

Усилитель мощности для фемтосекундной тераваттной хром-форстеритовой лазерной системы

А.В.Овчинников, С.И.Ашитков, М.Б.Агранат, Д.С.Ситников

Разработан трехкаскадный усилитель мощности ИК тераваттной фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы, генерирующей импульсы длительностью 80 фс с энергией до 90 мДж и частотой повторения 10 Гц на длине волны излучения 1240 нм и контрастом по интенсивности более 10^6 . Проведено сравнение эффективностей различных схем многопроходных усилителей. Показано, что для достижения тераваттного уровня мощности оптимальной является оптическая схема с использованием плоских зеркал.

Ключевые слова: хром-форстерит, усиление фемтосекундных импульсов, тераваттная лазерная система.

Ранее в работе [1] нами сообщалось о создании тераваттной хром-форстеритовой лазерной системы, построенной по принципу CPA (chirped pulse amplification) – усиления chirпированных импульсов [2, 3]. Система состояла из задающего генератора, стретчера, предварительного усилителя на основе кольцевого регенеративного усилителя (РУ) [4], четырехкаскадного усилителя мощности и компрессора. С ее помощью была реализована генерация импульсов длительностью 80 фс с энергией до 90 мДж на длине волны 1240 нм и частотой повторения 10 Гц. В других CPA-системах на хром-форстерите [5, 6], известных нам к моменту создания данной лазерной системы, энергия импульса не превышала 0.8 мДж [6], а для усиления использовались РУ.

В настоящей работе представлены результаты исследований нескольких схем многопроходных усилителей (МПУ) на хром-форстерите. Данные исследования позволили провести модернизацию усилителя мощности, описанного в [1]. При этом благодаря увеличению эффективности усиления за счет применения двусторонней накачки и оптимизации длины кристаллов, было уменьшено число проходов и каскадов усиления. Приведены результаты измерения контраста импульсов на выходе тераваттной фемтосекундной лазерной системы, выполненного с помощью коррелятора третьей гармоники.

Поскольку энергия одиночного импульса фемтосекундного генератора на кристалле хром-форстерита не превышает нескольких наноджоулей, то для создания тераваттной лазерной системы необходимо усиление по энергии в 10^7 – 10^8 раз. Для реализации столь большого усиления используются РУ и МПУ. Основная сложность заключается в том, что при прямом усилении фемтосекундных импульсов их интенсивность достигает порога нелинейных эффектов уже при энергии порядка нескольких микроджоулей. Поэтому для усиления используется метод CPA [2, 3]. Суть этого метода состоит в том, что

выходной импульс задающего генератора пропускается через линию задержки с большой дисперсией групповых скоростей (стретчер), за счет чего его длительность увеличивается в 10^3 – 10^4 раз. После усиления импульс снова пропускается через линию задержки, имеющую такую же дисперсию, но противоположного знака. В результате импульс сжимается и приобретает длительность, близкую к исходной (до стретчера).

Оптическая схема фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы приведена на рис.1.

Генерация фемтосекундных импульсов осуществлялась задающим генератором с Z-образным резонатором [7], на выходе которого была получена средняя мощность излучения около 200 мВт на длине волны 1250 нм с шириной спектра 50 нм по уровню 0.5 от максимальной интенсивности. Энергия отдельного импульса на выходе генератора достигала 2.3 нДж. В стретчере использовалась схема с одной дифракционной решеткой, которая обеспечивала увеличение длительности импульса в 10^3 раз. Эффективность стретчера (отношение энергии импульса на выходе к энергии на входе) составляла $\sim 60\%$.

Наибольшее усиление лазерных импульсов обычно реализуется на первом каскаде, работающем в режиме усиления слабого сигнала. В тераваттных титан-сапфировых системах в связи с большим усилением (отношение выходной энергии импульса к входной энергии достигает 8 за один проход по активной среде) в качестве предварительного усилителя используются как регенеративные, так и многопроходные схемы. Усиление в хром-форстерите значительно меньше (не более 2 на проход), и поэтому в первом каскаде наиболее эффективны регенеративные схемы, позволяющие реализовать большое число (несколько десятков) проходов.

