

# ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

*И. В. Кузьмин, Б. Г. Зималин, А. В. Савкин, А. Н. Рукавишников, Р. Ю. Костюнин, И. В. Мишина*

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

## Введение

Исследование процессов, возникающих при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом, является одним из приоритетных направлений мощных лазерных установок [1, 2]. Возможность управления в совокупности со стабилизацией параметров лазерного излучения на выходе установки позволяет существенно расширить спектр исследуемых конструкций мишеней и повысить воспроизводимость результатов. Как правило, управление параметрами излучения осуществляется в задающем генераторе установки в процессе формирования и предусиления исходного лазерного импульса. При последующем увеличении энергии излучения в главном усилительном тракте необходимо учитывать искажение пространственно-временных параметров импульса, возникающих вследствие насыщения и неоднородного по апертуре распределения коэффициента усиления.

Лазерная установка «Луч» построена по принципу усиления относительно слабого импульса с энергией ~мДж в четырехпроходном усилительном тракте, содержащем дисковые каскады со световой апертурой 200×200 мм<sup>2</sup>. В большинстве проводимых на установке «Луч» [3] экспериментах по облучению мишеней требуется лазерный импульс прямоугольной временной формы и длительностью, регулируемой в диапазоне 3–5 нс. Достижение выходной энергии излучения до килоджоульного уровня неизбежно сопряжено с выходом в режим насыщенного усиления на последнем проходе, что приводит к существенному искажению изначально заданной на входе временной формы лазерного импульса. В связи с этим, формирование прямоугольной формы лазерного импульса на выходе установки возможно при подаче на вход главного усилительного тракта лазерного импульса сложной нарастающей временной формы.

Предельная выходная энергия установки, ограниченная лучевой прочностью финальных оптических элементов, может быть достигнута при условии формирования максимально однородного пространственного распределения интенсивности пучка на выходе главного усилительного тракта. Одним из основных процессов, приводящих к искажению пространственной формы пучка на выходе установки, является усиление спонтанного излучения, возникающее вдоль большей стороны дисковых активных элементов и приводящее к формированию неравно-

мерного коэффициента усиления по апертуре каскадов. В этом случае повысить общую энергию излучения при сохранении пиковой плотности энергии на безопасном уровне можно посредством формирования на входе главного усилительного тракта лазерного пучка со специальной, изменяемой вдоль одной координаты формой пространственного профиля.

Данная работа посвящена исследованию системы формирования излучения, позволяющей профилировать временную и пространственную форму лазерных импульсов с учетом влияния насыщения усиления и неоднородного распределения коэффициента усиления в дисковых каскадах установки «Луч». В состав системы входят задающий гетеролазер (ЗГЛ), тракт предусиления и система формирования пространственного профиля лазерного пучка.

## Система формирования излучения

Первоначальная система формирования излучения на установке «Луч» представляет собой твердотельный лазер, работающий в режиме модуляции добротности со стержнем из фосфатного стекла с примесью Nd<sup>3+</sup> в качестве активной среды [4]. Формирование временной формы лазерного импульса в данной системе осуществляется с помощью двух последовательно расположенных затворов Поккельса, позволяющих регулировать длительность импульса в пределах  $\tau_{0,5} \approx 1-10$  нс [4]. Подобный способ обладает существенным недостатком, так как не позволяет менять временную форму лазерного импульса произвольным образом. Для устранения данного недостатка в состав установки «Луч» введена новая система формирования излучения, временные и спектральные параметры которой формируются ЗГЛ с центральной длиной волны излучения 1053 нм. Регулировка временных и спектральных параметров осуществляется посредством управления формой импульса тока и рабочей температурой излучающего лазерного диода. На рис. 1 показан спектр ЗГЛ.

Ширина спектральной линии на рис. 1 ограничена аппаратной функцией спектрометра и не превышает  $\approx 0,1$  нм. Длина волны лазерного диода  $\lambda \approx 1053,2$  нм подобрана с помощью изменения температуры термоконтроллера.

