

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

*Маринин Алексей Андреевич (oefimova@otd13.vniief.ru), Деркач Владимир Николаевич,
Зималин Борис Геннадьевич, Кузин Максим Геннадьевич, Романова Виктория Юрьевна*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В данной работе представлены основные результаты модернизации штатной системы формирования опорного излучения (СФОИ) лазерной установки «Луч», в составе которой исследован и выведен на рабочий режим новый задающий генератор на кристалле YLF:Nd, с активной модуляцией добротности, обладающий более стабильной выходной энергией (разброс за 50 выстрелов $\leq 5\%$). Показана возможность управления временной формой лазерного импульса на выходе модернизированной СФОИ, в частности на выходе лазерного канала установки «Луч» получен импульс с энергией $E_{1\omega} \approx 1$ кДж, длительностью $\tau_{0,5-1\omega} \approx 4$ нс, с временной формой близкой к прямоугольной.

Ключевые слова: задающий генератор, активная среда YLF:Nd, активная модуляция добротности, ячейка Поккельса, временная форма импульса, силовой тракт.

MODERNIZED REFERENCE BEAM FORMING SYSTEM OF THE «LUCH» LASER FACILITY

*Marinin Alexey Andreievich (oefimova@otd13.vniief.ru), Derkach Vladimir Nikolaievich,
Zimalin Boris Gennadievich, Kuzin Maxim Gennadievich, Romanova Victoria Yuryevna*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

This paper presents the main results of modernization of the standard reference beam forming system of the laser facility «Luch». A new active Q-switched YLF:Nd master oscillator with more stable output energy (jitter is $\leq 5\%$ over 50 shots) has been explored and put into operation. A possibility to control the temporal shape of a laser pulse at the forming system output is demonstrated. In particular, a quasi flat-top laser pulse with the energy $E_{1\omega} \approx 1$ kJ and duration $\tau_{0,5-1\omega} \approx 4$ ns has been obtained at the output of the amplifier channel of «Luch» facility.

Key words: master oscillator, YLF:Nd active medium, active Q-switching, Pockels cell, temporal pulse shape, power channel.

Введение

В ряде ведущих лабораторий мира в настоящее время создаются и успешно применяются мощные лазерные установки на неодимовом фосфатном стекле наносекундной длительности импульса [1, 2]. Одним из приоритетных направлений данных установок является исследование процессов, возникающих при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом. В институте лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ с 2002 года также действует лазерная установка «Луч», на которой

совместно проводятся экспериментальные исследования по отработке новых технических решений для многоканальной лазерной установки нового поколения и облучению мишеней различных типов [3]. Установка «Луч» построена по принципу усиления относительно слабого лазерного импульса с энергией \sim мДж в двух четырехпроходных усилителях с дисковыми активными элементами из неодимового фосфатного стекла. Излучение с заданными пространственными, временными и спектральными характеристиками создается в СФОИ [4] и инжектируется на вход главных усилителей.

Формирование заданных условий облучения мишеней и их стабилизация от опыта к опыту во многом зависит от стабильности энергии лазерного импульса непосредственно на выходе задающего генератора. Задающий генератор, действующий в тракте СФОИ с 2001 года, работает по принципу пассивной модуляции добротности с применением модулятора на основе кристалла LiF [5]. Выполненная из неодимового фосфатного стекла активная среда задающего генератора обладает достаточно широкой (≈ 20 нм) спектральной полосой люминесценции, что создает значительные трудности при спектральной селекции генерируемого излучения. Совокупность перечисленных технических особенностей штатного задающего генератора часто приводила к сильной (≈ 30 %) нестабильности энергии излучения. Помимо этого, режим пассивной модуляции добротности, приводит к тому, что временной разброс момента генерации гигантского импульса относительно начала накачки активной среды составляет 1–2 мкс, поэтому последующая система временного профилирования не могла быть синхронизована электрически и выполнена на основе лазерного разрядника, срабатывающего по приходу лазерного импульса. Моноимпульсный режим работы задающего генератора с интервалом срабатывания ≥ 1 минуты усложняет процесс юстировки. С целью устранения вышеперечисленных недостатков в состав СФОИ установки «Луч» введен новый задающий генератор, выполненный на кристалле YLF:Nd с диодной накачкой, работающий в режиме активной модуляции добротности [6].

Задающий генератор с активным элементом YLF:Nd

Задающий генератор (ЗГ) представляет собой плоскопараллельный резонатор с активным элементом на кристалле YLF:Nd и диодной накачкой. Оптическая схема задающего генератора представлена на рис. 1.

