

Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3.3 кДж и длительностью 4 нс

С.Г.Гаранин, А.И.Зарецкий, Р.И.Илькаев, Г.А.Кириллов,
Г.Г.Кочемасов, Р.Ф.Курунов, В.М.Муругов, С.А.Сухарев

Исследовано усиление слабых лазерных импульсов с энергией 80–240 мДж, длительностью 4 нс и коэффициентом усиления 0.035–0.045 см⁻¹. Получена максимальная энергия 3.3 кДж при длительности импульса 4 нс.

Ключевые слова: лазер на неодимовом фосфатном стекле, дисковый элемент, линейный коэффициент усиления, энергия излучения.

Основным элементом мощных лазерных установок NIF [1], LMJ [2], «Искра-6» [3], создаваемых для исследований физических принципов работы лазерных термоядерных мишеней, являются многопроходные силовые усилители на дисковых элементах из неодимового фосфатного стекла. Предельная выходная лазерная энергия в этих установках определяется выбором оптимальных параметров всех систем усилительного тракта, включая лучевую прочность оптических элементов, значением В-интеграла, коэффициентом усиления слабого сигнала g_0 и др. При этом достигнутая средняя плотность выходной энергии ε_{out} оптимизированных лазерных каналов составляет ~ 10 Дж/см² при длительности импульса $\sim 3–5$ нс (см., напр., [4]).

Для оптимизации лазерных систем многоканальных установок [1–3] в лазерных центрах создаются макеты усилительных модулей [5–7]. В России во ВНИИЭФ создана четырёхканальная установка «Луч» [7] для проверки и отработки научно-технических решений, ключевых для установки «Искра-6», имеющей следующие параметры: суммарная энергия 300 кДж, длина волны 0.351 мкм, длительность импульса 3–5 нс.

В настоящей работе приведены результаты исследований, направленных на оптимизацию всех систем лазерного канала установки «Луч» с целью получения предельной лазерной энергии [8]. Четырёхпроходный усилительный тракт установки «Луч» (рис.1) включает в себя два силовых усилителя 1 и 2, разделенных кюветным пространственным фильтром. Ввод излучения в усилительный тракт, возврат его для третьего прохода и вывод после четвёртого прохода осуществляются через транспортный пространственный фильтр. В фокальной плоскости линз обоих пространственных фильтров расположены диафрагмы с четырьмя отверстиями. Лазерный пучок проходит через своё отверстие на каждом из четырёх про-

ходов. Каждый из силовых усилителей 1 и 2 состоит из девяти унифицированных модулей, изображенных на рис.2, с единой для четырех каналов системой ламповой накачки. Прямоугольные дисковые элементы изготовлены из неодимового фосфатного стекла КГСС 0180 [9].

Расчётные исследования показывают [3], что для получения средней плотности выходной энергии $\varepsilon_{\text{out}} \sim 10$ Дж/см² в данной схеме требуется коэффициент усиления $g_0 \approx 0.04–0.05$ см⁻¹. В [10,11] приведены экспериментальная методика и результаты измерений коэффициента g_0 на установке «Луч». Эти исследования показали, что конструкция силовых усилителей даёт возможность получать в штатном режиме $g_0 \approx 0.05$ см⁻¹. Другим условием достижения предельной выходной лазерной энергии является выбор пассивных и активных оптических элементов усилительного тракта с требуемой лучевой прочностью. Специальные экспериментальные исследования, проведённые на стендах РФЯЦ – ВНИИЭФ и НИИКИ ОЭП (г. Сосновый Бор) [12], показали (табл.1), что лучевая прочность практически всех элементов позволяет изучать усиление лазерного импульса без разрушений в номинальном режиме. Исключения составляют входная и выходная линзы транспортного фильтра, у которых порог разрушения просветляющих покрытий близок к рабочей нагрузке ~ 10 Дж/см².

В разрабатываемых крупномасштабных лазерных установках на неодимовом стекле принципиальное значение имеет минимизация статических и термоиндуцированных aberrаций волнового фронта, которая обуславливает получение высоких плотностей энергии лазерного излучения на мишени. С другой стороны, снижение расходимости излучения позволяет оптимизировать диаметры диафрагм пространственных фильтров с целью уменьшения порога самофокусировки. В [13] представлены результаты экспериментальных исследований, целью которых являлось уменьшение aberrаций волнового фронта и расходимости излучения на установке «Луч». Эти эксперименты позволили снизить расходимость излучения в два раза ($\theta_{0.8} \approx 2 \times 10^{-4}$ рад), что, в свою очередь, привело к уменьшению диаметра диафрагмы от 2.5 до 1.5 мм при фокусном расстоянии линз пространственного фильтра 7 м.