На рис. 2–4 приведены характерные формы импульса тока на ЗГЛ и соответствующие им оптические импульсы. Форма импульса тока задается в про-

граммном обеспечении на компьютере и преобразуется в аналоговый сигнал с помощью ЦАП, установленного в драйвере управления лазерным диодом. Далее излучение ЗГЛ усиливается в волоконном

усилителе (ВУ) в  $\approx 10^3$  раз. Регулировкой окна пропускания затвора Поккельса, расположенного после ВУ, можно получать различные формы лазерного импульса при одинаковом импульсе тока (рис. 3 и 4).

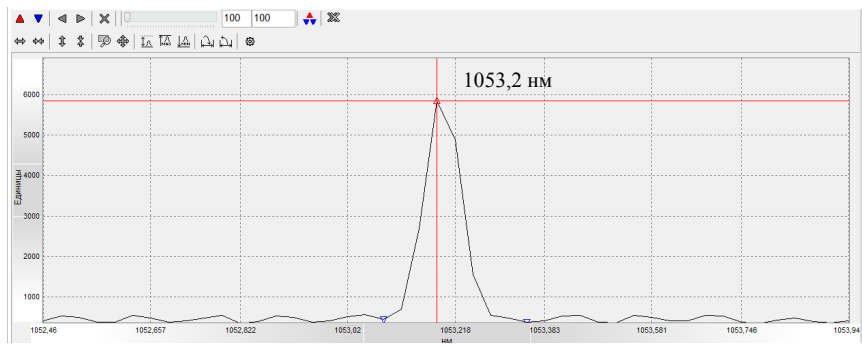
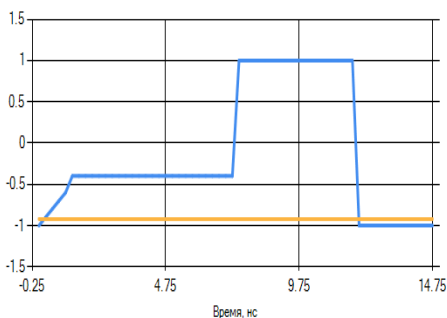
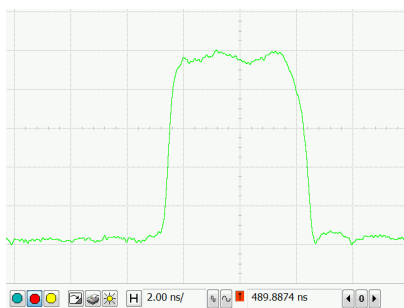


Рис. 1. Спектр задающего гетеролазера

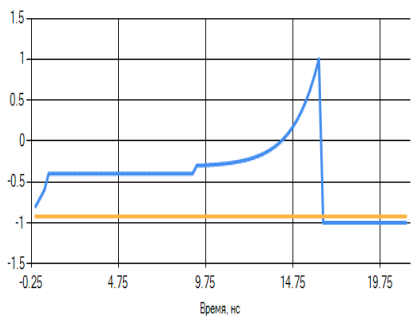


а

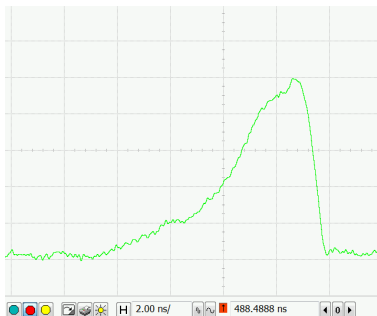


б

Рис. 2. Импульс ЗГЛ: а – форма импульса тока в программе управления драйвером ЗГЛ, б – оптический импульс на выходе затвора Поккельса