Один из торцов активного элемента YLF:Nd диаметром 5 мм и длиной 10 мм выполнен в виде зеркала и вместе с выходным зеркалом 31, имеющим коэффициент отражения $R = 70$ %, образует линейный резонатор длиной 15 см. Накачка активного элемента осуществляется матрицей лазерных диодов ЛД, рис. 1. Излучение накачки $\lambda = 795\text{--}799$ нм с помощью линзы Л фокусируется в объеме активного элемента. Селекция продольных мод обеспечивается эталоном Фабри-Перро ФП с базой 10 мм. Коэффициент отражения каждого зеркала составляет $R = 36$ %. Ячейка Поккельса ЯП1 на кристалле DKDP (степень дейтерирования кристалла более 95 %, длина 16 мм, диаметр 8 мм) и запускающий ее фотодиод ФД, на который подается лазерный импульс свободной генерации, обеспечивают режим модуляции добротности. На выходе ЗГ формируется лазерный импульс энергией ≈ 1 мДж при длительности $\tau_{0,5} \approx 15$ нс на длине волны излучения 1053 нм.

Исследована стабильности энергии излучения на выходе ЗГ, работающего с частотой 1 Гц в шести сериях измерения энергии (см. табл. 1).

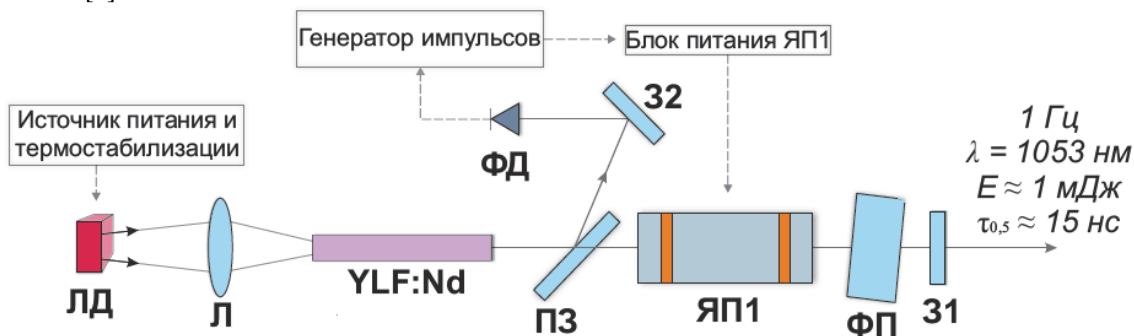


Рис. 1. Оптическая схема задающего генератора: ЛД – матрица лазерных диодов, Л – линза ($f = 2$ см), ПЗ – поляризационное зеркало, ЯП1 – ячейка Поккельса, ФП – эталон Фабри-Перро, 31, 32 – зеркала, ФД – фотодиод

Таблица 1

Результаты исследования стабильности энергии на выходе ЗГ

| № серии | $E_{\text{мин.}}$, мкДж | $E_{\text{макс.}}$, мкДж | $E_{\text{средн.}}$, мкДж | Еско, мкДж (%) |
|----------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|
| непрогретый ЗГ | | | | |
| 1 | 764 | 858 | 800 | 23 (2,9) |
| 2 | 824 | 877 | 849 | 14 (1,6) |
| 3 | 834 | 897 | 862 | 16 (1,9) |
| прогретый ЗГ | | | | |
| 4 | 857 | 900 | 881 | 11 (1,2) |
| 5 | 858 | 901 | 880 | 12 (1,4) |
| 6 | 855 | 908 | 882 | 13 (1,5) |

Каждая серия включала в себя 50 срабатываний. Перерыв между сериями составлял ≈ 1 мин. Среднее квадратичное отклонение энергии излучения во всех сериях измерений составляет не более 3 % от среднего значения. Следует отметить, что время выхода энергии излучения на стационарный режим составляет ≈ 30 мин, то есть перед началом работы необходимо получасовой прогрев ЗГ.

Система временного профилирования

Длительность лазерного импульса на выходе ЗГ составляет ≈ 15 нс, что не соответствует требованию технического задания к длительности импульса установки «Луч» (от 3 до 5 нс). С целью формирования лазерного импульса с управляемой временной

формой и регулируемой длительностью, разработана оптоэлектронная система временного профилирования, состоящая из двух ячеек Поккельса, расположенных между тремя попарно скрещенными призмами Глана. Управление ячейками Поккельса осуществляется специальными высоковольтными блоками питания. Синхронизация совместной работы ЗГ и блоков питания ячеек Поккельса осуществляется генератором импульсов. Моментом запуска ЗГ управляет электрический сигнала с фотодиода, на который подается лазерный импульс свободной генерации ЗГ.

На рис. 2 представлены возможные варианты временных форм лазерного импульса, полученные на выходе системы временного профилирования.

