

100-тераваттный фемтосекундный лазер на основе параметрического усиления

В. В. Ложкарев, С. Г. Гаранин⁺, Р. Р. Герке[∇], В. Н. Гинзбург, Е. В. Катин, А. В. Кирсанов, Г. А. Лучинин, А. Н. Мальшаков, М. А. Мартьянов, О. В. Палашов, А. К. Потемкин, Н. Н. Рукавишников⁺, А. М. Сергеев, С. А. Сухарев⁺, Г. И. Фрейдман, Е. А. Хазанов¹⁾, А. В. Чарухчев*, А. А. Шайкин, И. В. Яковлев

Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁺ Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607188 Саров, Россия

* Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем
188540 Сосновый Бор, Россия

[∇] ЗАО “ХолоГрэйт”, 190068 С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 20 июня 2005 г.

В экспериментах по параметрическому усилению фемтосекундных импульсов в широкоапертурных кристаллах DKDP достигнута мощность более 100 ТВт, что значительно превышает рекордный уровень, достигнутый в таких лазерах. Получен КПД параметрического усилителя по энергии 27%. Энергия импульса длительностью 72 фс составила 10 Дж.

PACS: 42.65.–k

Петтаваттная мощность лазерного излучения была достигнута еще в 1997 г. [1] на основе усиления чирпированных импульсов в стекле с неодимом. К настоящему времени лишь три лаборатории в мире достигли этого уровня [1–3], причем дальнейшее увеличение мощности принципиально ограничено узкой полосой усиления неодимового стекла и низкой оптической стойкостью дифракционных решеток. Использование параметрических усилителей света вместо обычных лазерных является одним из наиболее перспективных путей для преодоления петтаваттного барьера мощности. В подобных системах, впервые предложенных в [4, 5], за счет подбора нелинейного кристалла, направлений распространения и частот накачки и сигнальной волны реализуются условия широкополосного синхронизма, и наряду с этим используется традиционный для генерации сверхсильных полей принцип последовательного растяжения (чирпования), многокаскадного усиления и компрессии усиленных импульсов.

Для усиления фемтосекундных импульсов в параметрических усилителях до петтаваттных мощностей требуется, во-первых, килоджоульный уровень энергии импульса накачки длительностью около 1 нс, что делает наиболее перспективным использование лазера на неодимовом стекле. Во-вторых, необходимы нелинейные кристаллы с апертурой 30 см и более, что

ограничивает выбор лишь двумя кандидатами: KDP и DKDP.

Проблема создания параметрических усилителей фемтосекундных импульсов до мультитераваттного и петтаваттного уровней обсуждалась и экспериментально исследовалась в [6–10]. В этих работах в качестве нелинейных элементов последних каскадов параметрических усилителей рассматривались кристаллы KDP, в которых при накачке второй гармоникой излучения лазера на неодимовом стекле (длина волны накачки 527 нм) максимальная ширина полосы усиления достигается близко к вырожденному взаимодействию (длина волны сигнального излучения ~ 1054 нм). В [11, 12] нами было предложено использовать невырожденное параметрическое усиление в кристалле DKDP, который, в отличие от KDP, прозрачен примерно до 1.4 мкм [13]. Кроме того, как было показано в [12, 14], для центральной длины волны сигнального излучения 910 нм в DKDP реализуется сверхширокополосный фазовый синхронизм, что позволяет усиливать импульсы длительностью 10–15 фс. В качестве задающего фемтосекундного генератора могут использоваться лазеры, работающие на длине волны сигнального излучения 910 нм (сапфир с титаном) или холостого – 1250 нм (форстерит с хромом). Перспективность последнего варианта была продемонстрирована в [15], а позднее был создан лазер мощностью 0.44 ТВт [14, 16]. Этот лазер является стартовой системой 100-