В разработанной системе был использован РУ с кольцевой схемой резонатора. Достоинством этой схемы по сравнению с широко распространенной линейной схемой является отсутствие оптической развязки (обычно ячейки Фарадея) между усилителем и задающим генератором. При этом излучение после РУ с кольцевым резонатором имеет вдвое лучший контраст, чем в случае РУ с линейным резонатором [8]. Подробно ознакомиться с функционированием и основными параметрами РУ мож-

А.В.Овчинников, С.И.Ашитков, М.Б.Агранат, Д.С.Ситников. Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13/19; e-mail: ashitkov11@yandex.ru

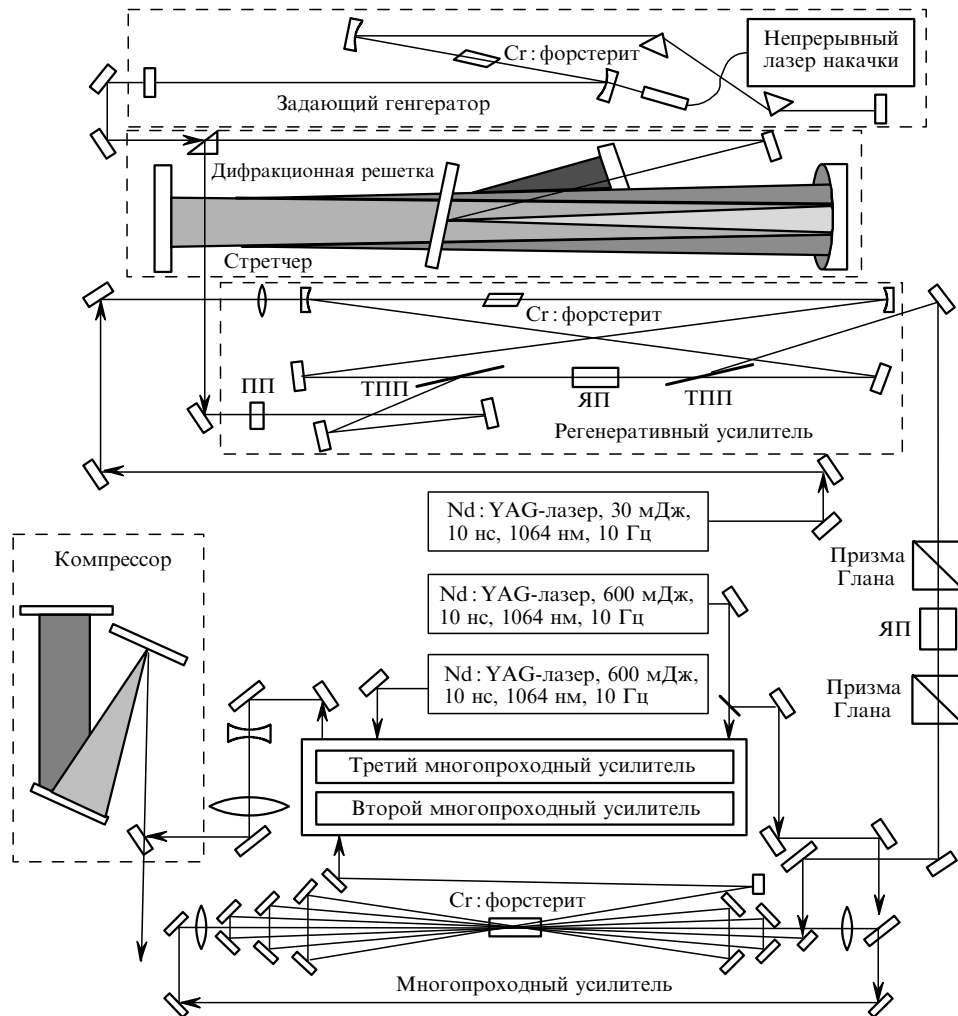


Рис.1. Оптическая схема фемтосекундной хром-форстеритовой лазерной системы: ТПП – тонкопленочный поляризатор; ЯП – ячейка Погкельса; ПП – полуволновая пластина.