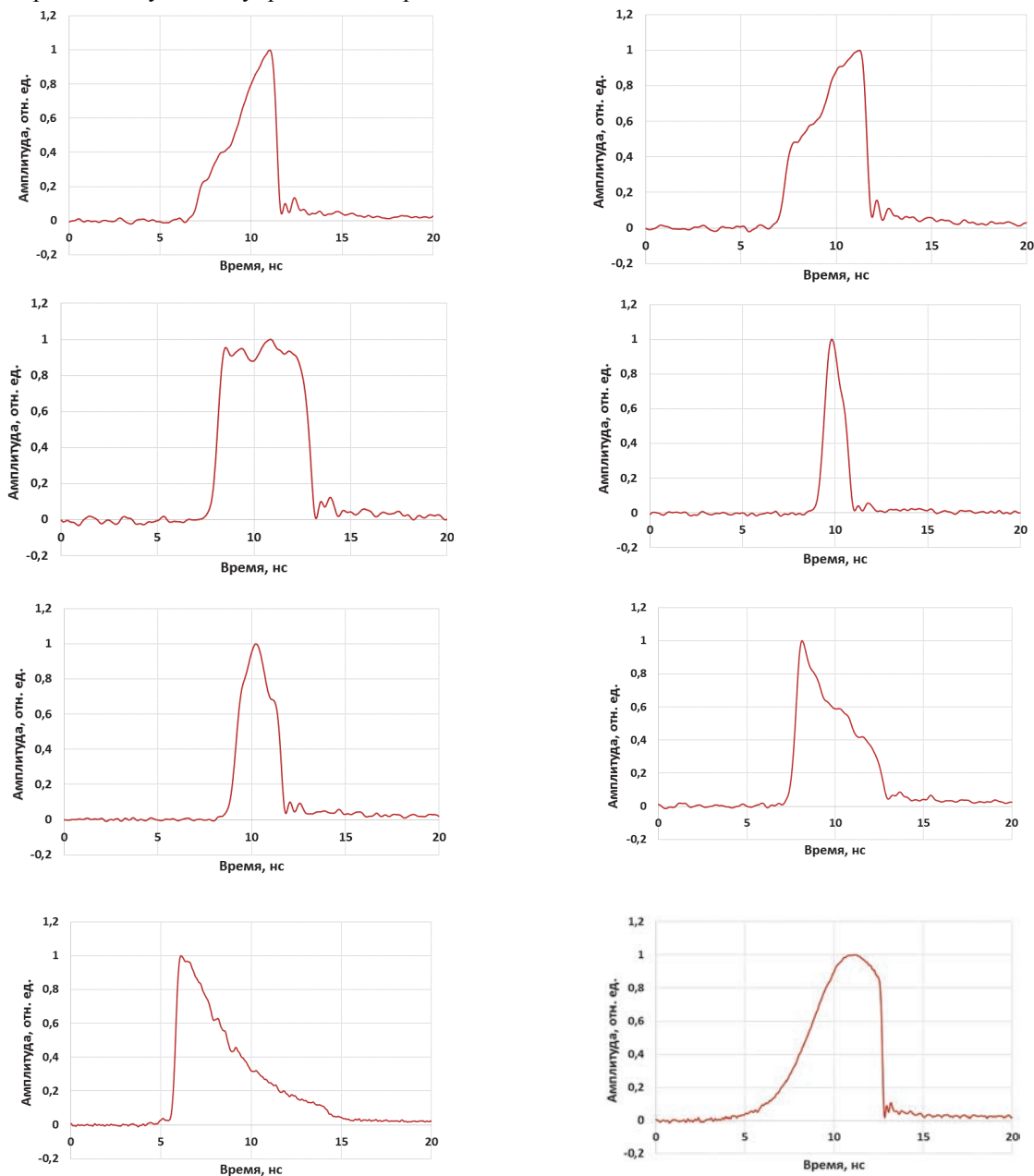


Рис. 2. Временные формы лазерного импульса на выходе системы временного профилирования

Внедрение нового задающего генератора в штатную схему СФОИ

Исследования параметров лазерного импульса на выходе системы временного профилирования показали, что в зависимости от временной формы энергия импульса меняется в диапазоне от 30 до 70 мкДж, при этом диаметр пучка в ближней зоне по уровню $1/e^2$ составляет $\approx 2,7$ мм. С целью минимальной модификации оптической схемы СФОИ, представленной на рис. 3, при внедрении нового задающего генератора, предложено воспроизвести в плоскости апертурной диафрагмы D_{A-2} пучок с пространственно-энергетическими параметрами ($E = 6-22$ мДж, $D_{1/e^2} = 4,6$ мм), формируемыми при работе со штатным задающим генератором. Это потребовало разработки системы предусиления и системы согласования пространственных параметров излучения.