¹⁾e-mail: khazanov@appl.sci-nnov.ru

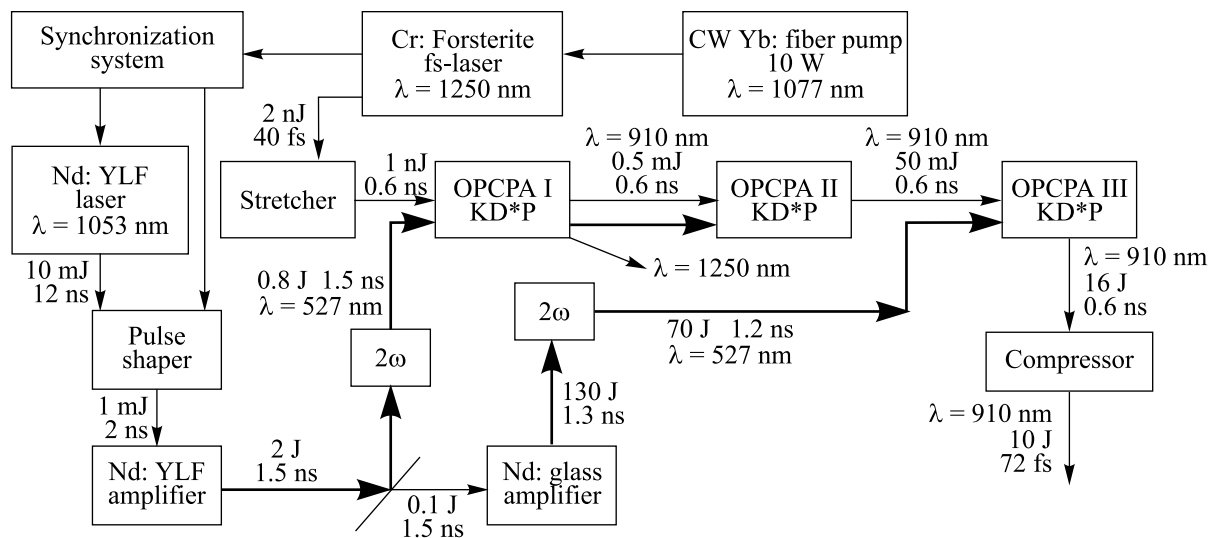


Рис.1. Схема 100-тераваттного лазерного комплекса на основе параметрического усиления chirпированных импульсов

тераваттного лазерного комплекса, описанного в данной работе.

Общая схема 100-тераваттного лазерного комплекса приведена на рис.1. Задающим генератором являлся лазер на форстерите с хромом, излучающий импульсы длительностью 45 фс с энергией 3 нДж (центральная длина волны 1250 нм). Мы использовали оригинальный стретчер (полоса пропускания 1000 см^{-1}), содержащий кроме обычных дифракционных решеток две призмы, что позволило эффективно сжать импульс длительностью 600 пс на длине волны 910 нм при помощи обычного компрессора [14, 16].

Накачкой первых двух параметрических усилителей служило излучение второй гармоники однододового одночастотного Nd:YLF-лазера с длиной волны 527 нм, энергией до 1 Дж в импульсе длительностью 1.5 нс при частоте повторения импульсов 2 Гц. Часть излучения основной гармоники этого лазера направлялась через многоступенчатый пространственный фильтр [16, 17] на вход пятикаскадного усилителя на фосфатном неодимовом стекле. Усилитель работал с периодом одна вспышка за 30 мин и обеспечивал на выходе энергию импульса второй гармоники 70 Дж при длительности импульса 1.2–1.5 нс и диаметре пучка 10 см. Расходимость выходного излучения составила три дифракционных предела, что удовлетворяет требованию, предъявляемому к излучению накачки третьего параметрического усилителя. Подробно система накачки всех параметрических усилителей описана в работе [18], а синхронизация ее с фемтосекундным задающим генератором – в [19].

Первый параметрический усилитель был двухпроходным. На первом проходе он осуществлял широко-

полосное преобразование chirпированных импульсов на длине волны 1250 нм в импульсы сигнального излучения на длине волны 910 нм, а на втором – усиливал излучение на длине волны 910 нм. После второго усилителя энергия импульса достигала нескольких десятков миллиджоулей. Методика настройки, а также спектральные, угловые и энергетические характеристики двух первых параметрических усилителей (тераваттный уровень мощности) детально описаны в [14].