На рис.3 и 4 приведены пространственные распределения интенсивности лазерного излучения до и после

С.Г.Гаранин, А.И.Зарецкий, Р.И.Илькаев, Г.А.Кириллов, Г.Г.Кочемасов, Р.Ф.Курунов, В.М.Муругов, С.А.Сухарев. Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ, Россия, 607190 Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37; e-mail: zaretski@otd13.vniief.ru
Р.Ф.Курунов. ФГУП «НИИЭФА им. Д.В.Ефремова», Россия, 189631 С.-Петербург, пос. Металлострой, 3; e-mail: kurunrf@mit.niief.spb.su

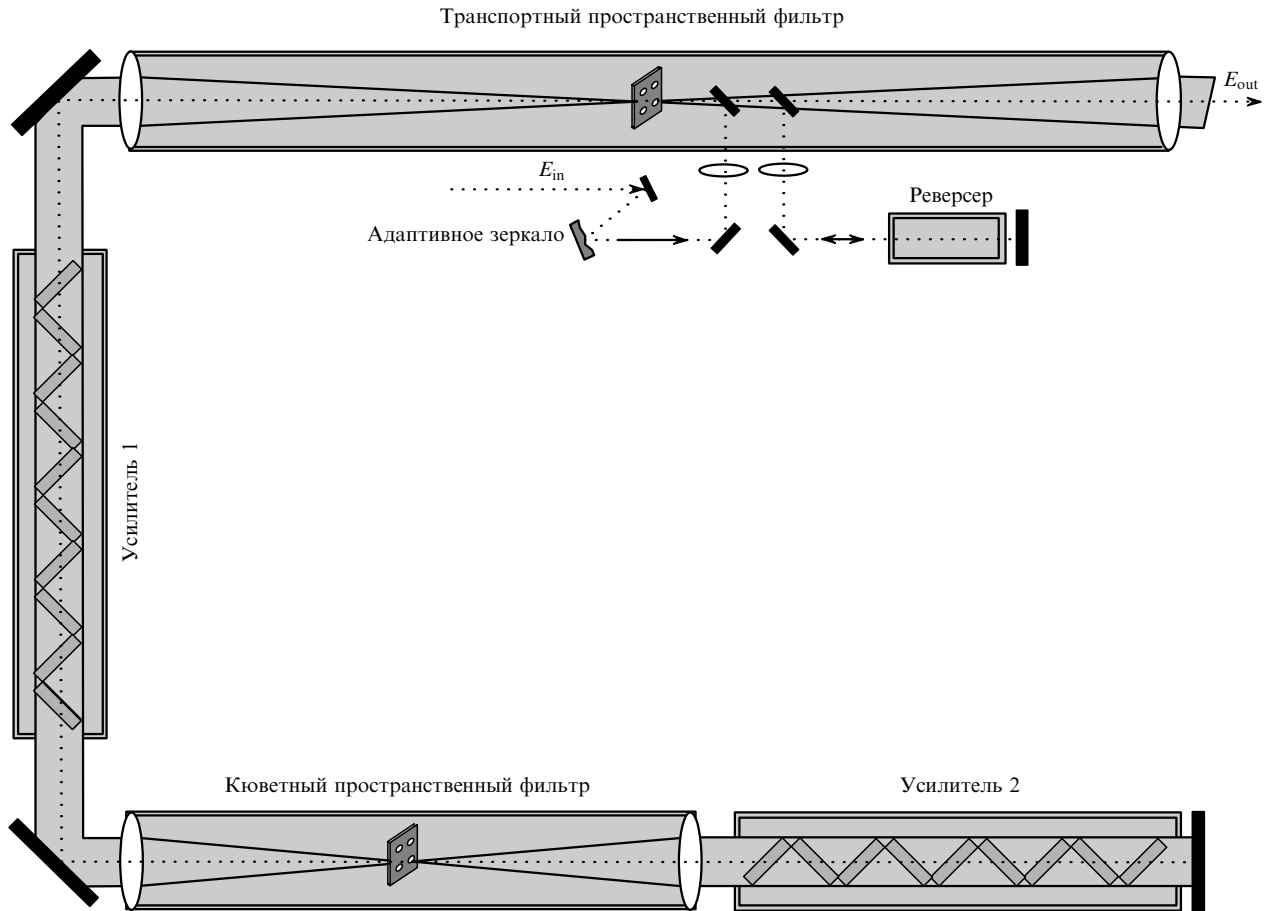


Рис.1. Схема установки «Луч».

оптимизации соответственно, которые иллюстрируют снижение мелкомасштабной модуляции интенсивности в ~ 3.5 раза.

