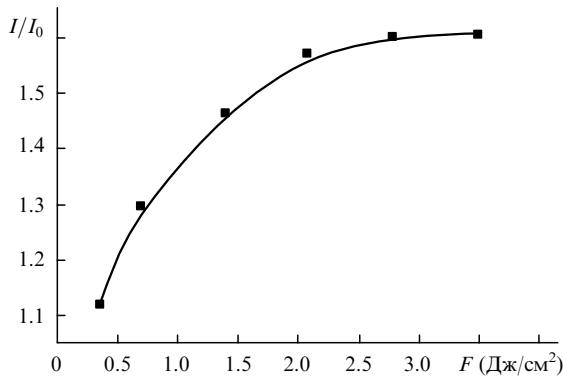


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления кристалла Cr:форстерит от плотности энергии накачки F .

чения накачки 0.8 см^{-1} изображена на рис.3. Полученная кривая хорошо согласуется с механизмом возбуждения ионов хрома в форстерите, описанным в [6]. Видно, что насыщение усиления наступает уже при плотностях энергии накачки $3-3.5 \text{ Дж/см}^2$. При этих условиях данный активный элемент имеет усиление на проход 1.64, и для достижения требуемого усиления РУ, равного 5×10^5 (с учетом того, что пассивные потери в резонаторе составляют примерно 17%), требуется около 40 проходов по резонатору.

Для оценки эффективности различных конфигураций резонатора РУ одно из плоских глухих зеркал было заменено на полупрозрачное и измерялась энергия выходного импульса РУ в режиме свободной генерации. Конструкция почти конфокального резонатора РУ со сведением излучения накачки в общий фокус позволяла достаточно легко изменять в большом диапазоне размер пучка усиливаемой моды и пучка накачки в активной среде путем простого перемещения кристалла форстерита вдоль оси резонатора между сферическими зеркалами. Размер перетяжки пучков на торце активного элемента контролировался при этом с помощью CCD-камеры. На рис.4 показано, как зависит выходная энергия генерации регенеративного усилителя в режиме усиления собственных шумов от диаметра моды генерации. В случае достижения режима насыщения усиления при одной и той же плотности энергии накачки выходная энергия с увеличением диаметра генерируемой моды увеличивается.

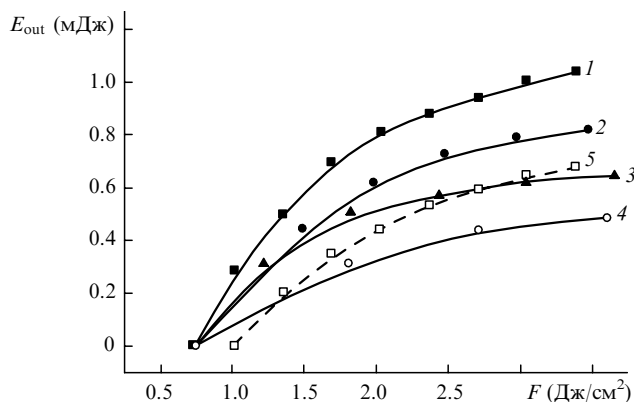


Рис.4. Зависимости выходной энергии генерации регенеративного усилителя в импульсном режиме (пропускание выходного зеркала 22%) от плотности энергии накачки при согласованных диаметрах d мод генерации и накачки 0.7 (1), 0.62 (2), 0.56 (3), 0.46 (4) и 0.7 мм (5). Зависимости 1-4 получены без ячейки Поккельса внутри резонатора, 5 - с ячейкой Поккельса.

В результате проведенной оптимизации РУ по выходной энергии было выбрано такое положение кристалла внутри резонатора, при котором диаметр моды составил 0.7 мм по уровню e^{-1} . Этот диаметр является максимально возможным для выбранной конфигурации резонатора. Энергия накачки, падающая на поверхность кристалла, равнялась 15 мДж , а диаметр моды накачки был немного меньше диаметра моды генерации (680 мкм по уровню e^{-1}).

5. Электрооптическая система управления вводом и выводом усиленного импульса из резонатора регенеративного усилителя

Для ввода одиночного импульса внутрь резонатора РУ и вывода из него усиленного импульса использовался электрооптический затвор, установленный между двумя широкополосными тонкопленочными диэлектрическими поляризаторами, потери которых для р-поляризации были меньше 1%, а отражение для s-поляризации составляло 83%. В качестве электрооптического элемента использовался кристалл DKDP в продольной геометрии со степенью дегитерирования 96%. Торцы кристалла были просветлены. При установке внутрь резонатора РУ электрооптического затвора выходная энергия уменьшалась на 40% (кривая 5 на рис.4), что связано с довольно большими потерями в кристалле DKDP на длине волны 1.25 мкм (около 5% на проход).