Третий параметрический усилитель (непросветленный кристалл DKDP длиной 65 мм, чистой апертурой 100 мм) имел коэффициент усиления по слабому сигналу 1500 раз при энергии накачки 50 Дж. При входном сигнале несколько десятков миллиджоулей это обеспечивало глубокое насыщение параметрического усиления. Благодаря насыщению и хорошему качеству пучка накачки была достигнута энергия chirпированного импульса на входе в компрессор 16 Дж, см. рис.2. Максимальный физический КПД параметрического усилителя составил 27% по энергии. Спектр излучения при этом не сужался.

Для сжатия импульса мы использовали вакуумный компрессор на основе двух дифракционных решеток и одного уголкового отражателя с чистой апертурой 110 мм. Коэффициент пропускания компрессора составил 65%. Дистанционная система юстировки позволяла настраивать все оптические элементы компрессора с точностью 5 угл.с. В выходном излучении не наблюдалось ни сужения спектра, ни углового chirпа. Максимальная энергия скомпрессированных импульсов – 10 Дж. Автокорреляционная функция приведена на рис.3. Ей соответствует импульс лоренце-

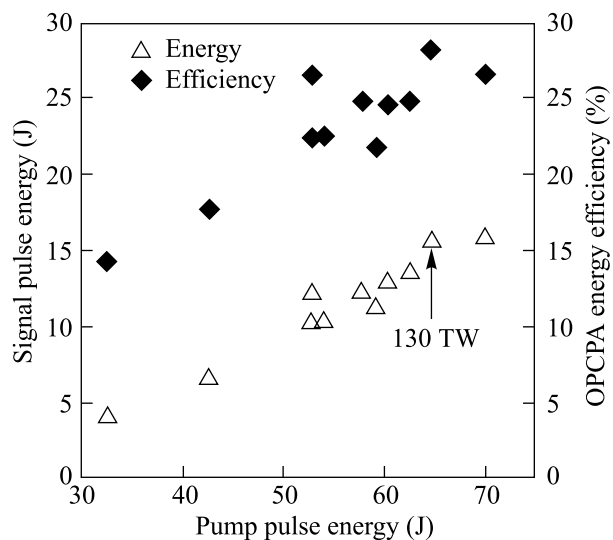


Рис. 2. Зависимость энергии импульса на входе в компрессор (треугольники) и энергетического КПД параметрического усилителя (ромбы) от энергии импульса накачки

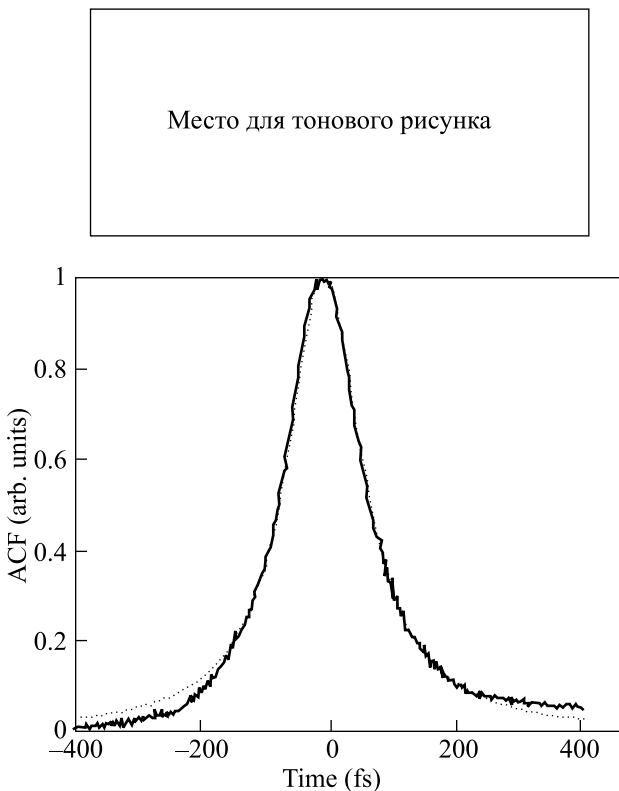


Рис. 3. Автокорреляционная функция (ACF) на выходе 100-тераваттного лазера (фото, сплошная кривая) и лоренцева кривая для импульса длительностью по полувысоте 72 фс (пунктирная кривая)

вой формы длительностью по полувысоте 72 фс. Таким образом, пиковая мощность на выходе фемтосекундного лазерного комплекса на основе параметри-

ческого усиления chirпированных импульсов составила 130 ТВт. Эта величина в 8 раз превышает рекордный уровень, достигнутый в лазерах с параметрическим усилением chirпированных импульсов [9].