но в работе [4]. Здесь мы укажем только основные выходные параметры. Ширина спектра излучения после РУ составила 26 нм, центральная длина волны генерации сдвинута на 20 нм в коротковолновую область относительно длины волны излучения задающего генератора. Максимальное усиление импульса достигалось за 46–48 проходов через активную среду, после чего импульс выводился из резонатора с помощью управляемой ячейки Погкельса. Энергия импульса при этом увеличивалась от 1.4 нДж до 400 мкДж, что соответствует коэффициенту усиления 3×10^5 . Контраст по интенсивности между основным выделяемым импульсом и предимпульсами, выходящими из РУ, составлял $\sim 10^3$.

Для обеспечения более высокого контраста, необходимого для эффективного усиления одиночного импульса в МПУ, использовалась схема, состоящая из двух скрещенных поляризаторов (призмы Глана) и еще одной ячейки Погкельса, расположенной между ними. Управление этой ячейкой осуществлялось электрическим импульсом длительностью 10 нс, синхронизованным с импульсом, управляющим ячейкой Погкельса, установленной в РУ. Эта схема позволила на три порядка улучшить контраст по интенсивности между основным импульсом и предимпульсами, что важно в экспериментах с использованием мощного фемтосекундного излучения, т. к. предимпульсы не должны приводить к каким-либо

изменениям поверхности мишени до воздействия основного импульса. Кроме того, эти предимпульсы, проходя через оконечные каскады усиления, уменьшают инверсию населенности, что снижает их эффективность.

При разработке МПУ были исследованы характеристики двух оптических схем. Одна из них (рис.2) состояла из двух сферических зеркал различного радиуса кривизны (с отверстиями в центре), образующих конфокальный резонатор, и активного элемента, установленного в фокусе этих зеркал. Аналогичная оптическая схема с типичным числом проходов 4–8 [9] широко используется вместо РУ в мощных фемтосекундных лазерах на кристаллах титан-сапфира. Ее основные достоинства – компактность и небольшое число оптических элементов. Малый размер моды усиливаемого сигнала, фокусируемого в кристалл,

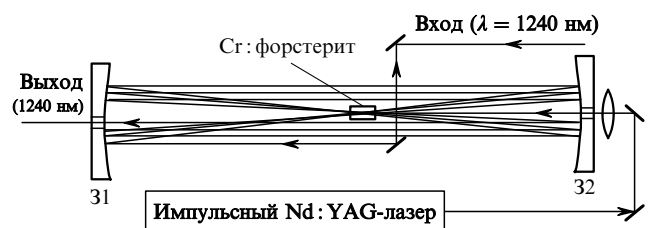


Рис.2. МПУ со сферическими зеркалами 31 и 32.

позволяет получить большой коэффициент усиления при низком уровне накачки. Однако за счет этого усиление быстро насыщается, что и является основным недостатком данной схемы.

В наших экспериментах была реализована схема с шестью проходами через активный элемент. При этом зеркало 31 имело радиус кривизны 1100 мм, а зеркало 32 – 900 мм. Оптическая схема усилителя представляет собой телескоп. С каждым полным проходом по усилителю размер пятна излучения на зеркале 31 уменьшался, а диаметр пучка внутри кристалла увеличивался. В результате размер моды (здесь и далее по уровню e^{-1}) изменялся от 0.4 мм на первом проходе до 1.2 мм на шестом. С каждым проходом излучение приближалось к оптической оси усилителя и на шестом проходе выводилось через отверстие в зеркале 31. Кристалл был вырезан под углом Брюстера и имел размеры 11, 3 и 3 мм вдоль кристаллографических осей a , b и c соответственно. Излучение накачки было направлено вдоль оси a , а вектор поляризации – вдоль оси b . Для накачки использовался Nd:YAG-лазер, работающий в режиме модуляции добротности. Импульсы накачки на длине волны 1064 нм с энергией до 100 мДж фокусировались в кристалл линзой с фокусным расстоянием 500 мм через отверстие в зеркале 32. До фокусирующей линзы излучение проходило через ослабитель, состоящий из полуволновой пластины и пленочного поляризатора, который позволял регулировать энергию и, следовательно, плотность энергии импульса накачки в активном элементе. Размер моды накачки внутри кристалла составлял около 1.5 мм при максимальной плотности энергии 3.5 Дж/см². Дальнейшее увеличение плотности энергии накачки не приводило к росту усиления (рис.3), т.к. возрастало поглощение из возбужденных состояний (ESA) [6]. При этом в кристалле поглощалось около 70 % энергии импульса накачки.