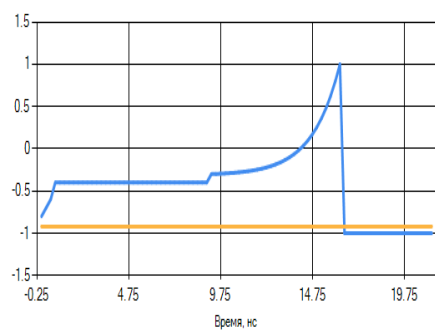


а

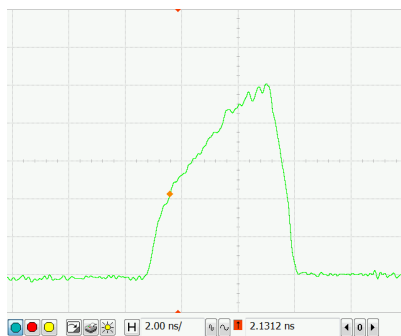


б

Рис. 3. Импульс ЗГЛ: а – форма импульса тока в программе управления драйвером ЗГЛ, б – оптический импульс на выходе затвора Поккельса



а



б

Рис. 4. Импульс ЗГЛ: а – форма импульса тока в программе управления драйвером ЗГЛ, б – оптический импульс на выходе затвора Поккельса

Излучение ЗГЛ, усиленное в волоконном усилителе, заводится во входной каскад параметрических усилителей на основе нелинейно-оптических кристаллов LBO. Накачка параметрических усилителей осуществляется излучением второй гармоники лазера накачки ( $\lambda = 532$  нм). На рис. 5 приведена схема системы формирования излучения на основе параметрического усилителя.

Длительность импульса накачки составляет  $\tau \approx 20$  нс, что позволяет оптимальным образом совмещать во времени сигнальную волну и волну накачки в кристаллах, выбирая участки, где накачка наиболее равномерна. На рис. 6 показан процесс параметрического усиления в выходном усилителе ПАУ2. Провал в осциллограмме импульса лазера накачки соответствует передаче энергии в сигнальную волну и соответственно усилению импульса ЗГЛ. Энергия в импульсе ЗГЛ после параметрического усилителя составляет десятки мДж при длительности импульса  $\tau_{0,5} \approx 5$  нс. При работе ПАУ2 в режиме насыщения энергия импульса достигает  $\approx 70$  мДж, при этом временная форма импульса вырождается в прямоугольную независимо от исходной формы.

Формирование пространственного распределения энергии в пучке на выходе ЗГ-М осуществляется в нескольких подсистемах, расположенных после ПАУ2 (рис. 5) [5]. Первая, выполненная на основе апертурной диафрагмы и пространственного фильтра, формирует гауссов профиль пучка. Затем, градиентным телескопом гауссов профиль пучка преобразуется в профиль с плоской вершиной распределения

энергии. Специальная фазовая пластинка, расположенная в сходящемся пучке и поляризатор формируют внутреннюю структуру распределения энергии в пучке в виде протяженной вдоль одной координаты параболы. Цель пространственного профилирования – компенсация неоднородности коэффициента усиления в дисковых усилительных каскадах установки «Луч». Пространственное распределение зависит от взаимной ориентации оптических элементов подсистемы и подробно описано в [5]. Посредством зубчатой аподизирующей диафрагмы [6] и пространственного фильтра формируется квадратная апертура пучка и проводится аподизация.

На рис. 7 приведены изображения пучка и одномерный профиль интенсивности на впрыске в установку «Луч», откуда лазерный пучок транслируется на вход силового усилителя, в котором энергия излучения увеличивается до килоджоульного уровня [3].

Энергия в лазерном импульсе на выходе системы формирования излучения ограничена энергией в импульсе лазера накачки и не превышает  $\approx 50$  мДж при длительности импульса ЗГЛ с  $\tau_{0,5} \approx 5$  нс. Регулировка энергии усиленного импульса ЗГЛ на впрыске в усилительный тракт установки «Луч» может осуществляться изменением нескольких величин: тока накачки волоконного усилителя, влияющего на энергию сигнальной волны на входе в ПАУ; энергии накачки на входе в ПАУ, влияющей на коэффициент параметрического усиления; углом поворота поляризатора на выходе системы пространственного профилирования.

