

Лазер на неодимовом стекле с энергией импульсов 220 Дж и частотой их следования 0.02 Гц

А.А.Кузьмин, О.В.Кулагин, Е.А.Хазанов, А.А.Шайкин

Создан компактный лазер на неодимовом стекле с энергией импульсов 220 Дж и рекордной для установок подобного уровня частотой их следования 0.02 Гц (длительность импульса 30 нс). Термонаведенные искажения фазы излучения скомпенсированы при помощи обращения волнового фронта. Интегральная деполяризация излучения уменьшена до 0.4% за счет применения линейных схем компенсации. Вторая гармоника излучения лазера может быть использована для накачки мультитераваттного комплекса на основе Ti:сапфира.

Ключевые слова: неодимовые лазеры, высокая частота повторения импульсов, компенсация термонаведенных эффектов, обращение волнового фронта.

В настоящее время самыми мощными источниками когерентного оптического излучения являются петаваттные лазерные установки. В большинстве из них энергия порядка килоджоуля первоначально запасается в ионах неодима в стекле в виде инверсии населенностей. Можно выделить три основных типа петаваттных лазеров: в одних в качестве усиливающей среды используется непосредственно неодимовое стекло [1], в других – сапфир (Ti:сапфир – корунд с титаном) [2], в третьих реализован принцип параметрического усиления на кристаллах DKDP [3]. В последних двух случаях излучение лазера на неодимовом стекле с энергией несколько сотен джоулей после преобразования во вторую гармонику используется для накачки либо кристалла сапфира, либо параметрического усилителя. Таким образом, мощный лазер на неодимовом стекле является одной из основных составляющих частей петаваттной лазерной установки. Основное достоинство неодимового стекла – возможность создания широкоапертурных активных элементов, способных запасать большое количество энергии и работающих в условиях, безопасных с точки зрения оптического пробоя. Однако низкая теплопроводность стекла значительно ограничивает частоту следования импульсов. В существующих петаваттных установках на основе неодимового стекла и во всех мультитераваттных проектах частота следования составляет несколько импульсов в день, что сильно снижает эффективность научных исследований и возможность практического применения петаваттных и мультитераваттных лазеров из-за малой скорости получения экспериментальных результатов.

В последнее время в мире наметились две основные тенденции развития петаваттных систем. Первая связана с увеличением пиковой мощности генерируемого лазерного излучения и с продвижением в мультитераваттный диапазон. На решение этой задачи нацелено множество

проектов, среди которых можно выделить паневропейский ELI (Extreme Light Infrastructure) [4], российские PEARL-10 и XCELS [5], французский Apollon-10P [6], британский Vulcan-10PW [7], японский Gekko EXA [8], американский [9] и китайский [10] 10 ПВт-проекты. Вторая тенденция связана с увеличением частоты следования импульсов в петаваттных системах [11, 12]. Очень важным представляется объединение этих двух направлений – создание мультитераваттного лазера с высокой частотой следования импульсов (порядка одного импульса в минуту и чаще).

Важно отметить, что в 2012 году учеными французской фирмы Thales был создан титан-сапфировый лазер Bella [12] мощностью 1 ПВт с частотой следования импульсов 1 Гц. Уникально высокой частоты следования удалось добиться благодаря использованию вместо неодимового стекла кристаллов Nd:YAG. Современные технологии не позволяют выращивать кристаллы Nd:YAG диаметром более 20 мм с хорошим оптическим качеством, что ограничивает запасенную энергию в одном усилителе из Nd:YAG на уровне ~10 Дж. Для создания петаваттной установки требуется большое число таких усилителей (в установке Bella их 12, а суммарная энергия излучения составляет 170 Дж). Таким образом, дальнейшее масштабирование представляется практически невозможным, поскольку экстенсивное увеличение количества усилителей из Nd:YAG малопродуктивно. Требуются активные элементы с запасенной энергией несколько сотен джоулей. В настоящее время такие элементы могут быть изготовлены только из стекла с неодимом.