Усиление слабого сигнала в активной среде усилителя определяется следующим выражением:

$$I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \exp[(g_0 - \alpha)L], \quad (1)$$

где I_{in} и I_{out} – интенсивности на входе и выходе активного элемента; L – его длина; g_0 и α – коэффициенты усиления и поглощения. Коэффициент α был измерен при прохождении слабого сигнала через активную среду в отсутствие накачки и составил $\sim 0.15 \text{ см}^{-1}$ ($\sim 7\%$ на проход при длине кристалла 11 мм). На рис.3 показаны экспериментальные зависимости величины g_0L на длине волны 1240 нм от плотности энергии накачки на разных проходах через

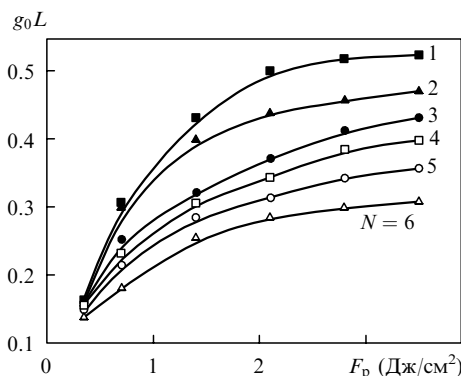


Рис.3. Коэффициент усиления МПУ g_0L в зависимости от плотности энергии накачки F_p на разных проходах; N – номер прохода.

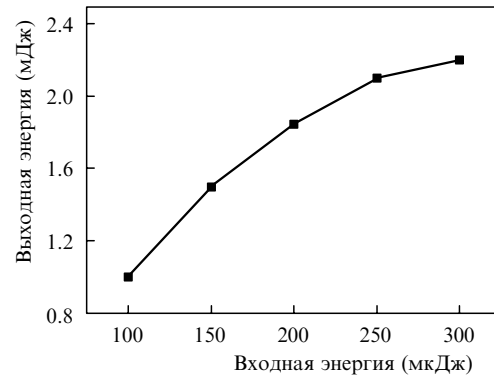


Рис.4. Зависимость энергии выходного импульса МПУ от энергии входного импульса.

активный элемент усилителя. С ростом номера прохода усиление постепенно снижается за счет уменьшения населенности возбужденного состояния.

Зависимость энергии лазерного импульса на выходе МПУ от энергии импульса на входе показана на рис.4. Видно, что при энергии импульса на входе 300 мкДж наступает насыщение, т.е. энергия выходного импульса практически перестает расти, поскольку инверсии населенности недостаточно для получения энергии на выходе свыше 2.3 мДж. При энергии импульса на входе более 300 мкДж максимум энергии выходного импульса достигается за меньшее число проходов, но не превышает указанной величины. Эффективность усилителя, т.е. отношение разности энергий выходного и входного импульсов к энергии импульса накачки, составила 6%.

Анализ полученных данных показал, что для увеличения максимальной энергии выходного импульса необходимо увеличить диаметр моды накачки в активной среде и размер моды усиливаемого сигнала, т.е. создать больший объем активной среды с инверсной населенностью. Однако рассмотренная выше оптическая схема не позволяет изменять размер моды усиливаемого сигнала в необходимых пределах. В связи с этим был апробирован другой вариант схемы МПУ с использованием плоских зеркал (рис.5) [10]. В качестве активной среды использовался цилиндрический кристалл хром-форстерита размером $\varnothing 6.3 \times 21$ мм с просветляющими покрытиями на длину волны 1240 нм на торцах. Параметр качества FOM (Figure of Merit) кристалла был равен 25, и при данной длине кристалла в нем поглощалось примерно 85 % излучения накачки.

Параметры импульса накачки были аналогичны описанным выше. Диаметр моды составлял 2 мм при плотности энергии 3–3.5 Дж/см². Так как на выходе ПУ диаметр пучка был равен ~ 1 мм, то для согласования раз-

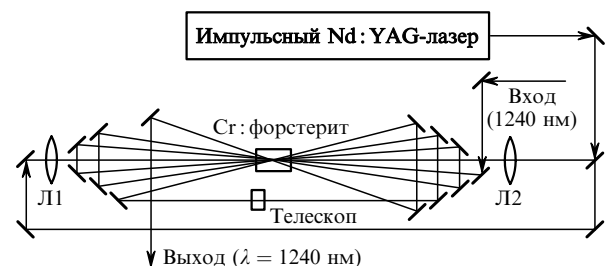


Рис.5. Оптическая схема МПУ с плоскими зеркалами: Л1, Л2 – фокусирующие линзы.