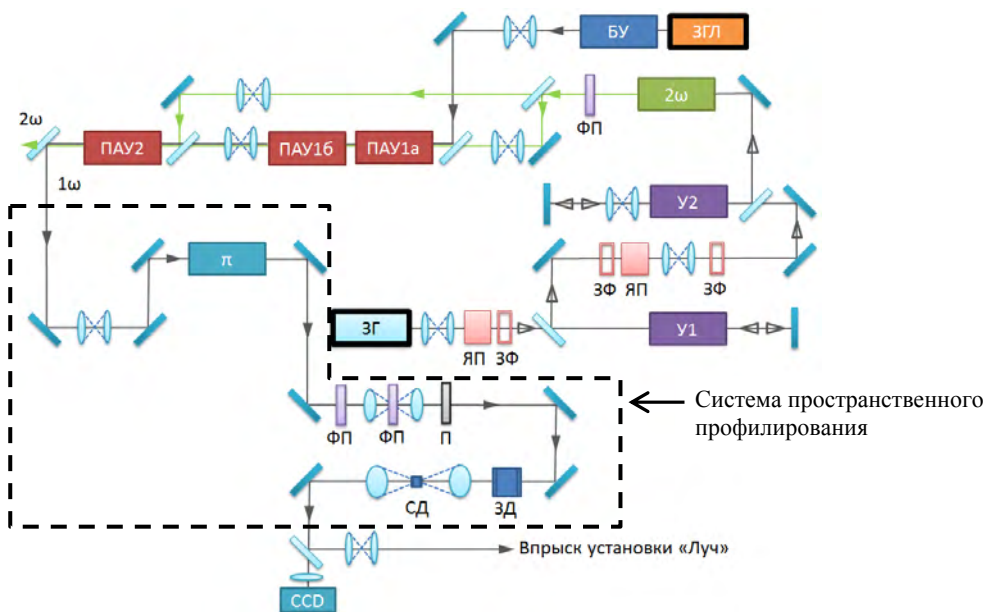


Рис. 5. Оптическая схема задающего генератора на основе параметрического усилителя: ЗГЛ – задающий гетеролазер, БУ – бустерный волоконный усилитель, ПАУ – параметрический усилитель,  $2\omega$  – преобразователь во вторую гармонику, ФП – фазовая пластинка,  $\pi$  – градиентный телескоп, У – усилитель (квантрон), ЗФ – затвор Фарадея, ЯП – ячейка Поккельса, ЗГ – задающий генератор лазера накачки, П – поляризатор, ЗД – зубчатая диафрагма, СД – селектирующая диафрагма, CCD – ПЗС-камера

