

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

*Скоблова Мария Владиславна (MVSkoblova@vniief.ru), Деркач Владимир Николаевич, Деркач Ирина Николаевна, Добиков Алексей Васильевич, Павлунина Ольга Александровна*

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

В работе приведены результаты разработки модернизированного варианта оптической системы лазерной установки «Луч». Модернизация направлена на улучшение пространственно-угловых и энергетических характеристик излучения. В процессе разработки выполнены габаритный и абберационный анализы оптической системы, а также расчеты обратно-отраженных сигналов. Сделана оценка лучевой нагрузки на оптических элементах рассчитанной системы.

**Ключевые слова:** лазерная установка «Луч», оптическая система силового канала, обратно-отраженный сигнал, лучевая нагрузка.

## MODERNIZATION OF AN OPTICAL SYSTEM OF THE «LUCH» LASER FACILITY

*Skoblova Maria Vladislavna (MVSkoblova@vniief.ru), Derkach Vladimir Nikolaevich, Derkach Irina Nikolaevna, Dobikov Aleksey Vasilevich, Pavlunina Olga Aleksandrovna*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The work presents the results of the development of an upgraded version of the optical system of the «Luch» laser facility. The modernization aims at enhancing spatial-angular and energy characteristics of beaming. At the design process, dimensional and aberration analyses of the optical system were performed, as well as calculations of ghost rays. Assessment of a ray load on optical elements of the calculated system was made.

**Key words:** laser facility «Luch», beamline optics system, ghost ray, ray load.

### Введение

Исследования в рамках физики высоких плотностей энергий требуют создания крупногабаритных лазерных установок. Технические решения, закладываемые в основу таких проектов, как правило, отрабатываются на менее масштабных системах. Так в 2002 г. была создана четырехканальная лазерная установка «Луч», которая проектировалась как модуль более крупной установки. К настоящему времени на установку возложили более широкий круг задач: эксперименты по ударной сжимаемости конструктивных и специальных материалов, исследование изэнтропического сжатия различных материалов. В связи с этим принято решение по модернизации установки и созданию на основе существующей схемы новой – «Луч-М1». В основу конструкции модернизированного силового модуля положены технические решения двух установок: «Луч» [1, 2] и «ЭЛЬФ» [2, 3].

В настоящей работе будут приведены результаты габаритного и абберационного расчетов модернизированного варианта оптической системы установки «Луч», а также результаты расчета обратно-отраженных сигналов от линз пространственных фильтров.

### Исходные данные и технические требования

Структурная схема установки «Луч-М1» приведена на рис. 1. Установка состоит из ряда подсистем. В системе формирования опорного излучения (СФОИ) формируется исходный лазерный пучок с требуемыми пространственно-временными и спектральными параметрами, который направляется в силовой канал. Основная задача силового канала – усилить лазерное излучение. Далее с помощью системы транспортировки пучок направляется на фокусирующий объектив и фокусируется на мишень в камере взаимодействия. Для исследования процессов взаимодействия излучения с мишенью используется система диагностики.

Целью данной работы являлись разработка и расчет оптической системы силового канала установки «Луч-М1». Расходимость излучения по уровню 80 % энергии на выходе из силового канала не должна превышать  $(2\theta) \leq 2,5 \cdot 10^{-5}$  рад. (полная расходимость излучения на выходе силового канала установки «Луч» составляет  $(2\theta) \approx 2 \cdot 10^{-4}$  рад.). При расчете оптической системы были заданы следующие исходные данные и требования:

1) максимальная энергия импульса 6000 Дж, длина волны излучения – 1054 нм, длительность лазерного импульса – 4 нс;

2) параметры волнового фронта на выходе канала  $RMS \leq 1\lambda$ ,  $PV \leq 4\lambda$ ;

3) блики с повышенной ( $>10$  Дж/см<sup>2</sup>) плотностью энергии не должны попадать на оптические элементы системы;

4) в модернизированной системе использовать по возможности элементы старой схемы установки;

5) конструктивные параметры линз телескопов должны быть подобраны, исходя из минимизации статистических aberrаций системы;

6) все линзы пространственных фильтров должны быть расположены перпендикулярно по отношению к падающему излучению;

7) оптическая система должна перестраивать изображение зубчатой диафрагмы (ЗД) на расстоянии 15 м от последнего элемента силового канала, такое расстояние необходимо, чтобы разместить все элементы системы транспортировки установки и преобразователь частоты.

