

Финальный оптический модуль установки УФЛ-2М с пространственным разведением излучения первой и второй гармоники в плоскости установки мишени*

**В. Н. Деркач, И. Н. Деркач,
Р. В. Жуков**

Проведена оптимизация оптической схемы финального оптического модуля и его компонентов для получения минимальных вносимых aberrаций. Абберационный анализ основывается на геометрической трассировке лучей через оптическую систему. Определены области обратноотраженного излучения с высокой концентрацией энергии. Исследованы необходимые допуски на материалы, изготовление и размещение оптических элементов. Установлено, что максимальный размер пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки не превышает 40 мкм. Исследовано влияние температуры и давления окружающей среды на компенсационное смещение плоскости облучения мишени.

Введение

На мощных лазерных установках для достижения зажигания DT-горючего необходимо обеспечить однородность облучения лазерной мишени не хуже 1 % [1], поэтому проблема однородного облучения мишени является одной из ключевых при проектировании и конструировании данных установок. Важную роль в этом играет качество финального оптического модуля (ФОМ), который фокусирует и формирует распределение интенсивности в пятне облучения на поверхности мишени. На установках NIF и «Мегаджоуль» инфракрасное излучение первой гармоники преобразуется в более коротковолновое излучение третьей гармоники [2, 3]. На российской установке УФЛ-2М [1] облучение мишени предполагается проводить излучением второй гармоники. При этом необходимо обеспечить разведение излучения первой и второй гармоник в плоскости установки мишени.

В данной работе на основании расчетов предложен вариант схемы ФОМ, который может быть использован на установке УФЛ-2М – мощной 192-канальной установке с энергией импульса на второй гармонике ($\lambda = 0,527$ мкм) $\approx 14,6$ кДж с канала, длительностью импульса 3–10 нс и размером пучка в канале 39×39 см. В работе исследованы и сформулированы требования к изготовлению и установке применяемых оптических элементов; проведена оптимизация габаритов схемы с целью исключения повреждения элементов конструкции ФОМ обратноотраженным излучением.

* Доклад на XI научно-техн. конф. «Молодежь в науке». Саров, 7–9 ноября 2012 г.

ем; проанализировано влияние изменения температуры и давления на размеры пятна фокусировки; реализовано пространственное разведение первой и второй гармоник в плоскости установки мишени.

Расчетное исследование параметров элементов ФОМ

Излучение установки УФЛ-2М проходит через задающий генератор, систему формирования опорного пучка, силовые каналы и транспортную систему. На выходе транспортной системы пучок с размером 39×39 см проходит через ФОМ, после чего фокусируется на мишень. Финальный оптический модуль состоит из фазовой пластины, линзового объектива, герметизирующей пластины, защитной пластины и вакуумного затвора (рис. 1). Элементы указаны в порядке прохождения излучения через перечисленные компоненты. Пространство между поверхностями 1 и 7 заполнено аргоном. Объем после поверхности 8 находится под давлением $<10^{-5}$ Торр. Фазовая пластина вносит необходимые (расчетные) искажения в волновой фронт. Линзовый объектив фокусирует излучение на поверхности мишени. Защитная пластина 1 разделяет среду с вакуумом и аргоном. Защитная пластина 2 ограждает оптические элементы от продуктов распада мишеней. Вакуумный затвор позволяет заменять защитную пластину 2 без изменения давления в мишенной камере.