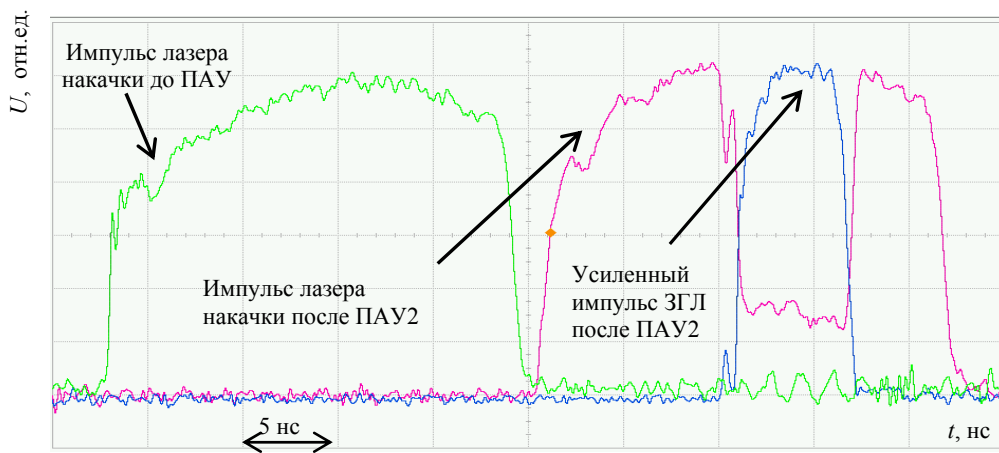


Рис. 6. Осциллограммы импульса лазера накачки и усиленного импульса ЗГЛ

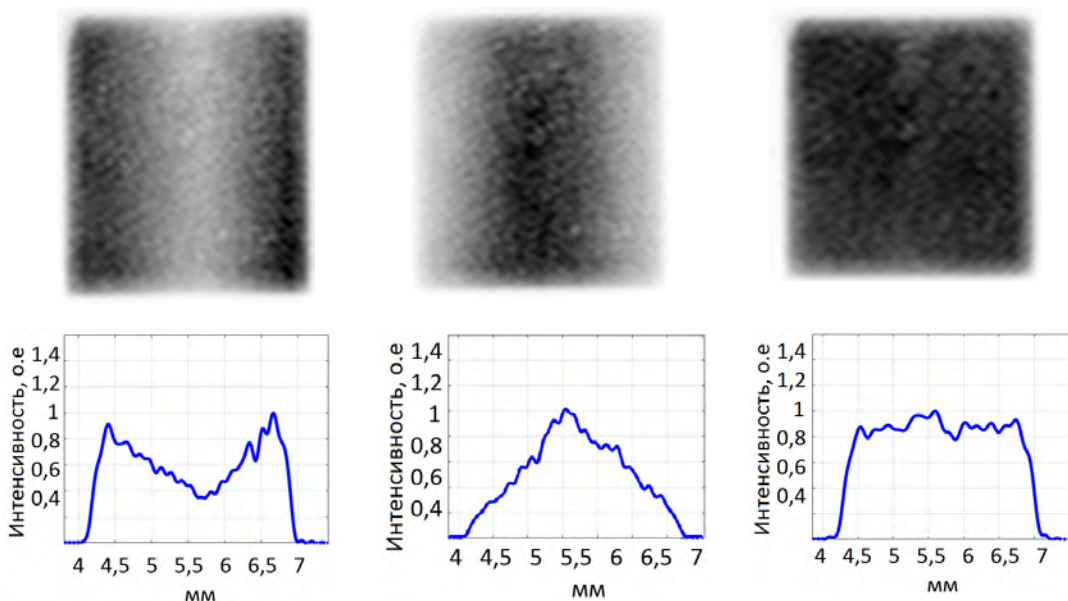


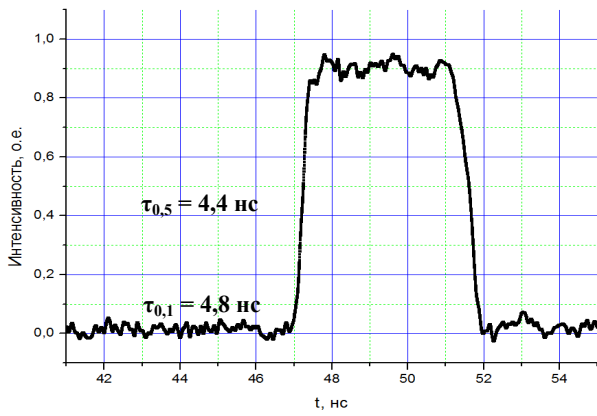
Рис. 7. Варианты формирования внутренней структуры пространственного распределения пучка на входе главного усилителя установки «Луч»

### Искажение пространственно-временных параметров лазерного импульса в усилительном тракте установки «Луч»

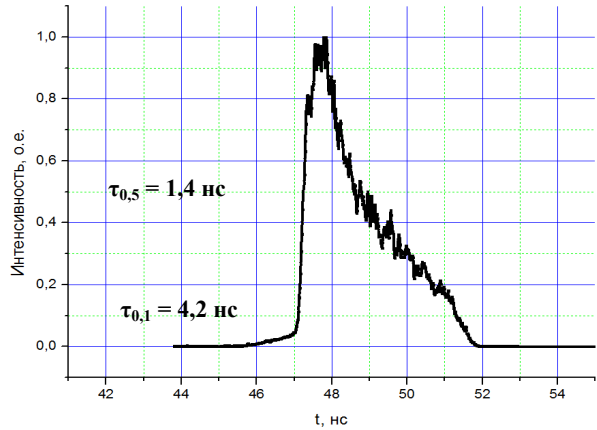
Силовой усилитель установки «Луч» позволяет достигать энергии в лазерном импульсе  $\approx 3,3$  кДж при входной энергии  $\sim 10$  мДж [3]. Достижение килоджоульного уровня энергии неизбежно приводит к тому, что в выходных дисковых активных элементах усиление проходит в режиме насыщения, в связи с чем искажается временная форма усиливаемого лазерного импульса.