### Габаритная схема оптической системы силового канала

На начальном этапе проектирования была выбрана и получена аналитическое обоснование с точки зрения энергетических параметров оптическая схема силового канала установки, представленная на рис. 2.

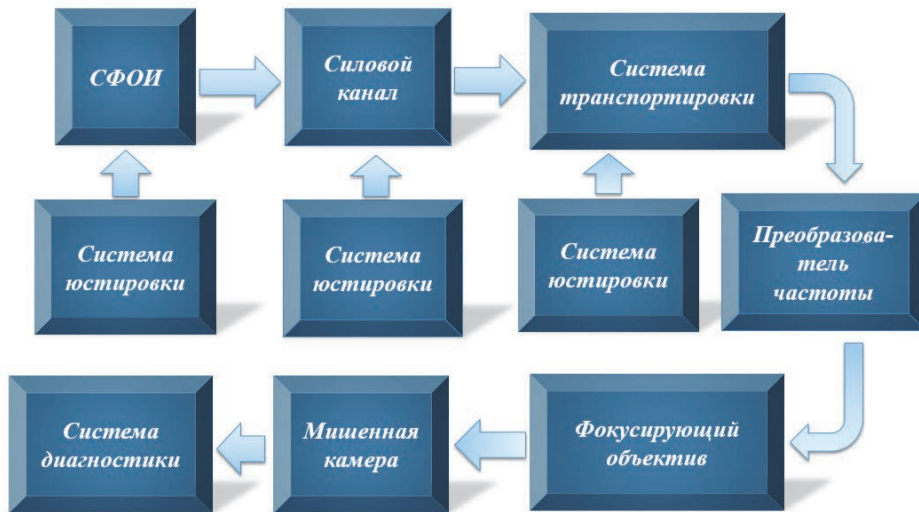


Рис. 1. Структурная схема установки «Луч-М1»

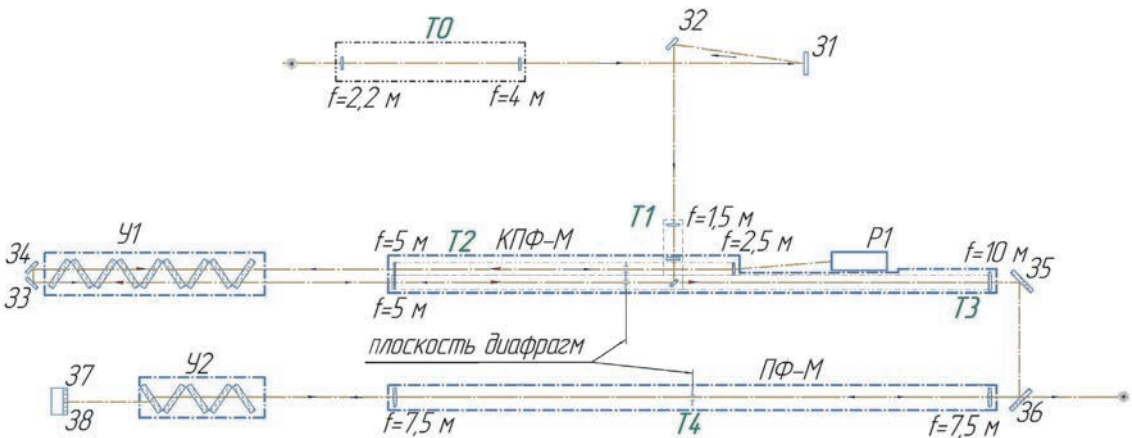


Рис. 2. Оптическая схема силового канала установки «Луч-М1»: T0, T1, T2, T3, T4 – телескопические системы; 31–38 – зеркала; P1 – реверсер; Y1, Y2 – усилители, КФФ-М – кюветный пространственный фильтр, ПФ-М – пространственный фильтр