В качестве усилителя ПУ, рис. 3, используется двухламповый квантрон с активным элементом из кристалла YLF:Nd диаметром 6 мм и длиной 100 мм. Коэффициент усиления за проход до $K_0 \approx 65$. В

штатной схеме СФОИ формирование пространственного профиля пучка в плоскости диафрагмы D_{A-2} осуществлялось пропусканием пучка через апертурную квадратную диафрагму D_{A-1} и пространственный фильтр ПФ-1. Аналогичную систему предварительного пространственного профилирования пучка предложено установить непосредственно на выходе системы временного профилирования нового задающего генератора. Сначала необходимо перестроить плоскость апертурной диафрагмы D_A , посредством пространственного фильтра ПФ, на входной торец активного элемента ПУ с предельным для данного усилителя размером, а затем дополнить схему уширяющим телескопом Т, осуществляющим ретрансляцию и увеличение изображения пучка на вход диафрагмы D_{A-2} .

Исходя из этого в программе Fresnel проведено моделирование схемы формирования пространственного профиля лазерного импульса для нового задающего генератора. Расчетная модель схемы представлена на рис. 4.

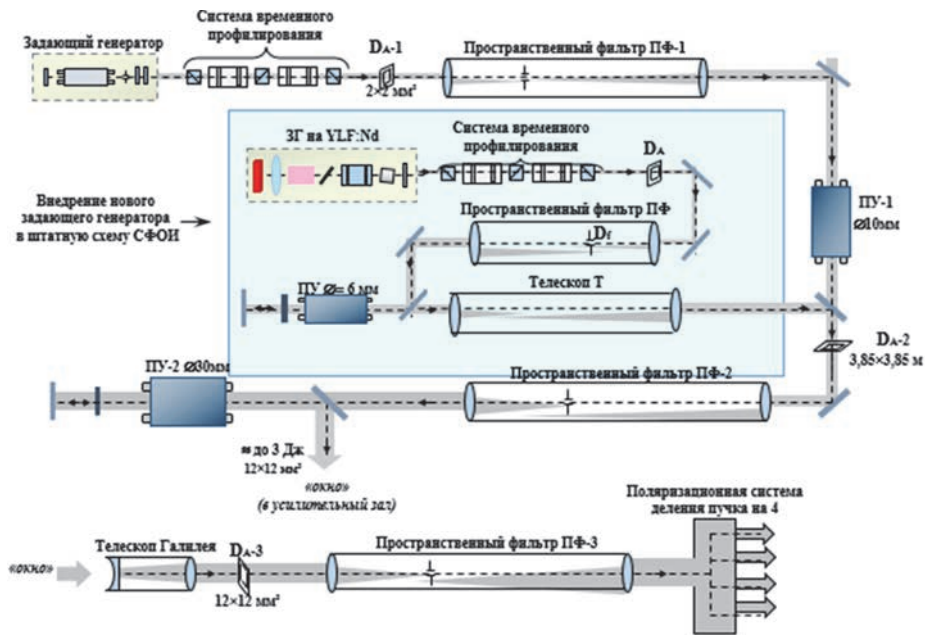


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема модернизированной СФОИ: D_A-D_{A-3} – апертурные диафрагмы, D_f – селектирующая диафрагма, ПУ – предусилители

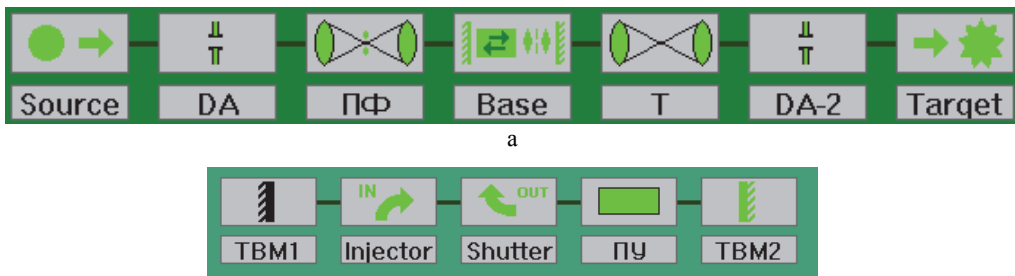


Рис. 4. Модель схемы пространственного профилирования лазерного импульса ЗГ: а – общая схема: D_A, D_{A-2} – апертурные диафрагмы, ПФ – пространственный фильтр, Т – уширяющий телескоп, ПУ – усилитель на YLF:Nd; б – содержание элемента BASE MPA

В результате проведенных расчетов определены оптимальные параметры оптических элементов схемы, рис. 3: размер апертурной диафрагмы $D_A = 1,8 \times 1,8$ мм; фокусные расстояния линз $f_1 = 40$ см, $f_2 = 75$ см и размер селективной диафрагмы $D_f = 0,6 \times 0,6$ мм (что соответствует углу селекции $\Theta_{\text{сел}} = 1,3 \cdot \Theta_{\text{дифф}}$) пространственного фильтра ПФ и фокусные расстояния линз $f_3 = 75$ см, $f_4 = 100$ см телескопа Т. На рис. 5 представлено расчетное и экспериментальное распределение интенсивности формируемое на входе апертурной диафрагмы D_{A-2} штатной схемы СФОИ при работе с новым ЗГ.