На рис. 8–9 приведены осциллограммы лазерного импульса на входе и на выходе усилительного тракта установки «Луч».

На рис. 8 показано влияние эффекта насыщения на временную форму прямоугольного лазерного импульса с длительностью  $\approx 5$  нс: на осциллограмме усиленного импульса передний фронт становится выше заднего фронта в  $\approx 5$  раз, в результате чего длительность  $\tau_{0,5}$  сокращается в  $\approx 3$  раза. Подобное искажение нарушает условия проводимого опыта и повышает вероятность повреждения оптических элементов. В последующих экспериментах форма импульса тока на ЗГЛ изменена таким образом, чтобы получить лазерный импульс с нарастанием мощности от переднего фронта к заднему (рис. 9а). При усилении такого импульса в силовом тракте установки «Луч» временная форма лазерного импульса на выходе получается квазипрямоугольной (рис. 9б).



а

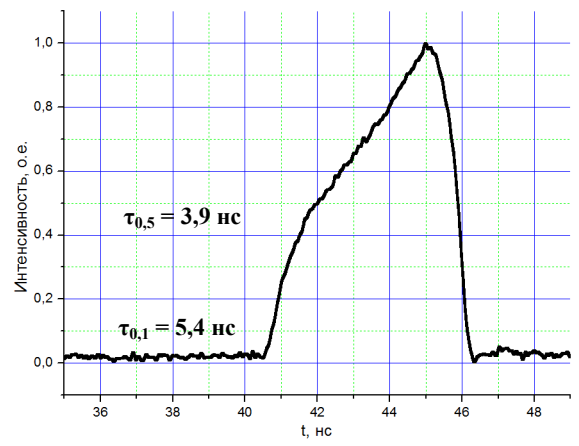


б

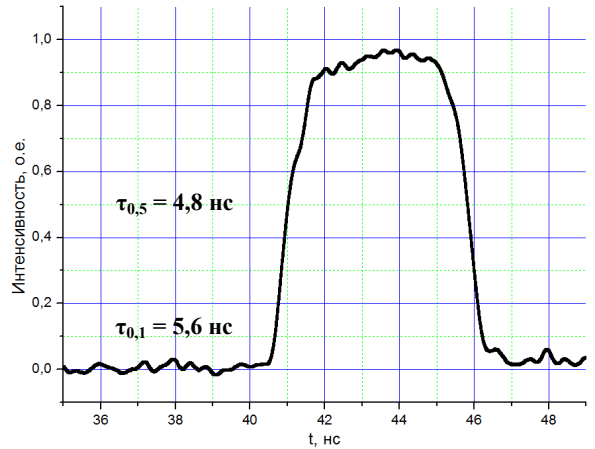
Рис. 8. Осциллограммы лазерного импульса длительностью  $\approx 4-5$  нс без профилирования: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе

На данный момент система формирования излучения не позволяет точно задавать форму входного лазерного импульса в соответствии с расчетной, в частности, из-за нестабильной работы задающего генератора лазера накачки. Форма импульса, приведенная на рис. 9а подобрана экспериментальным путем.

Усиление лазерного излучения в широкоапертурных трактах имеет важную особенность. Дисковые активные элементы имеют прямоугольную форму и располагаются под углом Брюстера к оптической оси системы для минимизации френелевских потерь. При этом усиление спонтанного излучения, возникающего вдоль большей стороны активных элементов, приводит к неоднородному сбросу инверсии по апертуре элемента и, как следствие, искажению распределения коэффициента усиления, которое представляет собой протяженную вдоль одной координаты параболу.