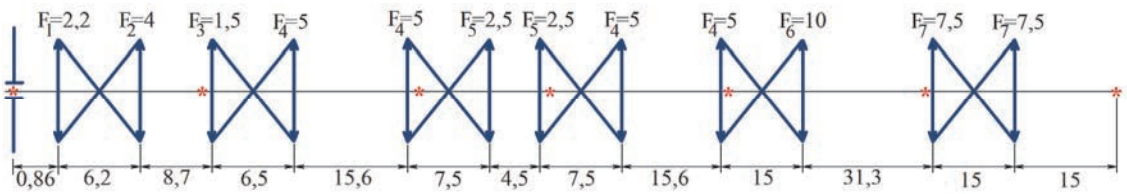


Рис. 3. Схема перестроения изображения 3Д в силовом канале

Пучок размером  $\sim 18 \times 18$  мм, длиной волны  $\lambda = 1,054$  мкм и энергией 2 Дж от системы формирования опорного излучения (СФОИ) поступает в телескоп Т0. При помощи телескопа Т0, образованного линзами с фокусными расстояниями 2200 мм и 4000 мм, пучок увеличивается до размера  $33 \times 33$  мм<sup>2</sup>. С помощью системы зеркал – 31, 32 пучок направляется в телескоп Т1 с увеличением 3,33<sup>x</sup>. Этот телескоп входит в состав модернизированного кюветного пространственного фильтра (КПФ-М). Пройдя через пространственный фильтр, пучок размером  $\sim 110 \times 110$  мм направляется в первый многопроходный усилитель У1. В усилителе У1 он проходит через нижнюю левую (по ходу пучка) четверть световой зоны активных элементов. Далее парой зеркал 34, 33 пучок разворачивается на 180° и следует на второй проход через усилитель У1. После двух проходов излучение увеличивает свою энергию до 140 Дж. Далее пучок проходит через телескоп Т2 и попадает в реверсер Р1. В реверсере Р1 он разворачивается в горизонтальной плоскости, то есть «левая» и «правая» половины пучка меняются местами и поднимается на 130 мм вверх. Затем пучок проходит аналогичный телескоп Т2 и следует в усилитель У1 на третий проход. На третьем проходе он идет через верхнюю правую (по ходу пучка) четверть световой зоны активных элементов. Парой зеркал (не показаны на схеме), аналогичных паре 33, 34, пучок разворачивается на 180° и следует на четвертый проход через усилитель. Лазерное излучение (ЛИ) после четвертого прохода усиливается до 1500 Дж и далее направляется в телескоп Т3. При помощи этого телескопа, образованного линзами с фокусными расстояниями 5000 мм и 10000 мм, пучок увеличивается до размеров  $\sim 220 \times 220$  мм. Следующая за телескопом пара зеркал – 35, 36 заводит пучок в усилитель У2. Пройдя через усилитель, пучок другой парой зеркал – 37, 38 направляется на последний проход усиления. Усилившись до 6000 Дж, ЛИ выводится из силового канала через телескоп Т4 с увеличением 1<sup>x</sup>.

Оптическая схема силового канала построена на общеизвестных принципах построения мощных лазерных установок. Для перестроения плоскости 3Д с равномерным распределением интенсивности пучка на элементы схемы, обладающие низкой лучевой прочностью, в схему введены телескопы Кеплера. Диафрагмы, установленные в фокальных плоскостях

телескопов, служат для подавления самовозбуждения усилителей, а также исключения развития нелинейных эффектов. Кроме выполнения роли оптических ретрансляторов и пространственных фильтров, они также осуществляют функцию по расширению сечения пучка по ходу его распространения для сохранения лучевой нагрузки на оптических элементах ниже предельно допустимой. Также в основу схемы положены технические решения созданных ранее лазерных установок «ЭЛЬФ» и «Луч».