В линейных схемах РУ для изменения добротности резонатора достаточно подавать импульсное напряжение, при котором набег фазы составляет 45° , т. к. при полном обходе резонатора оптический импульс проходит через модулятор два раза. В кольцевой схеме импульс через модулятор проходит один раз, поэтому необходимо полуволновое управляющее напряжение, которое при $\lambda = 1240 \text{ нм}$ для кристалла DKDP достигает 10 кВ . Для управления электрооптическим затвором в полуволновом режиме были разработаны специальные высоковольтные ключи на DNZ-структурах, формирующие колоколообразный импульс требуемой амплитуды с длительностью по уровню 0.1 около 12 нс .

Временная привязка двух высоковольтных электрических импульсов, подаваемых на ячейку Поккельса, должна быть очень точно синхронизована с моментом прохода светового импульса через затвор. Это достигалось с помощью специально разработанного двухканального устройства синхронизации на основе микросхем с программно-управляемой логикой, позволявшего плавно регулировать задержку двух электрических импульсов в области 40 нс с шагом 0.2 нс и таким образом синхронизовать их с оптическим импульсом с точностью $1-2 \text{ нс}$. Это позволяло надежно выделять только один импульс из пуга при частоте следования входных оптических импульсов около 88 МГц , а также точно регулировать момент вторичного открывания затвора для вывода усиленного импульса через определенное время.

6. Режим регенеративного усиления

Инъектируемый пучок вводился в резонатор РУ с помощью отражения от первого тонкопленочного поляризатора. При отсутствии электрического напряжения на затворе все импульсы отражались от второго поляриза-

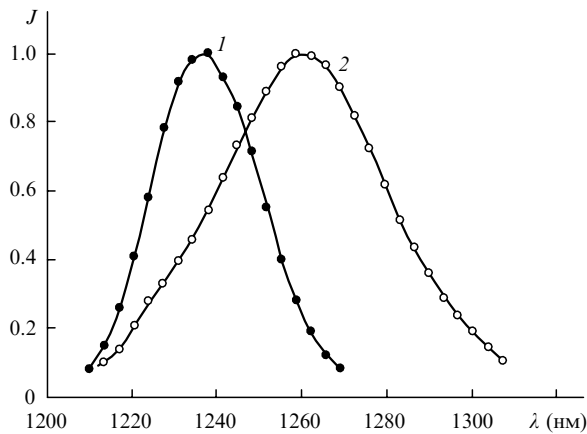


Рис.5. Нормированные спектры импульсов на выходе из регенеративного усилителя (1) и задающего лазера (2).

тора и выходили из резонатора. Когда импульсное напряжение подавалось на электроды модулятора, плоскость поляризации прошедшего через него импульса поворачивалась на 90° , он проходил через второй поляризатор и вводился в резонатор РУ. Момент ввода оптического импульса в усилитель совпадал с приходом импульса накачки. Вывод импульса из резонатора осуществлялся при достижении им максимальной энергии, что контролировалось фотодиодом, установленным за глухим зеркалом. После этого на электрооптический затвор подавался второй высоковольтный импульс, плоскость поляризации проходящего через него усиленного импульса поворачивалась на 90° и он отражался от второго поляризатора.

Процесс усиления продолжался в течение 46–48 проходов через активную среду. Энергия светового импульса увеличивалась от 1.4 нДж до 450 мкДж, что соответствовало коэффициенту усиления 3×10^5 .

На рис.5 показаны спектры импульсов, выходящих из регенеративного усилителя и задающего лазера. Ширина спектра излучения после регенеративного усилителя составляет 24 нм, центральная частота сдвинута на 20 нм в коротковолновую область. Это связано с тем, что в кристалле Cr:форстерита максимум усиления приходится на длину волны 1230 нм, но поглощение ниже при больших длинах волн. В задающем лазере, который работает в режиме слабого усиления, поглощение существенно влияет на определение оптимальной длины волны генерации. В регенеративном усилителе усиление значительно выше потерь и, как следствие, спектр сдвигается в коротковолновую область относительно спектра задающего лазера. К такому же эффекту приводит и увеличение потерь в ячейке Поккельса с приближением длины волны к 1.3 мкм вследствие поглощения на крыле линии связанной воды в кристалле DKDP.

