

Лазерная система с излучением энергии 100 мДж в модах Лагерра – Гаусса

В.Х.Багдасаров, С.В.Гарнов, Н.Н.Денисов, А.А.Малютин,
Ю.В.Долгополов, А.В.Копалкин, Ф.А.Стариков

Описаны оптическая схема и параметры излучения лазерной системы на неодимовом стекле для получения мощных пучков Лагерра–Гаусса первого–третьего порядков с выходной энергией не менее 100 мДж при длительности импульса 40 нс.

Ключевые слова: неодимовый лазер, мощное лазерное излучение, моды Эрмита–Гаусса, моды Лагерра–Гаусса, астигматический конвертер мод.

1. Введение

В течение длительного времени процессы взаимодействия лазерного излучения с веществом исследовались либо с помощью многомодового излучения (обычно неконтролируемой суперпозиции мод Эрмита–Гаусса (ЭГ)), либо гауссовых лазерных пучков (ТЕМ₀₀-мода). В последнее время возрастает интерес к использованию в этих целях лазерных пучков, имеющих кольцевую структуру интенсивности. Например, применение мощных беселевых пучков (особенно при лазерном пробое газов) показало, что управление параметрами образующейся плазмы может эффективно осуществляться вариацией не только длительности лазерного импульса, но и его пространственной структуры [1]. Другим примером является предсказание интересных явлений при вынужденном рассеянии Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ) вихревых лазерных пучков Лагерра – Гаусса (ЛГ), обозначаемых ЛГ_{pl} (где p, l – индексы мод) [2].

Следует отметить, что впервые идея применения кольцевых пучков для получения высокотемпературной плазмы высказывалась еще в 1964 г. [3]. Однако предложенный в [3] метод – экранирование осевой зоны лазерного пучка – в фокусе линзы в принципе не может дать кольцевого распределения интенсивности [4]. С появлением первых сообщений о возможности получения лазерных пучков ЛГ [5, 6] последовало и предложение об их применении при изучении взаимодействия сверхмощного излучения с плазмой [7]. Большинство выполненных к настоящему времени работ по взаимодействию с веществом пучков ЛГ ограничивается относительно малыми уровнями мощности, поскольку для получения данного типа излучения используются дифракционные методы [8–11], которые ограничены лучевой стойкостью применяемых в них эле-

ментов (как правило, пластиковых). В экспериментальных исследованиях ВРМБ пучка ЛГ₀₁ [12, 13], которые подтвердили выводы работы [2], мощность излучения была достаточно высокой, чтобы преодолеть порог ВРМБ. Для формирования моды ЛГ₀₁ здесь использовались спиральные фазовые пластины высокого качества [14, 15], изготовленные из плавленого кварца и обладающие высокой лучевой прочностью. Однако стоит отметить, что получение мощных пучков ЛГ_{pl} более высокого порядка, при $p + l > 1$, с использованием спиральной фазовой пластины достаточно проблематично.

В настоящей работе описана схема построения и параметры импульсной лазерной системы с мощностью более 2 МВт на длине волны излучения 1.05 мкм, впервые использующей для получения пучков ЛГ преобразование мод ЭГ с помощью перестраиваемого астигматического $\pi/2$ -конвертера [16].

2. Оптическая схема лазерной системы

Лазерная система включает в себя собственно лазерный излучатель и астигматический конвертер.