На рис. 3 показано перестроение изображения 3Д в системе. Расстояние приведено в метрах. Оптическая система перестраивает изображение 3Д на расстояние 15 м от последней линзы силового канала на фокусирующую систему мишенной камеры. Расстояние в 15 м было выбрано, исходя из конструктивных особенностей всей системы: на этом отрезке требуется разместить системы диагностики и транспортировки, а также преобразователь частоты.

### Аберрационный анализ оптической системы силового канала

Расчет всех телескопов, входящих в оптическую систему, выполнялся следующим образом. В расчетную программу вводятся данные габаритного расчета телескопа, при этом радиусы линз и расстояние между ними считаются переменными величинами. Переменные величины рассчитываются с помощью функции оптимизации. В качестве оптимизируемой характеристики системы выбирается размер кружка рассеяния в фокусе парааксиальной линзы, расположенной после телескопа.

При проведении расчета было выяснено, что с помощью плосковыпуклых линз не всегда удается достигнуть желаемого критерия качества, поэтому в этих случаях используются двояковыпуклые. Конструктивные параметры рассчитанных телескопов приведены в табл. 1. Материалом всех линз было выбрано кварцевое стекло ( $n = 1,4497659$  на длине волны 1,053 мкм), поскольку на рабочей длине волны оно имеет слабое поглощение ( $\sim 10$  см<sup>-5</sup>) и удовлетворяет ряду других требований к материалу (высокие оптическая и механическая прочность, хорошая оптическая однородность).

## Конструктивные параметры телескопов

Телескоп	Входная линза			Выходная линза		
	$R_1$ , мм	$R_2$ , мм	Толщина, мм	$R_1$ , мм	$R_2$ , мм	Толщина, мм
T0	989,5	$\infty$	5	$\infty$	-1799,1	10
T1	674,6	$\infty$	10	$\infty$	2250,2	30
T2	2741,2	-12470	30	$\infty$	-1131,4	25
T3	2741,2	-12470	30	$\infty$	-4497,6	50
T4	4119,7	-11681,8	50	11581,8	-4119,7	50

Таблица 2

## Характеристики лазерного излучения

Телескоп	Волновой фронт		Кружок рассеяния	
	PV*, $\lambda$	RMS**, $\lambda$	Диаметр кружка рассеяния, мкм	Диаметр дифракционного кружка, мкм
T0	0,001	0,0003	59,2	59,2
T1	0,170	0,0440	24,5	18,0
T2	0,330	0,0710	48,9	33,4
T2+P+T2	0,475	0,103	29,6	16,8
T3	0,120	0,0350	11,1	7,9
T4	0,340	0,0996	15,4	8,9

\* PV – peak-to-valley – разница между максимальным и минимальным значениями

\*\* RMS – root-mean-square – среднеквадратичное значение

С целью размещения элементов реверсера (затвора Поккельса, системы зеркал) вдоль корпуса КПФ-М были приняты некоторые технические решения. Была изменена часть конструкции корпуса КПФ (форма корпуса телескопов КПФ будет в виде песочных часов), выходная линза телескопа T2 спроектирована с клином в  $3^\circ$ . Клин на линзе в  $\theta = 3^\circ$  позволяет отвести излучение в поперечном направлении на  $\Delta \approx 50$  мм на базе в  $l = 2$  м:

$$\Delta = (n-1) \cdot \theta \cdot l \approx 50 \text{ мм},$$

где  $n = 1,5$ .

Стоит отметить, что введение клина между рабочими поверхностями линзы приводит к появлению дополнительного астигматизма.

Параметры волнового фронта излучения на выходе каждого телескопа представлены в табл. 2. В табл. 2 также приведены диаметры кружков рассеяния по уровню 80 % энергии в фокусе парааксиальной линзы ( $f = 1000$  мм), расположенной на выходе телескопов.