Исследования энергии на входе диафрагмы D_{A-2} , показали, что в зависимости от энергии накачки предусилителя ПУ и временной формы лазерного импульса, возможно получение пучка с энергией до ≈ 24 мДж.

Экспериментальные исследования параметров лазерного импульса на выходе СФОИ

Проведены исследования параметров лазерного импульса на выходе СФОИ с новым задающим генератором и двумя каскадами предусиления. Зарядные напряжения на предусилителях ПУ и ПУ-2, рис. 3, устанавливались 1,35 кВ и 1,7 кВ соответственно и подбирались таким образом, чтобы энергия лазерного импульса на выходе СФОИ соответствовала наиболее часто применяемому значению энергии (от 100 до 120 мДж) в полномасштабных экспериментах. Согласно полученным результатам, за 7 проведенных опытов при одинаковых условиях среднее значение энергии лазерного импульса составило 108 мДж, а разброс энергии ≈ 10 %. На рис. 6 представлены временные формы лазерного импульса, зарегистрированные в одном из опытов.

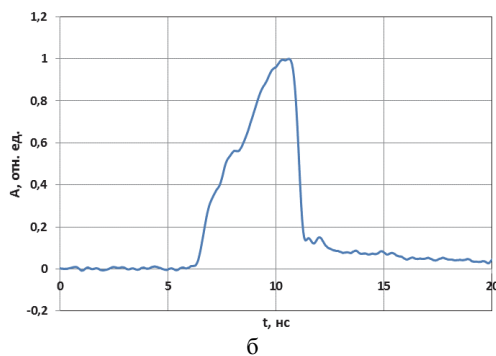
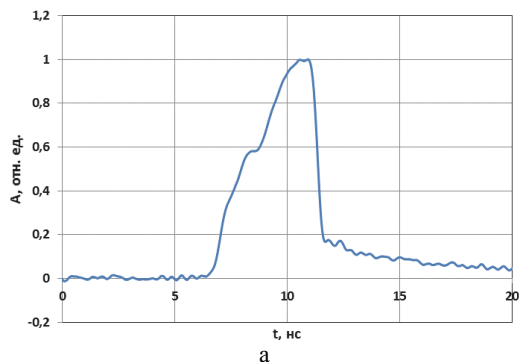


Рис. 6. Временная форма лазерного импульса: а – на выходе системы временного профилирования, б – на выходе тракта предусиления при $E_{\text{сфои}} = 105$ мДж

Согласно представленным на рис. 6 осциллограммам, временная форма лазерного импульса на выходе системы временного профилирования сохраняется при усилении в каскадах ПУ и ПУ-2 (см. рис. 3), что свидетельствует о работе каскадов предусиления в ненасыщенном режиме.

Во всех семи опытах также проводилась регистрация распределения интенсивности излучения в ближней зоне на выходе СФОИ. На рис. 7 приведена ближняя зона с пространственным профилем интенсивности, зарегистрированная при энергии лазерного импульса 105 мДж. Видно, что пространственный профиль пучка симметричный, диаметр апертуры по уровню $1/e^2$ составляет 12 мм, что соответствует штатному значению.

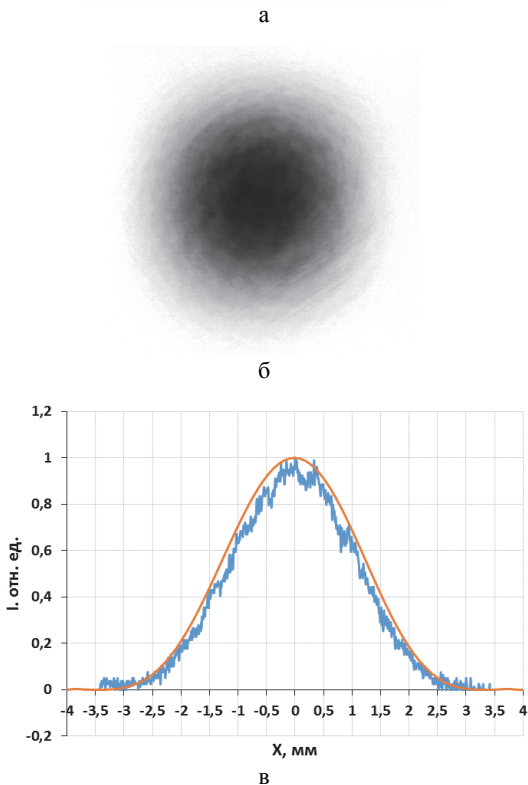


Рис. 5. Распределение интенсивности в ближней зоне пучка на входе апертурной диафрагмы D_{A-2} : а – моделирование в программе Fresnel, б – экспериментальное исследование, в – пространственные профили интенсивности