В статье [13] мы приводили результаты исследований импульсно-периодического режима работы созданного нами лазерного усилителя со стержневым активным элементом из неодимового фосфатного стекла диаметром 45 мм и длиной накачиваемой области 250 мм (обозначим этот усилитель как У45). Накачка в усилителе осуществлялась шестью газоразрядными лампами марки ИФП-5000-2, активный элемент охлаждался проточной водой комнатной температуры. Оригинальная конструкция квантрона позволяла запасать в стержне более 100 Дж энергии с практически однородным распределением инверсии

А.А.Кузьмин, О.В.Кулагин, Е.А.Хазанов, А.А.Шайкин. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: alexeyhsgap@yandex.ru

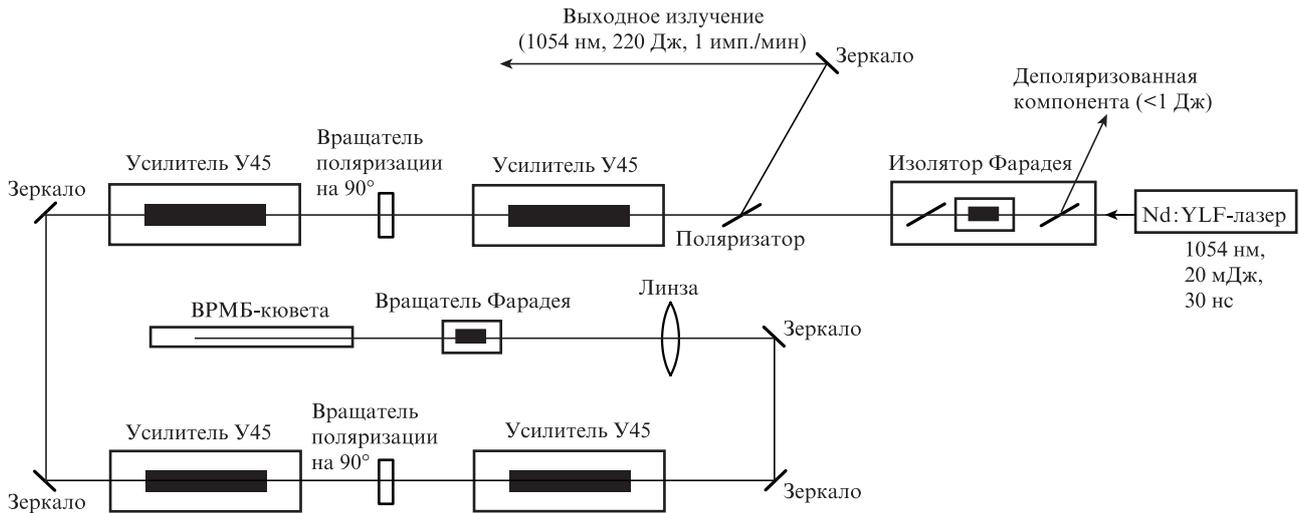


Рис.1. Схема лазерной установки.

населенности при частоте следования 1 имп./мин и пятикратном запасе прочности по отношению к термомеханическим разрушениям. В настоящем письме описан созданный на основе У45 прототип лазера для накачки титансапфирового мультитераваттного комплекса, частота следования импульсов в котором равна 0.02 Гц.

Схема установки приведена на рис.1. Стартовая часть на основе Nd:YLF-лазера, длина волны излучения которого почти совпадает с длиной волны усиления фосфатного неодимового стекла (1054 нм), обеспечивала генерацию гигантских импульсов с длительностью по полувисоте 30 нс и энергией до 20 мДж. Пучок на выходе стартовой части имел дифракционное качество.

После прохождения изолятора Фарадея излучение через поляризатор заводилось в силовой канал, состоящий из последовательно расположенных четырех двухпроходных усилителей У45 и нелинейно-оптического зеркала, осуществляющего обращение волнового фронта (ОВФ) за счет вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) [14]. Хотя суммарный коэффициент усиления по слабому сигналу в канале за два прохода составлял порядка 7×10^6 , самовозбуждения усилителей У45 не происходило из-за порогового характера ВРМБ. После двойного прохода через вращатель Фарадея с апертурой 18 мм, расположенный перед ВРМБ-кюветой, плоскость поляризации в пучке поворачивалась на 90°, в результате чего излучение направлялось поляризатором на выход схемы.

Термонаведенные искажения излучения (деполяризация и термолинза) в усилителях У45 были скомпенсированы. Деполяризация компенсировалась при помощи кварцевых вращателей поляризации на 90°, установленных между активными элементами (рис.1), а также за счет использования вращателя Фарадея и ОВФ-зеркала. Вращатель Фарадея перед ВРМБ-кюветой предпочтительнее четвертьволновой пластинки, которая обеспечивает развязку, но не уменьшает деполяризацию в усилителях, некомпенсированную кварцевыми вращателями [15].