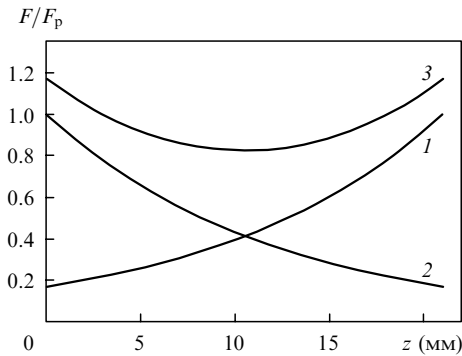


Рис.6. Зависимости нормированной плотности энергии накачки от z (вдоль активного элемента) для $L = 21$ мм при накачке кристалла с одной (1) и другой (2) стороны, а также с двух сторон (3).

мера моды усиливаемого сигнала с диаметром моды накачки использовался телескоп с увеличением 2^{\times} . Этот же телескоп позволял компенсировать тепловую линзу, возникающую в активном элементе за счет поглощения излучения накачки. Измерения максимального усиления на проход в режиме слабого сигнала дали значение 1.65. При этом энергия выходного импульса составила 4.5 мДж при плотности энергии импульса накачки 3.2 Дж/см².

Существенным недостатком усилителя, в котором активная среда накачивается с одной стороны, является неоднородность инверсии населенности и, как следствие, неоднородность усиления вдоль направления распространения излучения. В соответствии с законом Бугера плотность энергии импульса накачки в кристалле $F(z)$ уменьшается по мере его распространения вдоль оси z по экспоненциальному закону:

$$F(z) = F_p \exp(-\alpha z), \quad (2)$$

где F_p – плотность энергии импульса накачки на входном торце активного элемента.

Изменение плотности энергии накачки F вдоль кристалла (ось z) при коэффициенте поглощения 0.84 см⁻¹ показано на рис.6. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют накачке активного элемента через его левый и правый торцы и оба торца одновременно. Легко убедиться в том, что при накачке активного элемента через один из торцов уже на расстоянии 10 мм от этого торца плотность энергии накачки уменьшается в два раза. Для получения более равномерного распределения инверсии населенности вдоль кристалла излучение накачки можно направить в активный элемент с двух сторон. В этом случае неоднородность распределения плотности энергии импульса накачки не превышает 30% (рис.6, кривая 3). Соответствующая этой геометрии зависимость коэффициента усиления от плотности энергии накачки F_p на первом проходе через активный элемент показана на рис.7 (кривая 1). Видно, что такая схема накачки позволяет увеличить максимальный коэффициент усиления в ~ 1.3 раза по сравнению со случаем накачки активного элемента с одной стороны (рис.7, кривая 2). Общее усиление МПУ после шести проходов при этом увеличилось с 15 до 22, а энергия выходного импульса возросла с 4.5 до 6.7 мДж. Так как суммарная поглощенная энергия накачки увеличилась, то для получения плотности энергии $3-3.5$ Дж/см² энергия импульса накачки с каждой стороны кристалла была меньше, чем в случае накачки с одной

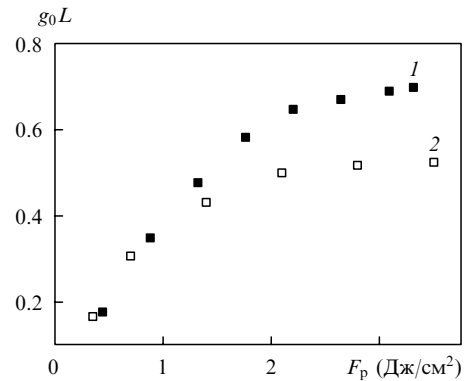


Рис.7. Зависимости коэффициента усиления в активных элементах от плотности энергии импульса накачки на первом проходе при накачке активного элемента с двух сторон (1) и с одной стороны (2).