а



б

Рис. 9. Осциллограммы лазерного импульса длительностью  $\approx 4-5$  нс с профилированием: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе

На рис. 10 показаны изображение пучка и профиль интенсивности без компенсации неоднородности усиления, а на рис. 11 – с компенсацией неоднородности усиления.

Если на выходе системы формирования излучения пространственное распределение лазерного пучка имеет профиль близкий к прямоугольному (рис. 10а), то на выходе усилительного тракта установки «Луч» пространственный профиль искажается в соответствии с распределением коэффициента усиления по апертуре активных элементов (рис. 10б). Перепад плотности энергии между краями и центром выходного лазерного пучка составляет  $\approx 60\%$  (рис. 10б), что снижает предел допустимой энергии в лазерном импульсе на выходе установки из-за возможного разрушения оптических элементов.

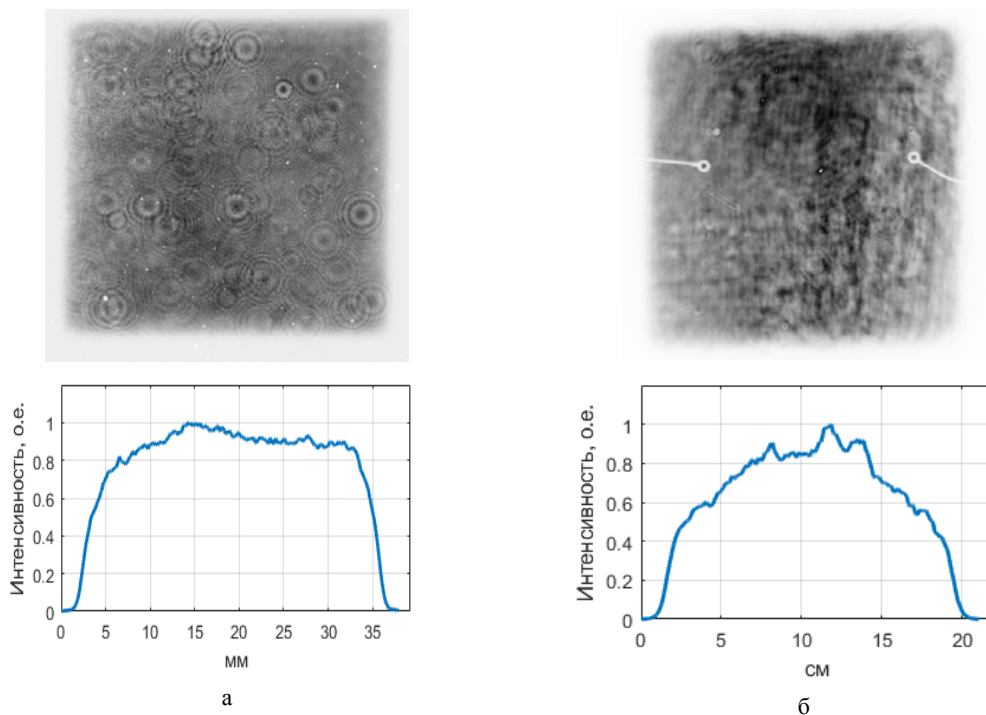


Рис. 10. Изображение пучка и профиль интенсивности без компенсации неоднородности усиления: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе.