Таким образом, экспериментально достигнут 100-тераваттный уровень пиковой мощности с помощью предложенной нами ранее архитектуры мощных фемтосекундных лазеров. Расчеты показывают, что для достижения мультипетаваттной мощности необходим еще один параметрический усилитель с апертурой 200–300 мм и с энергией импульса накачки 1–2 кДж на длине волны 527 нм. Кристалл DKDP для такого усилителя уже выращен в ИПФ РАН, а лазер накачки существует в РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров) – один из каналов мощной установки на неодимовом фосфатном стекле “Луч” [20]. В настоящее время ведутся работы по созданию на этой базе мультипетаваттного лазерного источника.

Работа поддержана Программой ведущих научных школ (грант # НШ-1625.2003.2), а также финансированием по программе Президиума РАН “Фемтосекундная оптика и физика сверхсильных лазерных полей” и по программе ОФН РАН “Нелинейная оптика уникальных лазерных систем”.

1. D. M. Pennington, M. D. Perry, B. C. Stuart et al., *Proc. SPIE* **3047**, 490 (1997).
2. Y. Kitagawa, Y. Sentoku, S. Akamatsu et al., *Physics of plasmas* **9**, 2202 (2002).
3. C. B. Edwards, J. C. Aldis, R. Allot et al., *Proc. SPIE* **4948**, 444 (2003).
4. А. Пискарскас, А. Стабинис, А. Янкаускас, *УФН* **29**, 969 (1986).
5. A. Dubietis, G. Jonusauskas, and A. Piskarskas, *Opt. Commun.* **88**, 437 (1992).
6. I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie et al., *Opt. Commun.* **144**, 125 (1997).
7. P. Matousek, B. Rus, and I. N. Ross, *IEEE J. of Quantum Electronics* **36**, 158 (2000).
8. I. N. Ross, J. L. Collier, P. Matousek et al., *Appl. Opt.* **39**, 2422 (2000).
9. X. Yang, Z. h.-z. Xu, Y.-x. Leng et al., *Opt. Lett.* **27**, 1135 (2002).
10. O. Chekhlov, J. L. Collier, I. N. Ross et al., in *Conf. on Lasers and Electro-Optics, CLEO-2005*, May 22–27, Baltimore, Maryland, JFB3, 2005.
11. G. Freidman, N. Andreev, V. Bespalov et al., in *Conf. on Lasers and Electro-Optics, CLEO-2002, Postdeadline Papers*, May 19–24, Long Beach, California, CPDA9-1, 2002.
12. G. Freidman, N. Andreev, V. Ginzburg et al., *Proc. SPIE* **4630**, 135 (2002).

13. В. И. Беспалов, И. А. Батырева, Л. А. Дмитренко и др., *Квантовая электроника* **4**, 1563 (1977).
14. V. V. Lozhkarev, G. I. Freidman, V. N. Ginzburg et al., *Laser Physics* **15**, (2005).
15. G. Freidman, N. Andreev, V. Bespalov et al., *Proc. SPIE* **4972**, 90 (2003).
16. Н. Ф. Андреев, В. И. Беспалов, В. И. Бредихин и др., *Письма в ЖЭТФ* **79**, 178 (2004).
17. A. K. Poteomkin, E. V. Katin, E. A. Khasanov et al., *Advanced Solid-State Photonics*, February 6-9, Vienna, TuB42, 2005.
18. А. К. Потемкин, Е. В. Катин, А. В. Кирсанов и др., *Квантовая электроника* **35**, 302 (2005).
19. Е. В. Катин, В. В. Ложкарев, О. В. Палашов, Е. А. Хазанов, *Квантовая электроника* **33**, 836 (2003).
20. С. Г. Гаранин, А. И. Зарецкий, Р. И. Ильяев и др., *Квантовая электроника* **35**, 299 (2005).