Фазовые искажения были уменьшены за счет ОВФ. ВРМБ-кювета имела длину 1 м и была наполнена перфтороктаном C_8F_{18} , результаты исследования которого представлены в [16] (порог ВРМБ для импульсов длительностью 30 нс составляет 5.7 мДж). Излучение фокусировалось в кювету при помощи линзы с фокусным расстоянием

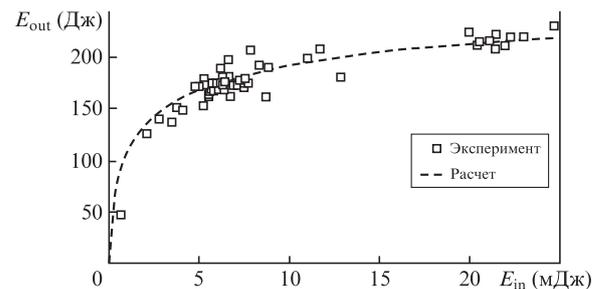
1.7 м. Коэффициент отражения для лазерных импульсов с энергией до 12 Дж превышал 90%.

На рис.2 представлены расчетная и экспериментальная зависимости энергии на выходе лазера E_{out} от энергии импульсов стартовой части E_{in} . Максимальная энергия составила 220 Дж при частоте следования 1 имп./мин. Распределения интенсивности пучка в ближней и дальней зонах на выходе установки изображены на рис.3. Пучок имеет достаточно плоскую вершину, а его расходимость составляет 120 мкрад (два дифракционных предела).

Излучение деполяризованной компоненты с энергией 0.4% от E_{out} выводилось из установки при помощи изолятора Фарадея (см. рис.1). Распределение интенсивности этого пучка показано на рис.3, в.

Форма лазерного импульса при отражении от ВРМБ-кюветы и усилении в активных элементах практически не изменялась и даже на выходе лазера оставалась близкой к форме импульса задающего генератора с длительностью по полувисоте 30 нс (рис.4).

Мы ожидаем, что после преобразования излучения во вторую гармонику можно получить энергию до 150 Дж на длине волны 527 нм. Это излучение может быть использовано для накачки кристаллов Ti:сапфира в схеме усилителя chirпированных фемтосекундных импульсов. Выходная энергия созданного нами лазера может быть многократно увеличена за счет использования нескольких параллельных усилительных каналов, причем после удвоения частоты излучения число каналов можно уменьшить вдвое при использовании ео–е-синхронизма. Созданная установка является прототипом лазера накачки

Рис.2. Расчетная и экспериментальная зависимости энергии E_{out} на выходе лазера от энергии E_{in} на входе (после стартовой части).