2.1. Лазерный излучатель

Лазерный излучатель (рис.1) построен по схеме задающий генератор (ЗГ) – двухпроходный лазерный уси-

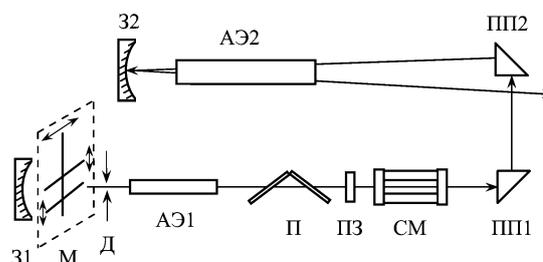


Рис.1. Оптическая схема излучателя: 31 – сферическое зеркало ЗГ ($R = 2$ м); М – маски; Д – ирисовая диафрагма; АЭ1 – активный элемент ЗГ; П – поляризатор; ПЗ – пассивный затвор; СМ – селектор продольных мод; ПП1, ПП2 – поворотные призмы; АЭ2 – активный элемент усилителя; 32 – оборачивающее сферическое зеркало двухпроходного усилителя ($R = 2$ м).

В.Х.Багдасаров, С.В.Гарнов, Н.Н.Денисов, А.А.Малютин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: amal@kapella.gpi.ru

Ю.В.Долгополов, А.В.Копалкин, Ф.А.Стариков. Российский Федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37

Поступила в редакцию 10 февраля 2009 г., после доработки – 12 мая 2009 г.

литель. Как ЗГ, так и усилитель используют в качестве активной среды фосфатное неодимовое стекло ГЛС-23. В первом активный элемент имеет диаметр 5 мм и длину 100 мм, во втором – 8 и 150 мм соответственно.

Оптическая схема ЗГ в основном повторяет описанную ранее в работе [17]. Исключение составляет система масок, служащих для селекции поперечных мод излучения. Замена одной из линейных масок на перекрестие позволила более надежно фиксировать нули мод ЭГ до TEM_{12} включительно.

Транспортировка пучка между ЗГ и усилителем осуществляется с помощью двух призм, а для организации двух проходов по усилителю и обеспечения плоского волнового фронта на входе в конвертер (см. ниже) применяется глухое сферическое зеркало радиусом 2 м. Использование этого зеркала в оптической схеме на рис.1 устраняет необходимость в дополнительной оптике для согласования размера лазерного пучка с параметрами конвертера и способствует уменьшению габаритов всей системы.

Для накачки активного элемента ЗГ применен осветитель с зеркальным моноблоком, что, как показано в [17], является принципиальным при получении устойчивой генерации лазера на модах ЭГ. Аналогичный моноблок применен в осветителе накачки активного элемента усилителя.

Система питания ламп накачки ЗГ и усилителя использует блоки PS 701AT с накопительными конденсаторами емкостью 100 и 200 мкф соответственно.

2.2. Астигматический конвертер

В отличие от $\pi/2$ -конвертера без компенсации седлообразного волнового фронта мод ЛГ [18] предыдущей работы [17] в настоящей работе использовался астигматический конвертер, построенный по схеме, принцип действия которой подробно описан в [16]. Он состоит из двух одинаковых оптико-механических блоков (ОБ1 и ОБ2), каждый из которых включает в себя положительную и отрицательную цилиндрические линзы с одинаковым фокусным расстоянием ($|F| \sim 80$ см) и положительную сферическую линзу ($f = 80$ см). Конструкция каждого блока имеет возможность синхронного поворота установленных в нем цилиндрических линз в противоположных направлениях вокруг оптической оси конвертера, что обеспечивает его перестройку. В исходном положении оптические силы цилиндрических линз полностью компенсируют друг друга и их оси совпадают с главными осями распределения интенсивности моды излучателя. Расстояние между блоками фиксировано так, что сферические линзы находятся на расстоянии f друг от друга и образуют оптический фурье-преобразователь.