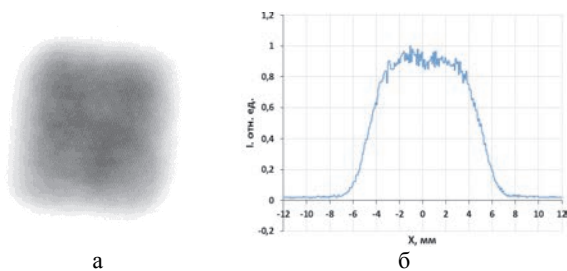


Рис. 7. Ближняя зона пучка на выходе СФОИ: а – распределение интенсивности, б – пространственный профиль интенсивности

Исследования усиления лазерного импульса в лазерном канале установки «Луч»

В большинстве проводимых на установке «Луч» экспериментальных исследований по взаимодействию интенсивного лазерного излучения с мишенями различных типов, требуется лазерный импульс, имеющий прямоугольную временную форму. Достижение выходной энергии излучения до уровня $E_{1\omega} \approx 1 \text{ кДж}$ неизбежно сопряжено с выходом в режим насыщенного усиления на последнем проходе, что приводит к искажению изначально заданной временной формы лазерного импульса на входе главного усилительного тракта. В связи с этим, формирование

прямоугольной формы лазерного импульса на выходе установки возможно при подаче на вход главного усилительного тракта лазерного импульса специальной заданной временной формы.

Проведены экспериментальные исследования параметров лазерного импульса на выходе главного усилительного тракта установки «Луч». Задачей исследований являлось получение импульса прямоугольной временной формы, с энергией $\approx 1 \text{ кДж}$, размером пучка в ближней зоне $\approx 180 \times 180 \text{ мм}$ и расходимостью излучения $\approx 10^{-4} \text{ рад}$. Во всех проведенных опытах зарядное напряжение на емкостных накопителях энергии главных усилителей составляло 18 кВ. Регистрации параметров излучения осуществлялись посредством штатных оптических систем и оборудования. Данные по усилению импульса излучения модернизированной СФОИ приведены в табл. 2.

На рис. 8–9 представлены пространственные параметры пучка на выходе силового тракта установки «Луч», зарегистрированные в опыте 4. Размер пучка в ближней зоне составляет $\approx 180 \times 180 \text{ мм}$. Расходимость излучения составляет $\Theta_{0,8-1\omega} \approx 0,56 \times 10^{-4} \text{ рад}$ по уровню 80 % содержания энергии.

Таблица 2

Данные по усилению импульса излучения модернизированной СФОИ

| № опыта | Есфои, мДж | Е _{1ω} , Дж | τсфои, нс | τ _{0,5-1ω} , нс | Θ _{0,8-1ω} , рад |
|---------|------------|----------------------|-----------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 93 | 957 | 3,7 | 1,8 | $0,49 \times 10^{-4}$ |
| 2 | 76 | 832 | 4,7 | 4,6 | $0,53 \times 10^{-4}$ |
| 3 | 97 | 902 | 3,9 | 4,3 | $0,56 \times 10^{-4}$ |
| 4 | 98 | 993 | 3,8 | 4,3 | $0,56 \times 10^{-4}$ |

Примечания: Есфои – энергия импульса на выходе СФОИ; Е_{1ω} – энергия импульса на выходе лазерного канала; τсфои – длительность импульса на выходе СФОИ; τ_{0,5-1ω} – длительность импульса на выходе лазерного канала; Θ_{0,8-1ω} – расходимость излучения.

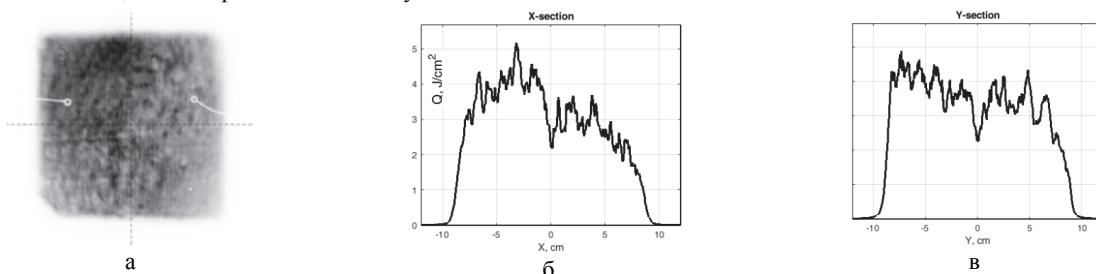


Рис. 8. Ближняя зона пучка на выходе силового тракта: а – распределение интенсивности, б – пространственный профиль интенсивности по координате X, в – пространственный профиль интенсивности по координате Y