На рис.5 представлены результаты расчетов усиления импульса в канале установки. В расчетах учитывались пассивные потери в дисковых элементах, окнах усилителей и линзах пространственных фильтров, коэффициен-

ты отражения зеркал, коэффициент пропускания тракта реверсера. В соответствии с результатами экспериментальных измерений пропускание тракта усилителя на четверть проходах в отсутствие накачки и при пустом реверсере составляло 10%. Нелинейный показатель преломления n_2 , используемый при расчете В-интегралов, был взят равным 1.05×10^{-13} ед. СГСЭ. Эффективная площадь апертуры пучка составляла 320 см^2 (80% от 20×20

Табл.1. Результаты испытаний на лучевую прочность оптических элементов, разработанных для установки «Луч» (длительность лазерного импульса $\tau_{0,5} = 3 \text{ нс}$).

Объект испытаний	Порог разрушения (Дж/см ²)	Рабочая нагрузка (Дж/см ²)
Выходная поверхность стекла К8	29–32	10
Объём кристалла КДР	26	10
Выходная поверхность кристалла КДР	27	10
Диэлектрические зеркала*	8–10	1–4
Диэлектрические просветляющие покрытия	6–8	1–4
Выходная поверхность стекла КГСС 0180 (дисковый элемент)	26 ± 5	до 10
Рабочая поверхность адаптивного зеркала	5–8	0.1

*Проведённые в настоящее время испытания диэлектрических зеркал производства НИИ НПО «Луч» показали, что их лучевая прочность соответствует прочности стекла К8.

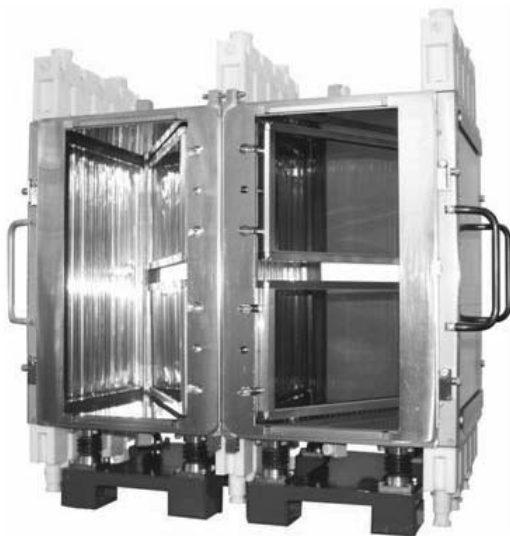


Рис.2. Фотография унифицированного четырёхканального усилительного модуля с дисковыми элементами, лампами накачки, отражателями и защитными стеклами.

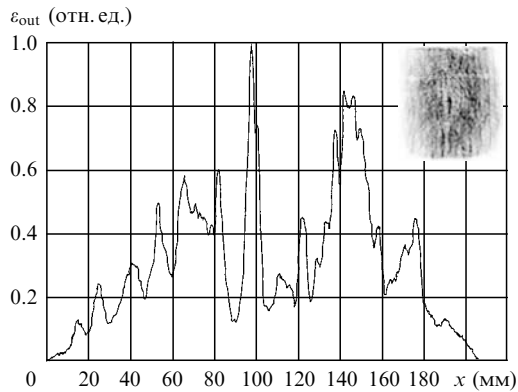


Рис.3. Ближняя зона (на вставке) и распределение плотности энергии лазерного излучения по горизонтальному сечению пучка до оптимизации.

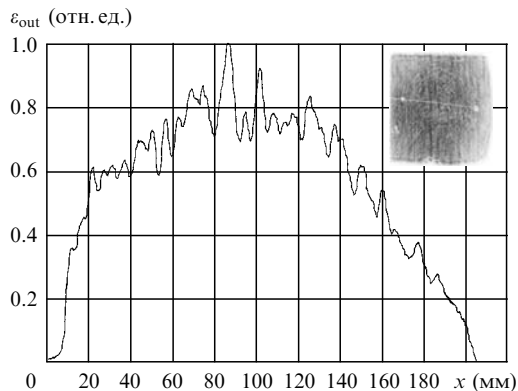


Рис.4. Ближняя зона (на вставке) и распределение плотности энергии лазерного излучения по горизонтальному сечению пучка после оптимизации.

= 400 см²). Расчёт основывается на балансном приближении, в котором используется эффективная плотность энергии насыщения 4.7 Дж/см². Это значение было выбрано в соответствии с экспериментальными измерениями данной величины для американского стекла LG-750, аналогичного по составу стеклу КГСС 180/35 [4].

Для регистрации энергии излучения на выходе канала применялись пирокалориметры Molectron J25 и Gentec ED-200. Вывод информации осуществлялся на измерители энергии и мощности Molectron EPM 1000 и Gentec DUO соответственно. Для регистрации излучения в дальней и ближней зонах использовались 12-битные CCD-камеры СИР-05-М фирмы «Электрон-М» с размером матрицы 18.56 × 16.64 мм (размер пикселя 16 × 16 мкм) и динамическим диапазоном 500.