стороны. Хотя эффективность усилительного каскада, как и в схеме со сферическими зеркалами, составила около 6%, максимальная энергия выходного импульса в данном случае оказалась больше.

Для получения энергии выходного импульса ~ 100 мДж необходимо усилить входной импульс в 15 раз. Это было реализовано с использованием двух дополнительных МПУ и еще одного лазера накачки. Один из этих лазеров использовался для накачки первого и второго каскадов усиления, а другой – для накачки третьего каскада (см. рис.1). Для оптимизации режима работы усилителей были протестированы несколько активных элементов из хром-форстерита разной длины и с разным поглощением излучения накачки (рис.8). Накачка этих элементов осуществлялась с двух сторон.

Из результатов проведенных измерений видно, что максимальное усиление было достигнуто для элемента длиной 20 мм с коэффициентом поглощения излучения накачки 1.2 см⁻¹. Этот элемент и использовался во втором каскаде усиления. Элемент длиной 24 мм с коэффициентом поглощения 1 см⁻¹ имел немного меньшее усиление и использовался в третьем МПУ.

Схема второго каскада была аналогична схеме первого каскада (рис.5), но в ней использовались четыре прохода. После первого каскада был установлен телескоп с увеличением 2.5^{\times} , который обеспечивал плотность энергии импульса на выходе второго МПУ ~ 0.5 Дж/см², а также корректировал расходимость пучка выходного излучения с учетом тепловой линзы. Торцы кристалла

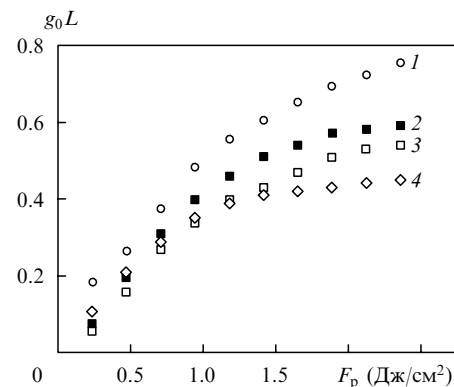


Рис.8. Зависимости коэффициента усиления в активных элементах от плотности энергии импульса накачки на первом проходе при коэффициентах поглощения $\alpha = 1.2$ см⁻¹ ($L = 20$ мм) (1), 0.8 см⁻¹ (24 мм) (2), 0.8 см⁻¹ (21 мм) (3) и 1.2 см⁻¹ (15 мм) (4).

также были просветлены на длину волны 1240 нм. Оптимальное число проходов определялось, исходя из максимума эффективности преобразования поглощенной энергии импульса накачки в энергию усиленного сигнала. Во втором каскаде этот максимум составил 12 % при плотности энергии импульса накачки на торцах кристалла 2.3 Дж/см². Энергия импульса на выходе МПУ достигала при этом 56 мДж. После аналогичного третьего каскада усиления энергия выходного импульса была равна 115 мДж при эффективности этого каскада 9 %. Чуть меньшая реализованная здесь эффективность обусловлена тем, что использованный в этом каскаде элемент имел чуть меньшее усиление на проход (см. рис.8), чем во втором каскаде, а также сложностью реализации третьего прохода.

Усиленный chirпированный импульс сжимался временным компрессором, собранным по оптической схеме с двумя дифракционными решетками (600 штрих./мм) размером 100 × 120 мм. Перед компрессором был установлен телескоп с увеличением 3^х, который ограничивал плотность энергии на дифракционных решетках значением 100 мДж/см². Настройка компрессора на минимальную длительность выходного импульса осуществлялась путем изменения расстояния между решетками. Эффективность компрессора составила 77 % при энергии выходного фемтосекундного импульса 90 мДж.

На рис.9 показаны спектры излучения задающего генератора и импульса на выходе системы (тераваттный уровень мощности). Ширина спектра излучения задающего генератора по уровню 0.5 от максимальной интенсивности составляла ~ 50 нм, а импульса на выходе всей системы – примерно 30 нм, что соответствует длительности выходного импульса ~ 80 фс.