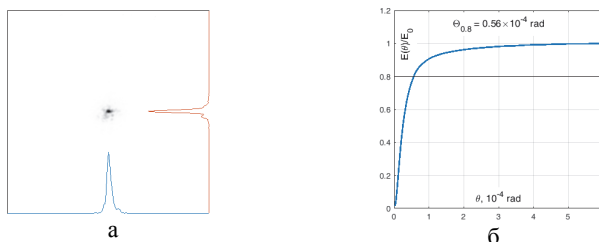


Рис. 9. Дальняя зона пучка на выходе силового тракта: а – распределение интенсивности с пространственными профилями по двум поперечным координатам, б – зависимость расходимости излучения от энергии на выходе силового тракта

На рис. 10 представлены осциллограммы временных форм лазерных импульсов на входе и выходе силового тракта установки «Луч», зарегистрированные во всех четырех опытах.

При усилении импульса, представленного на рис.10, а в опыте 1, на выходе силового тракта происходит обужение временной формы, вследствие чего длительность сокращается практически в 2 раза и задний фронт имеет более резкий спад (рис.10, д). В опыте 2 (рис.10, б) при усилении импульса временной формы близкой к прямоугольной, на выходе силового тракта формируется импульс, имеющий более плавный спад мощности на заднем фронте

(рис.10, е). В опыте 3, рис.10, в, и опыте 4, рис.10, г, когда на вход силового тракта подавались импульсы сложной нарастающей временной формы, на выходе силового тракта формируется импульс, имеющий форму близкую к прямоугольной (рис.10, ж и рис.10, з), что позволяет компенсировать искажение временной формы в режиме насыщенного усиления на последнем проходе.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по направлению «Физика высоких плотностей энергии».