При плоском волновом фронте моды ЭГ, который формируется на входе в конвертер зеркалом 32 (рис.1), поворот цилиндрических линз ОБ1 обеспечивает согласование конвертера с параметрами лазерного пучка. Компенсация же кривизны волновых фронтов на выходе из конвертера осуществляется поворотом цилиндрических линз ОБ2. При этом распространение лазерного пучка после конвертера происходит без искажения распределения излучения мод ЛГ. Расчетные зависимости радиуса лазерного пучка $w(z)$ и кривизны его волнового фронта $\rho(z)$ на различных расстояниях от выходного элемента ЗГ приведены на рис.2,а. Изломы кривых и точки разрыва $\rho(z)$ соответствуют границам оптических элемен-

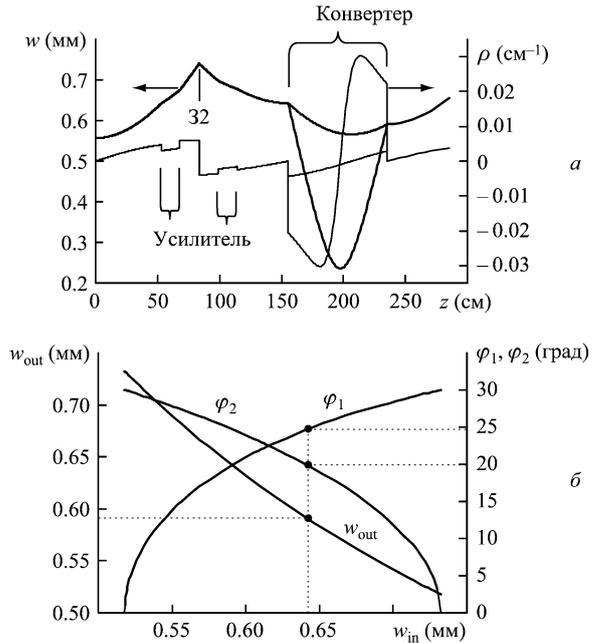


Рис.2. Расчетные радиусы лазерного пучка w (жирная кривая) и кривизны его волнового фронта ρ (тонкая кривая) на различных расстояниях от выходного элемента ЗГ (а) и диаграмма перестройки конвертера (б).

тов. Изменения $w(z)$ и $\rho(z)$ в пространстве между блоками линз конвертера в плоскостях $x = y$ и $-x = y$ показаны соответственно двумя кривыми. Радиусы лазерного пучка w на входе и выходе в конвертер, а также углы $\varphi_{1,2}$ ориентации цилиндрических линз в ОБ1 и ОБ2 обозначены точками на диаграмме перестройки конвертера (рис.2,б). При указанных выше параметрах линз конвертера радиус пучка на его входе может лежать в диапазоне $w_{in} = 0.52 - 0.73$ мм.

3. Параметры излучения

Как отмечено выше, маски, установленные в резонаторе ЗГ, позволяют фиксировать нули всех мод вплоть до TEM_{12} . Моды более высокого порядка (TEM_{13} , TEM_{14}) также были получены в экспериментах, но уже без фиксации положения всех нулей поля, вследствие чего в процессе работы наблюдалось самопроизвольное изменение их структуры (например, переход от моды TEM_{13} к TEM_{14}).

Энергия излучения на выходе ЗГ в зависимости от типа моды ЭГ составила 18–30 мДж при пороговой энергии накачки 50–75 Дж. Длительность импульса генерации

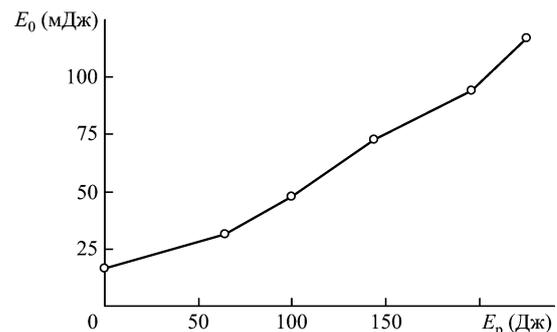


Рис.3. Зависимость выходной энергии лазерной системы E_0 от энергии накачки усилителя E_p на выходе конвертера мод (мода TEM_{12}).