Усиленный импульс сжимался в двухпроходном временном компрессоре с двумя дифракционными решетками. Решетки имели такую же плотность штрихов, как и в стретчере (600 штрих./мм). Компрессор настраивался на достижение минимальной длительности импульса путем изменения угла решеток и расстояния между ними. Угол падения на решетку составлял 23° , а расстояние между решетками было равно 80 см. После сжатия энергия импульса уменьшилась на 25 % и составила 330 мкДж. Нестабильность энергии выходного импульса была рав-

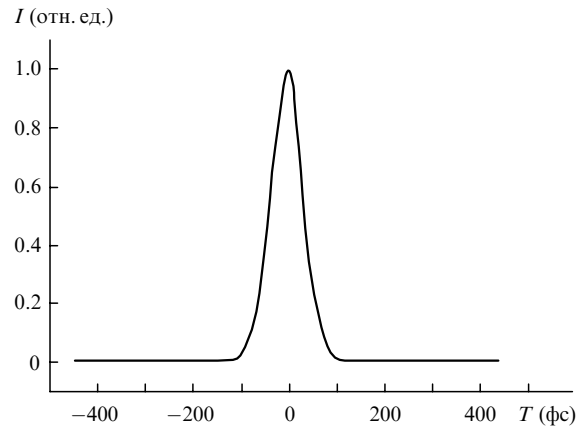


Рис.6. Автокорреляционная функция импульса на выходе компрессора.

на $\pm 3\%$ и определялась, в основном, нестабильностью энергии лазера накачки.

Характерная автокорреляционная функция импульса изображена на рис.6. Длительность импульса составляла около 70 фс при аппроксимации профиля интенсивности функцией sech^2 . Измерения проводились с помощью автокоррелятора, работающего по схеме генерации некогерентной второй гармоники, когда длительность определялась за один лазерный импульс.

7. Заключение

Разработан регенеративный усилитель с кольцевой схемой резонатора и полуволновым электрооптическим затвором на кристалле DKDP с импульсной накачкой излучением Nd:YAG-лазера.

Для достижения максимальной энергии выходного импульса проведена оптимизация РУ, исследованы зависимости выходной энергии от положения активного элемента в резонаторе и от фокусировки накачки. Получено усиление энергии фемтосекундного импульса от задающего лазера до 450 мкДж при энергии импульса накачки 20 мДж и частоте следования 10 Гц.

Усиленный импульс сжат в компрессоре на двух дифракционных решетках до длительности 70 фс, энергия импульса на выходе компрессора составила 330 мкДж (пиковая мощность 4.7 ГВт). Измеренная ширина спектра сжатого импульса составила 24 нм, что свидетельствует о высоком качестве выходного импульса (произведение длительности импульса на полуширину спектра было равно 0.33 в приближении огибающей, аппроксимированной функцией sech^2).

Разработанный РУ на Cr:форстерите достаточно компактен: он полностью располагается (включая лазеры накачки и вспомогательные электронные блоки) на оптическом столе размером 1.2×1.5 м и отличается надежностью работы и долговременной стабильностью параметров.

Следует отметить также, что отличительной особенностью разработанной фемтосекундной системы на базе Cr:форстерита является то, что она полностью основана на отечественных элементах и комплектующих. Это позволило отказаться от закупок дорогостоящего импортного оборудования и существенно снизить стоимость разработки.

Авторы выражают признательность Д.В.Яковлеву за помощь в настройке системы управления электрооптическим затвором.

1. Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 95 (2001).
2. Karpain H., Murnane M. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 1207 (1998).
3. Evans J.M., Petricevic V., Alfano R.R. *Opt. Lett.*, **23**, 1692 (1998).
4. Jonusauskas G., Oberle J., Rulliere G. *Opt. Lett.*, **23**, 1918 (1998).
5. Shcheslavsky V., Noack F., Petrov V., Zhavoronkov N. *Appl. Opt.*, **38**, 3294 (1999).
6. Togashi T., Nabekawa Y., Sekikawa T., Watanabe S. *Appl. Phys. B*, **68**, 169 (1999).
7. Zhavoronkov N., Petrov V., Noack F. *Appl. Opt.*, **38**, 3285 (1999).
8. Гордиенко В.М., Иванов А.А., Коновалов А.Н. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 511 (2002).
9. Ivanov A.A., Alfimov M.V., Zheltikov A.M. *Laser Phys.*, **10**, 796 (2000).
10. Yakovlev V., Ivanov A., Shcheslavskiy V. *Appl. Phys. B*, **74**, s145 (2002).
11. Slobodchikov E., Ma J., Kamalov V., Tomigava K., Yoshihara K. *Opt. Lett.*, **21**, 354 (1996).
12. Petricevic V., Seas A., Alfano R.R. In *Advanced Solid-State Lasers* (New York: OSA Proc., 1992, v. 13).
13. Pessot M., Squier J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **14**, 797 (1989).
14. Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А. *Квантовая электроника*, **34**, 506 (2004).
15. Yanovsky V., Felix C., Mourou G. *Appl. Phys. B*, **74**, s181 (2002).