Для экспериментов, в которых используются мощные фемтосекундные импульсы, важна не только длительность импульса, но и временной профиль его интенсивности. Исследование последнего проводилось с помощью коррелятора с динамическим диапазоном регистрации сигнала до 10⁹. Принцип действия этого коррелятора основан на измерении кросс-корреляционной

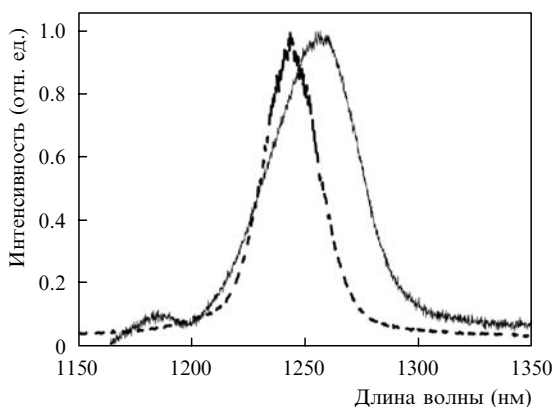


Рис.9. Спектры выходного импульса задающего генератора (сплошная кривая) и импульса на выходе тераваттной лазерной системы (штриховая кривая).

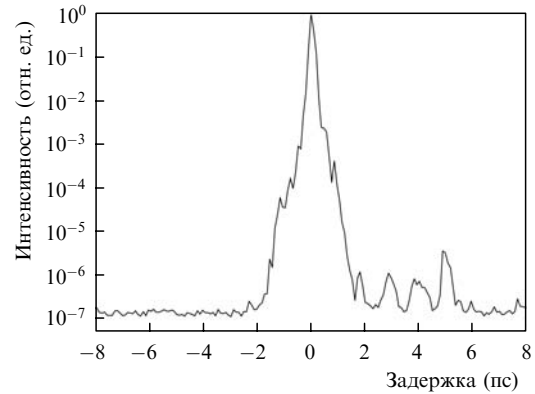


Рис.10. Кросс-корреляционная функция третьего порядка импульса на выходе системы.

функции третьего порядка выходного импульса; коррелятор обеспечивал измерение фона, обусловленного усиленной спонтанной люминесценцией, а также регистрацию предимпульсов и постимпульсов [11]. Характерная кросс-корреляционная функция приведена на рис.10. Видно, что реализованный в системе контраст по интенсивности составляет не менее 10⁴ за 1 пс и более 10⁶ за 2 пс до максимума.

Нестабильность энергии импульсов на выходе тераваттной хром-форстеритовой лазерной системы определялась в основном нестабильностью энергии импульсов лазеров накачки и не превышала ~ 5 %.

В заключение отметим, что возможность реализации высокой энергетической эффективности в усилителях мощности при использовании для их накачки лазеров с длиной волны генерации 1064 нм, делает перспективным применение кристаллов хром-форстерита в качестве активной среды фемтосекундных тераваттных лазерных систем ИК диапазона. Более низкий коэффициент усиления по сравнению с кристаллами титан-сапфира, с одной стороны, приводит к необходимости увеличения числа проходов через активную среду, а с другой — позволяет снизить уровень усиленной спонтанной люминесценции.

1. Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Коныщенко А.В., Овчинников А.В., Фортвов В.Е. *Квантовая электроника*, **34**, 506 (2004).
2. Pessot M., Squier J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **14**, 797 (1989).
3. Strikland D., Mourou G. *Opt. Commun.*, **56**, 219 (1985).
4. Агранат М.Б., Ашитков С.И., Иванов А.А., Коныщенко А.В., Овчинников А.В., Подшивалов А.А. *Квантовая электроника*, **34**, 1018 (2004).
5. Shcheslavskiy V., Noak 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. Yakovlev V.V., Ivanov A.A., Shcheslavskiy V. *Appl. Phys. B*, **74**, 145 (2002).
8. Yanovsky V., Felix C., Mourou G. *Appl. Phys. B*, **74**, 181 (2002).
9. Крюков П.Г. *Квантовая электроника*, **31**, 95 (2001).
10. Агранат М.Б., Ашитков С.И., Овчинников А.В. Патент на полезную модель № 47140 от 10.08.05. Приоритет от 10.03.05.
11. Hentschel M., Uemura S., Cheng Z., Sartania S., Tempea G., Spielmann Ch., Krausz F. *Appl. Phys. B*, **68**, 145 (1999).