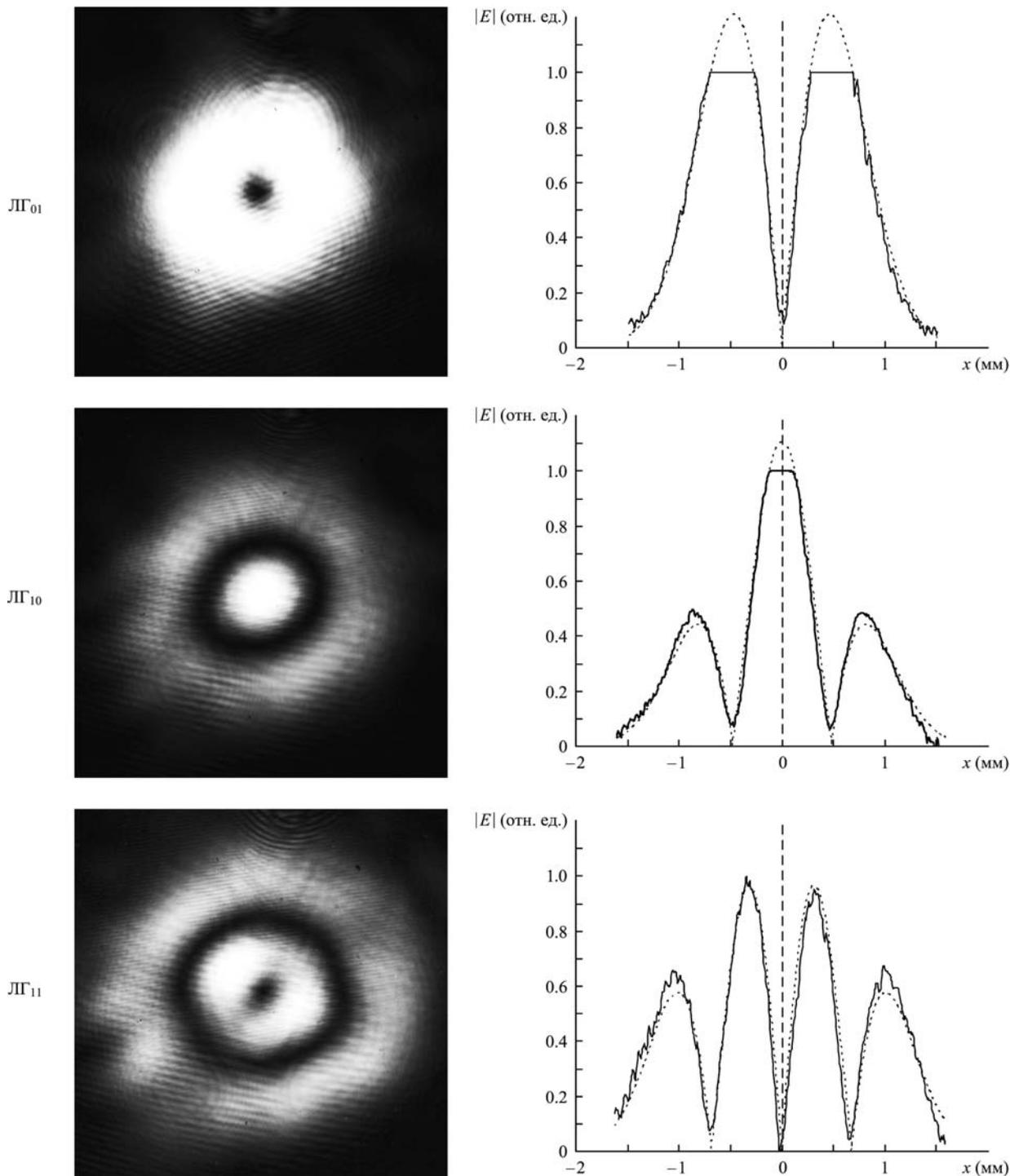


Рис.4. Распределения амплитуды поля мод ЛГ на расстоянии 75 см от конвертера (фотографии) и соответствующие результаты их обработки: сплошные линии – эксперимент, пунктирные линии – теоретические распределения.