Топография волнового фронта на выходе всей оптической системы силового канала представлена на рис. 4. Параметры волнового фронта – PV =  $0,80 \lambda$ , RMS =  $0,21 \lambda$ .

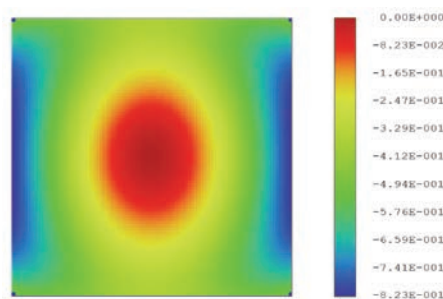


Рис. 4. Топография волнового фронта на выходе оптической системы силового канала

На рис. 5 приведена зависимость доли вложенной энергии в пятне рассеяния от радиуса в фокусе парааксиальной линзы ( $f = 1000$  мм), установленной на выходе системы.

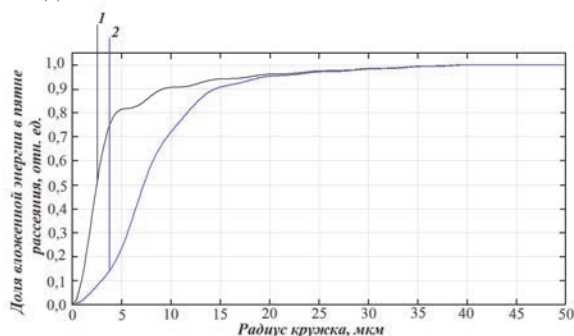


Рис. 5. Зависимость доли вложенной энергии в пятне рассеяния от радиуса в фокусе парааксиальной линзы  $f = 1000$  мм, установленной на выходе системы: 1 – дифракционная, 2 – расчетная

Диаметр кружка рассеяния по уровню 80 % энергии составляет 22,4 мкм. Превышение над диаметром дифракционного – в 2,6 раз. Расчетная расходимость излучения в полном угле ( $2\theta$ ) на выходе силового канала по уровню 80 % энергии составляет  $\theta = 2,3 \times 10^{-5}$  рад.

В абберационном расчете учитывались все статические aberrации (сферическая, кома, астигматизм и т. д.), для учета тепловых aberrаций необходимы дополнительные расчеты.

Превалирующий вклад в увеличение расходимости вносят 2 вида aberrаций: астигматизм (линза с клином) и сферическая aberrация (линзы), причем вклад астигматизма превышает вторую aberrацию в два раза.

### Анализ лучевой нагрузки и обратно-отраженных сигналов

При прохождении излучения через оптические элементы возникают обратно-отраженные сигналы (ООС). При высокой мощности ЛИ ООС могут привести к разрушению оптических и механических элементов системы. Ввиду этого при расчете оптических систем мощных лазерных установок важно контролировать места фокусировки ООС, области с повышенной нагрузкой и плотность мощности этих сигналов на оптических элементах. В установке «Луч-М1» лучевая нагрузка на элементы системы от ООС не должна превышать 10 Дж/см<sup>2</sup>. В качестве исходных данных для расчета лучевой нагрузки взяты данные по энергии импульса лазерного излучения на разных этапах усиления, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

Энергия импульса лазерного излучения

Место в схеме	Энергия излучения $\leq$ , Дж
После СФОИ	2
После 2 прохода У1	140
После 4 прохода У1	1500
После 2 прохода У2	6000

При расчете предполагалось, что ЛИ, падающее на элемент, имеет равномерное распределение энергии. Коэффициенты отражения зеркал в расчетной модели задавались равными 99,5 %, коэффициенты отражения рабочих граней линз – 0,3 %. Результаты расчета по лучевой нагрузке на оптических элементах от ООС 1-го порядка приведены в табл. 4. Наименование элементов соответствует обозначениям, которые указаны на рис. 2. В таблице приведены только элементы, подвергающиеся наибольшей лучевой нагрузке. Для сравнения в таблице приводятся также данные по лучевой нагрузке на оптических элементах от силового излучения.