На рис.5 приведены также экспериментальные данные по усилению импульса ($\tau_{0,5} = 4$ нс) для низких значений линейного коэффициента усиления ($g_0 = 0.035$ и 0.040 см⁻¹) при энергии входного сигнала 80–240 мДж. Видно, что экспериментальные данные согласуются с расчетной зависимостью и в исследуемом диапазоне входных энергий выходная энергия не превышала ~2.3 кДж.

Для получения проектных значений энергии в канале (~3–4 кДж) проведены эксперименты по усилению сигнала при $g_0 = 0.045$ см⁻¹ [11]. При энергии входного сигнала 20 и 50 мДж получена выходная энергия канала 2.1 и 3.3 кДж соответственно, при этом экспериментальные

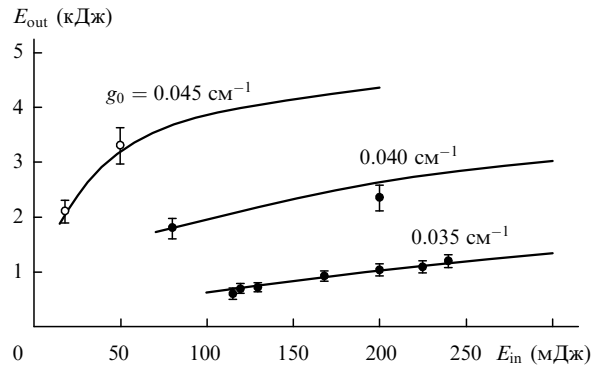


Рис.5. Зависимости энергии излучения E_{out} на выходе канала установки «Луч» от энергии на входе E_{in} при различных линейных коэффициентах усиления g_0 (кривые – расчет, точки – эксперимент).

результаты удовлетворительно согласуются с расчетной зависимостью (см. рис.5). Длительность импульса излучения на выходе установки $\tau_{0,5} \approx 4$ нс. Распределение плотности излучения по сечению пучка имеет «спекловую» структуру, характерную для мощных неодимовых установок, работающих вблизи порога самофокусировки [4, 14], и обусловлено нелинейным ростом мелкомасштабных возмущений в процессе усиления из-за нелинейности показателя преломления, недостаточной угловой фильтрации и рассеяния на оптических элементах в усилительном канале.

Таким образом, на установке «Луч» в результате исследований угловой селекции излучения, введения адаптивной системы и повышении эффективности накачки дисковых элементов получена энергия в усилительном канале 3.3 кДж (для коэффициента усиления $g_0 = 0.045$ см⁻¹ и входной энергии 50 мДж) при длительности импульса излучения $\tau_{0,5} = 4$ нс и расходимости $\theta_{0,8} = 2 \times 10^{-4}$ рад.

1. LLNL. ICF Quarterly Report. Special Issue: National Ignition Facility (Virginia: Springfield, 1997, v. 7, No. 3).
2. Andre M.L. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **3047**, 38 (1997).
3. Galakhov I.V., Garanin S.G., Eroshenko V.A., et al. Fusion Engineering and Design, **44**, 51 (1999).
4. Pennington D.M., Milam D., Eimerl D. Report at the II Annual Int. Conf. «Solid-State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion (ICF)» (Paris, 1996, p. 17).
5. Erlandson A.C., Marshall C., Rotter M., et al. LLNL. ICF Quarterly Report-1 (Livermore, Cal, USA, 1999, pp 99–104).
6. Andre M.L. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **3047**, 38 (1997).
7. Безнасюк Н.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г. и др. В сб.: IV Харитоновские тематические научные чтения (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2002, с. 82).
8. Боднар Ю.М., Воронич И.Н., Гаранин С.Г. и др. Тезисы докл. XXXII Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС (Звенигород, 2005, с. 185).
9. Арбузов В.И., Вахмянин К.П., Вольнкин В.М. и др. Оптический журн., **69** (1), 16 (2001).
10. Воронич И.Н., Галахов И.В., Гаранин С.Г. и др. Квантовая электроника, **33** (6), 485 (2003).
11. Воронич И.Н., Гаранин С.Г., Зарецкий А.И. и др. Квантовая электроника, **34** (6), 509 (2004).
12. Арбузов В.И., Вольнкин В.М., Лунтер С.Г. и др. Оптический журн., **70** (5), 68 (2003).
13. Воронич И.Н., Гаранин С.Г., Зарецкий А.И. и др. Квантовая электроника, **35** (2), 140 (2005).
14. Van Wonerghrem B.M., Murray J.R., Campbell J.H., et al. LLNL. ICF Quarterly Report (Livermore, Cal, USA, 1995, v. 5, No. 1, pp 1–17).