была 40 ± 1 нс. Энергия излучения на выходе конвертера при генерации моды TEM_{12} и ее конверсии в соответствующую моду ЛГ для различных уровней накачки усилителя приведена на рис.3.

Некоторые из полученных распределений поля мод ЛГ на расстоянии 75 см от ОБ2 конвертера даны на рис.4 (графики экспериментальных кривых построены при усреднении по сечениям в плоскостях $x = 0$, $y = 0$, $x = y$ и $-x = y$). Измеренные значения радиуса пучка $w = 0.68 \pm 0.04$ мм соответствуют расчетной величине рис.2,а. Распреде-

ние для моды LG_{01} получено со значительным насыщением сенсора матричного фотоприемника и демонстрирует достаточно низкий уровень нуля поля $|E(0)|$. Оценка отношения $|E(0)/E_{\max}|$ дает для моды LG_{01} значение ~ 0.03 , т.е. менее 10^{-3} по интенсивности, что свидетельствует о достаточно малом вкладе мод четного порядка. Качество излучения мод LG_{10} и LG_{11} несколько хуже – оцененные отношения интенсивности в кольцевом минимуме к максимальному значению равны $\sim 2 \times 10^{-3}$ и $\sim 4 \times 10^{-3}$ соответственно.

4. Заключение

Описанная в настоящей работе лазерная система позволяет контролируемым образом генерировать моды Лагерра–Гаусса до третьего порядка включительно с выходной энергией до 100 мДж, что при длительности импульса 40 нс соответствует пиковой мощности более 2 МВт. Этот уровень мощности и полученное качество излучения достаточны для проведения различных экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с веществом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-02-01454).

1. Бычков С.С., Горлов С.В., Марголин Л.Я. и др. *Квантовая электроника*, **26**, 229 (1999).
2. Starikov F.A., Kochemasov G.G. *Opt. Commun.*, **170**, 161 (1999).
3. Аскарьян Г.А. *Письма в ЖЭТФ*, **10**, 392 (1964).
4. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973, гл. 8).
5. Abramockin E., Volostnikov V. *Opt. Commun.*, **83**, 123 (1991).
6. Beijersbergen M.W., Allen L., van der Veen H.E.L.O., Woerdman J.P. *Opt. Commun.*, **96**, 123 (1993).
7. Саркисов Г.С., Быченков В.Ю., Тихончук В.Т. *Письма в ЖЭТФ*, **69**, 20 (1999).
8. Heckenberg N.R., McDuff R., Smith C.P., White A.G. *Opt. Lett.*, **17**, 221 (1992).
9. Curtis J.E., Koss B.A., Grier D.G. *Opt. Commun.*, **207**, 169 (2002).
10. Ganic D., Gan X., Gu M., Hain M., et al. *Opt. Lett.*, **27**, 1351 (2002).
11. Zhang D.W., Yuan X.-C. *Opt. Lett.*, **28**, 740 (2003).
12. Starikov F.A., Dolgoplov Yu.V., Kopalkin A.V., et al. *J. Phys. IV*, **133**, 683 (2006).
13. Стариков Ф.А., в сб. *Нелинейные волны 2006* (Н.Новгород: изд-во ИПФ РАН, 2007, с. 206).
14. Starikov F.A., Atuchin V.V., Dolgoplov Yu.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5572**, 400 (2005).
15. Starikov F.A., Kochemasov G.G., Kulikov S.M., et al. *Opt. Lett.*, **32**, 2291 (2007).
16. Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **36**, 76 (2006).
17. Малютин А.А., Ильохин В.А. *Квантовая электроника*, **37**, 181 (2007).
18. Малютин А.А. *Квантовая электроника*, **33**, 1015 (2003).