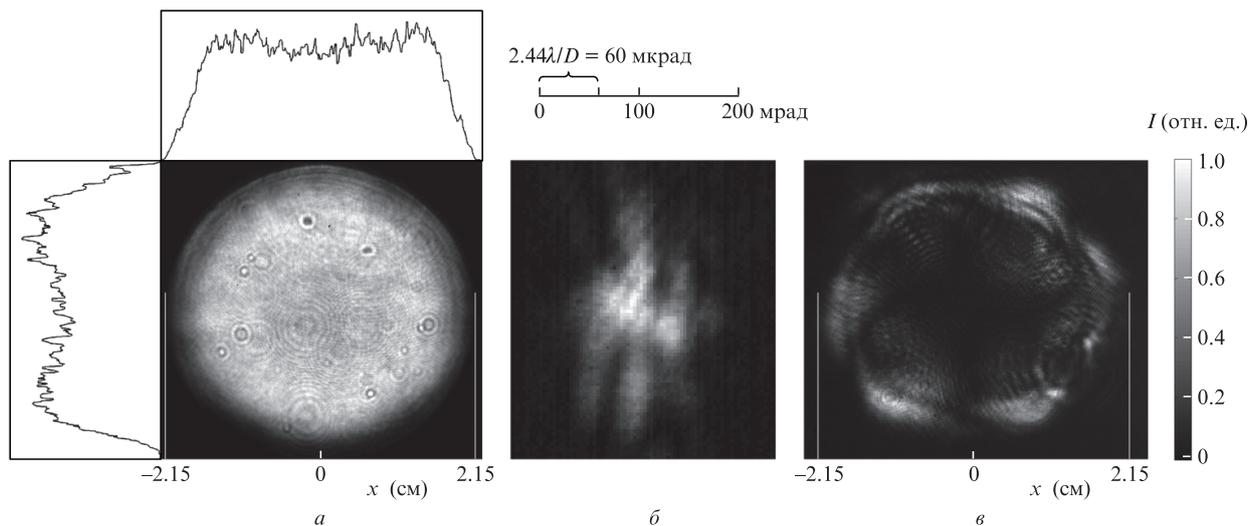


Рис.3. Поперечные распределения интенсивности выходного пучка в ближней (а) и дальней (б) зонах дифракции и распределение интенсивности деполяризованной компоненты (в). Диапазон изменения цвета на всех рисунках одинаков.

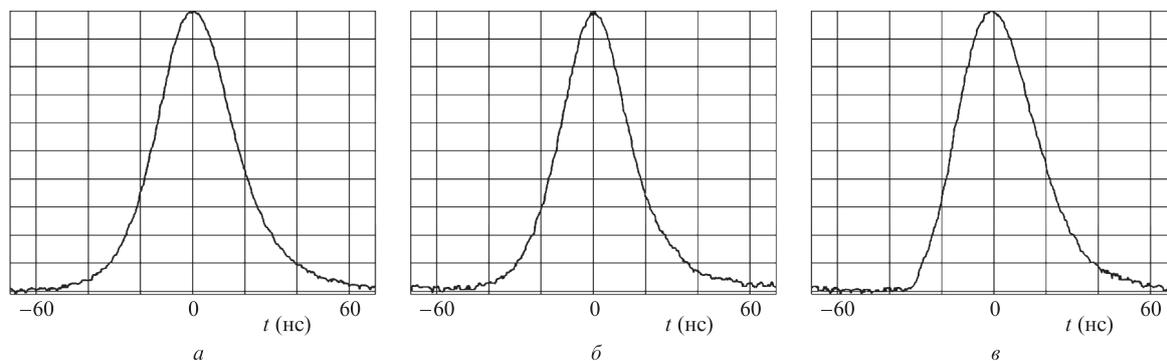


Рис.4. Осциллограммы импульсов на выходе стартовой части (а), ВРМБ-кюветы (б) и лазера (в).

для мультипетаваттного комплекса с высокой (~1 имп./мин) частотой следования импульсов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 12-02-31222).

1. Perry M.D. et al. *Opt. Lett.*, **24**, 160 (1999).
2. Aouama M. et al. *Opt. Lett.*, **28**, 1594 (2003).
3. Lozhkarev V.V. et al. *Laser Phys. Lett.*, **4**, 421 (2007).
4. Chambare J.-P. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7721**, 77211D (2010).
5. www.xcels.iapras.ru
6. Le Blanc C. et al. *Proc. Intern. Commit. Ultra Intense Lasers Conf. (ICUIL 2012)* (Mamaia, Romania, 2012, p. 32).
7. Hernandez-Gomez C. et al. *The Vulcan 10 PW project*. CLF Annual Report 2008-2009, pp.267-270

8. Kawanaka J. et al. *Proc. Intern. Commit. Ultra Intense Lasers Conf. (ICUIL 2012)* (Mamaia, Romania, 2012, p. 14).
9. Ditmire T. *Proc. Intern. Commit. Ultra Intense Lasers Conf. (ICUIL 2012)* (Mamaia, Romania, 2012, p. 18).
10. Ruxin Li et al. *Proc. Intern. Commit. Ultra Intense Lasers Conf. (ICUIL 2012)* (Mamaia, Romania, 2012, p. 22).
11. Yu T.J. et al. *Opt. Express*, **20**, 10807 (2012).
12. Leemans W.P. et al. *Proc. Intern. Commit. Ultra Intense Lasers Conf. (ICUIL 2012)* (Mamaia, Romania, 2012, p. 35).
13. Кузьмин А.А., Хазанов Е.А., Шайкин А.А. *Квантовая электроника*, **42**, 283 (2012).
14. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
15. Carr I.D. and Hanna D.C. *Appl. Phys. B*, **36**, 83 (1985).
16. Andreev N.F., Kulagin O.V., Palashov O.V., Pasmanik G.A., Rodchenkov V.I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2633**, 476 (1996).