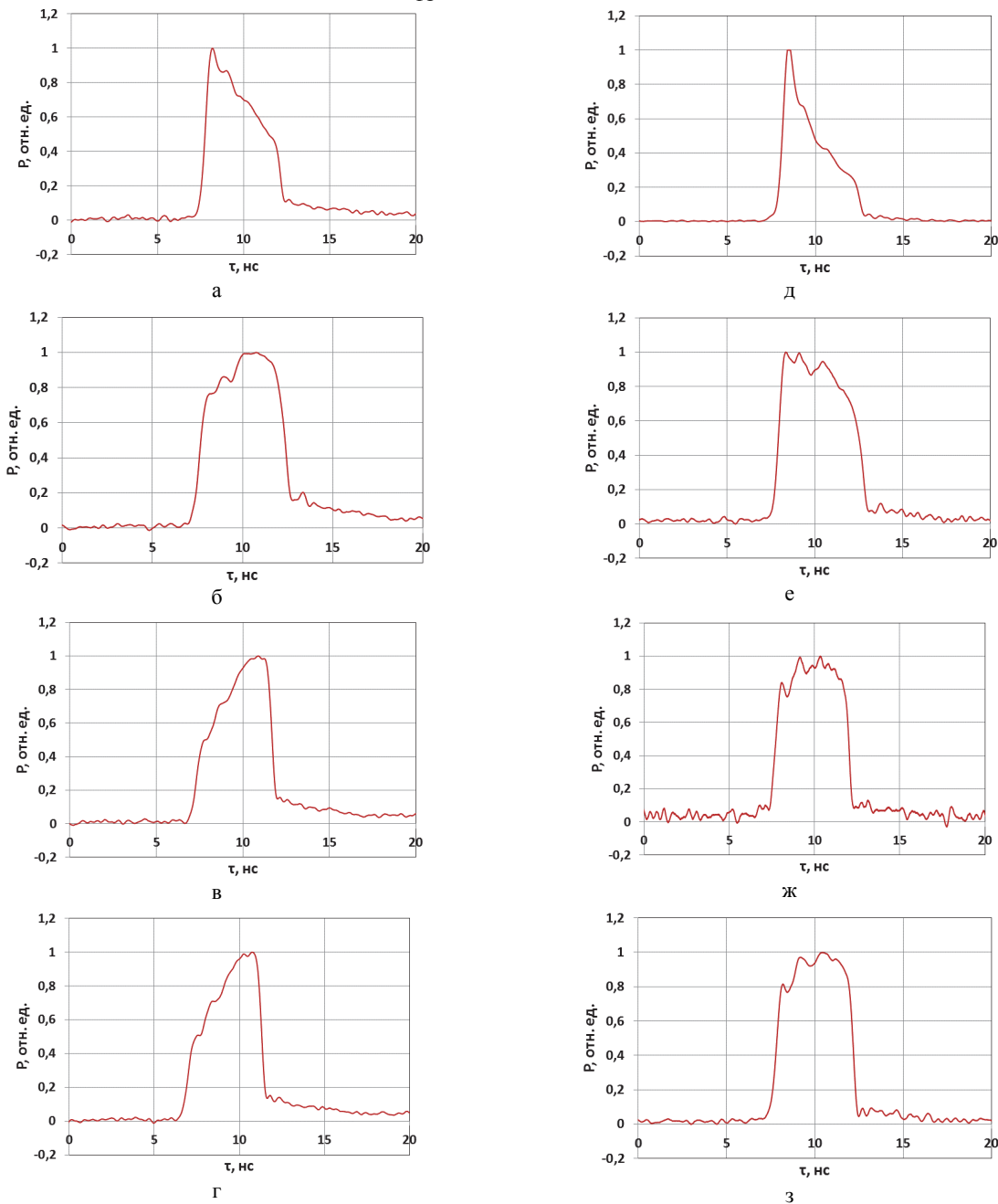


Рис. 10. Временные формы лазерных импульсов на входе (а, б, в, г) и выходе (д, е, ж, з) силового тракта установки «Луч»: а, д – опыт 1, б, е – опыт 2, в, ж – опыт 3, г, з – опыт 4

При усилении импульса, представленного на рис. 10, а в опыте 1, на выходе силового тракта происходит обужение временной формы, вследствие чего длительность сокращается практически в 2 раза и задний фронт имеет более резкий спад (рис.10, д). В опыте 2 (рис.10, б) при усилении импульса временной формы близкой к прямоугольной, на выходе силового тракта формируется импульс, имеющий более плавный спад мощности на заднем фронте (рис.10, е). В опыте 3, рис.10, в, и опыте 4, рис.10, г, когда на вход силового тракта подавались импульсы сложной нарастающей временной формы, на выходе силового тракта формируется импульс, имеющий форму близкую к прямоугольной (рис.10, ж и рис.10, з), что позволяет компенсировать искажение временной формы в режиме насыщенного усиления на последнем проходе.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики по направлению «Физика высоких плотностей энергии».

Заключение

В составе лазерной установки «Луч» исследован и выведен на рабочий режим новый задающий генератор на кристалле YLF:Nd с диодной накачкой, работающий в режиме активной модуляции добротности с селекцией продольных мод. Показано, что разброс энергии на выходе задающего генератора составляет $\leq 5\%$. Разработана и исследована оптоэлектронная система временного профилирования, позволяющая формировать лазерный импульс с регулируемой длительностью от 1 до 10 нс и изменять его временную форму. Исследован двухпроходный усилитель на YLF:Nd активной среде, с коэффициентом усиления за проход до $K_0 \approx 65$. Разработана и внедрена система согласования пространственных параметров лазерного излучения, позволяющая адаптировать новый задающий генератор в действующей оптической схеме СФОИ. Показано, что на выходе модернизированной СФОИ возможно формирование импульса излучения с управляемой временной формой и разбросом энергии $\leq 10\%$. Проведены экспериментальные исследования усиления лазерного им-

пульса модернизированной СФОИ в основной усилительной схеме установки «Луч», которые продемонстрировали возможность формирования на выходе лазерного канала импульса квазипрямоугольной временной формы с энергией $E_{1\omega} \approx 1$ кДж, длительностью $\tau_{0,5_{1\omega}} \approx 4$ нс и расходимостью $\Theta_{0,8_{1\omega}} \approx 0,5 \times 10^{-4}$ рад. Результаты проведенных исследований показали, что модернизированная СФОИ выведена на рабочий режим в составе лазерной установки «Луч».

Работа выполнена в рамках научной программы НЦФМ по направлению «Физика высоких плотностей энергии».

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Крохин О. Н. Мощные лазеры и лазерный термоядерный синтез // Вестник РАН. 2011. Т. 81, № 6. С. 495–502.
2. Илькаев Р. И., Гаранин С. Г. Исследование проблем термоядерного синтеза на мощных лазерных установках // Вестник РАН. 2006. Т. 76, № 6. С. 503–515.
3. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И., и др. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301.
4. Зималин Б. Г., Савкин А. В., Сухарев С. А. Пространственный профиль лазерного пучка установки «Луч» // Атом. 2009. Т. 44, № 4. С. 36–37.
5. Зималин Б. Г., Рукавишников Н. Н., Савкин А. В., Шаров О. А., Сухарев С. А. Система формирования опорного излучения лазерной установки «Луч» // Сборник тезисов докладов XXVII европейской конференции по взаимодействию лазерного излучения с веществом. Москва. 2002. С. 63.
6. Зималин Б. Г., Кузин М. Г., Маринин А. А., Телегина В. Ю. Задающий генератор с управляемой временной формой импульса для облучения различных конструкций мишеней на установке «Луч» / 18-я научно-техническая конференция «Молодежь в науке» // Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2020. Т. 1. С. 299–304.