Таблица 4

Лучевая нагрузка ООС и силового излучения на отдельных оптических элементах схемы

Элемент	Максимальная лучевая нагрузка силового излучения, Дж/см <sup>2</sup>	Максимальная лучевая нагрузка ООС 1-го порядка, Дж/см <sup>2</sup>
Входная линза, Телескоп 1	0,2	0,001
Входная линза, Телескоп 2	1,2	0,010
Входная линза, Телескоп 3	12,7	1,795
Выход У2	13,0	6,536

На рис. 6 приведена карта расположения бликов в силовом канале установки «Луч-М1».

Доля лучевой нагрузки ООС от лучевой нагрузки силового излучения не превышает 50 % (выход У2). Максимальная лучевая нагрузка от ООС 6,5 Дж/см<sup>2</sup>. Таким образом, блики 1-го порядка не представляют угрозы для оптической системы.

Лучевая нагрузка ООС 2-го порядка на элементы системы мала ( $\leq 0,1$  мДж/см<sup>2</sup>) и также не представляет угрозы для элементов системы.

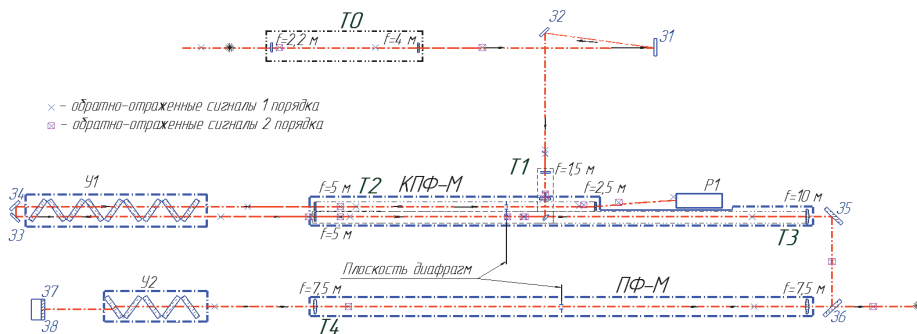


Рис.6. Карта расположения ООС в силовом канале

## Заключение

В работе представлены результаты габаритного и абберационного расчетов оптической системы установки «Луч-М1». Расчетная расходимость излучения в полном угле ( $2\theta$ ) на выходе силового канала по уровню 80 % энергии составляет  $\theta = 2,3 \times 10^{-5}$  рад или  $\theta = 2,6 \times \theta_{dif}$ . Ошибки волнового фронта:  $PV = 0,8 \lambda$ ,  $RMS = 0,21 \lambda$ . Таким образом, расходимость системы на выходе из силового канала была уменьшена на порядок, цель модернизации была достигнута.

Превалирующий вклад в увеличение расходимости на выходе из оптической системы вносят 2 вида аббераций: астигматизм (линза с клином) и сферическая абберация (линзы), причем вклад астигматизма превышает величину второй абберации в два раза.

Приведен анализ бликов 1-го и 2-го порядка от линз телескопов силового канала. Анализ показал, что блики не представляют угрозы для элементов системы. Доля лучевой нагрузки бликов от лучевой нагрузки силового излучения не превышает 50 %.

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

## Список литературы

1. 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.

2. Гаранин С. Г., Гарнов С. В., Сергеев А. М., Хазанов Е. А. Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии // Вестник РАН. 2021. Т. 91, № 5. С. 435–445.

3. Бельков С. А., Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Губский К. Л., Деркач В. Н., Кузнецов А. П. Лазерная установка на Nd стекле с предельными характеристиками по концентрации энергии излучения для проведения исследований экспериментальных состояний вещества и в интересах ЛТС / XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу // Сборник тезисов. Звенигород. 2018. С. 56.