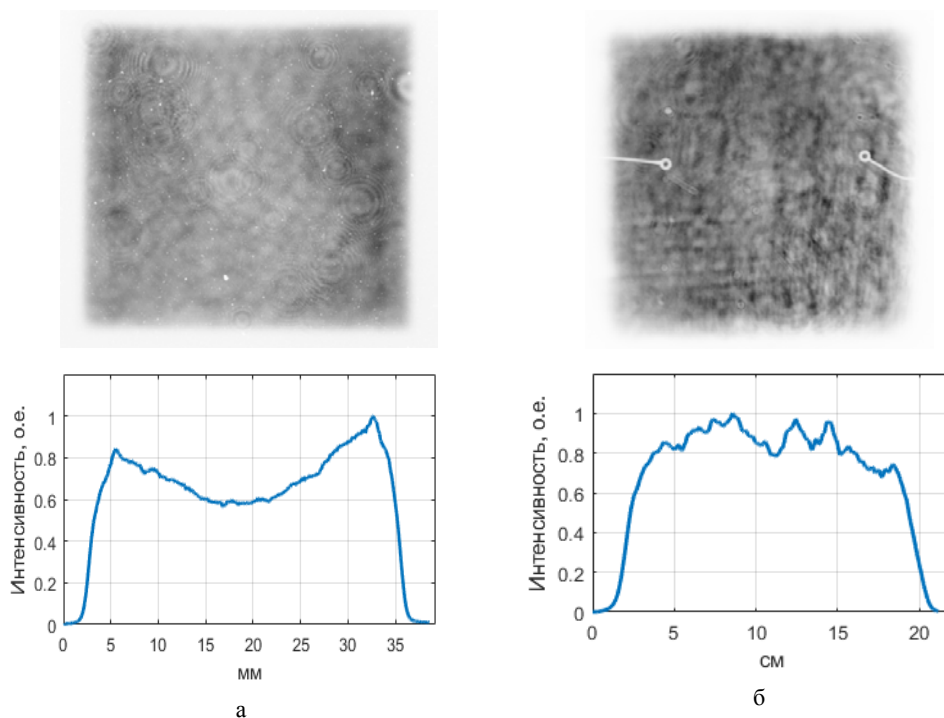


Рис. 11. Изображение пучка и профиль интенсивности с компенсацией неоднородности усиления: а – на входе в усилительный тракт установки «Луч», б – на выходе

В предыдущем разделе показано, что система пространственного профилирования позволяет формировать лазерный пучок с распределением в виде протяженной вдоль одной координаты параболы. При использовании пучка с таким пространственным распределением на входе в усилительный тракт (рис. 11а) на выходе можно получить более одно-

родное распределение с перепадом интенсивности от центра к краям  $\approx 20\%$  (рис. 11б). Таким образом, используемая система формирования излучения позволяет повысить предельные энергетические возможности в установках с широкоапертурным усилительным трактом.

В составе лазерной установки «Луч» проведена экспериментальная отработка нового задающего генератора с управляемыми пространственно-временными и энергетическими параметрами импульса. Описан принцип работы системы формирования излучения, основанный на использовании каскада параметрических усилителей, преобразующих энергию второй гармоники лазера накачки ( $\lambda = 532$  нм) в энергию импульса задающего гетеролазера ( $\lambda = 1053$  нм). Показана возможность регулировки временной формы лазерного импульса на выходе системы формирования излучения, что позволяет компенсировать эффект насыщения в усилительном тракте установки «Луч» при достижении килоджоульного уровня энергии в импульсе с длительностью  $\tau_{0,5} \approx 5$  нс. Возможность формирования пучка с пространственным распределением в виде протяженной вдоль одной координаты параболы позволяет компенсировать неоднородность коэффициента усиления в широкоапертурных дисковых активных элементах и таким образом повысить предельные энергетические возможности. Результаты проведенных исследований показали перспективность применения разработанной системы формирования лазерного излучения в многоканальной лазерной установке нового поколения.

1. Гаранин С. Г. Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии // УФН, 2011. Т. 184, № 4. С. 434–441.
2. Лебо И. Г. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза методами математического моделирования // Москва: ИПМ, 2001.
3. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И., Кириллов Г. А., 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. Front-end system of the «Luch» facility / Rukavishnikov N. N., Savkin A. V., Sharov O. A., Sukharev S. A., Zimalin B. G. // XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter, book of abstracts, 2002. P. 63
5. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зималин Б. Г., Савкин А. В., Шаров О. А. Формирование пространственного профиля лазерного пучка в тракте мощных неодимовых установок // Квантовая электроника, 2015. Т. 45, № 6. С. 503–507.
6. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зималин Б. Г., Рукавишников Н. Н., Савкин А. В., Шаров О. А. Исследование аподизации лазерного пучка зубчатыми апертурными диафрагмами для мощных установок лазерного термоядерного синтеза // Оптический журнал. 2015. Т. 82, № 6.