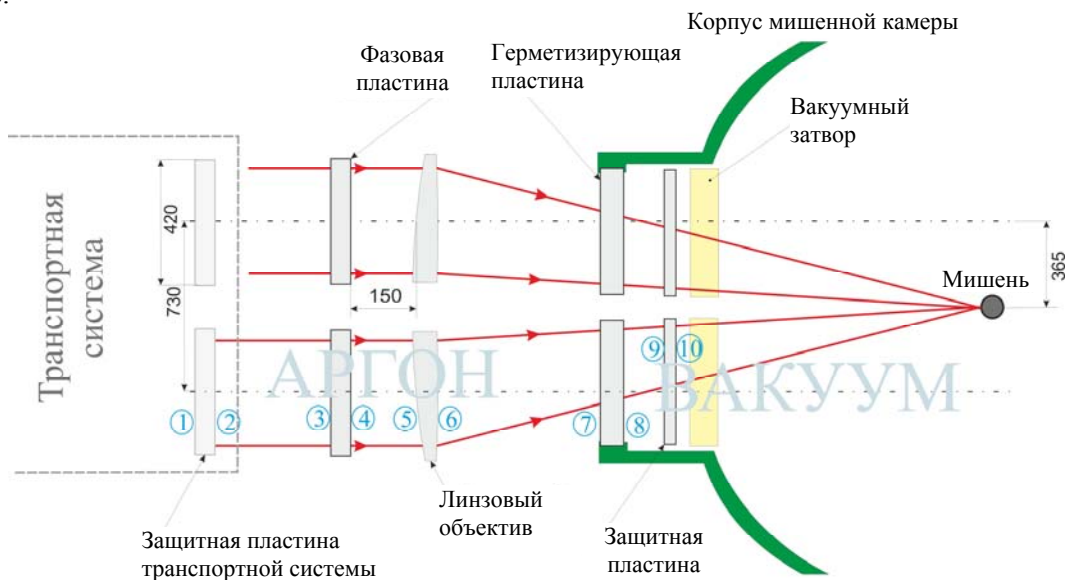


Рис. 1. Габаритная схема ФОМ

На мишенной камере ($\varnothing 10$ м) предполагается располагать 48 кластеров по 4 канала в каждом. За счет параллельного хода пучков в кластере удастся уменьшить габаритные размеры ФОМ. При этом излучение от каждого кластера фокусируется в одну точку в центре мишенной камеры. Существенной функцией ФОМ является обеспечение пространственного разделения излучения первой и второй гармоник в плоскости установки мишени. Для решения данной задачи предложено использовать угловое разделение излучения с разной длиной волны при прохождении стекла за счет дисперсии показателя преломления. Рассмотрены два способа: в первом случае линзовый объектив состоит из двух компонентов – клина и асферической линзы; во втором случае объектив состоит из одного элемента, который является частью большой асферической линзы, как

показано на рис. 2. В этом случае клин и линза совмещены в одном компоненте. Расчеты показывают, что оптимальным является второй способ, так как общая толщина объектива меньше при меньшем количестве элементов. В результате с применением объектива, состоящего из одного элемента, получено пространственное разведение первой и второй гармоник на 5,6 мм в плоскости установки мишени (рис. 3).



Рис. 2. Линзовый объектив

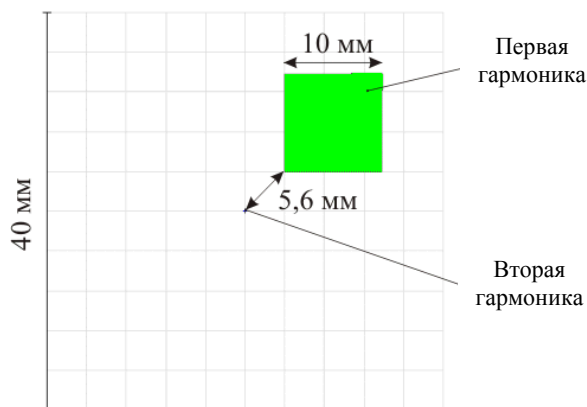


Рис. 3. Положение пятен рассеяния для 1-й и 2-й гармоник относительно друг друга в плоскости установки мишени

Расстояние между осями соседних каналов в кластере выбрано 730 мм, что позволяет разместить вакуумные затворы в одной плоскости; таким образом, абсолютное отклонение центра мишени от оси канала составляет 365 мм.

Проведены исследования по определению оптимальных параметров для варианта схемы ФОМ. При расчетах учитывалась необходимость минимизации длины ФОМ; взаимное расположение элементов, не позволяющее обратноотраженному излучению повреждать компоненты ФОМ; наклон и кривизна поверхностей, при которых обеспечиваются минимальные aberrации, вносимые ФОМ, и др. На рис. 4 показаны пятна рассеяния с учетом геометрических aberrаций, вносимых ФОМ, в том числе и для наклонного падения излучения на объектив. Показано, что в пределах исправленного углового поля $\pm 10^{-3}$ радиан диаметр пятна рассеяния ($\approx 1,5$ мкм), обусловленного геометрическими aberrациями, значительно меньше диаметра дифракционного пятна (15,9 мкм), что говорит о дифракционном качестве схемы.

Конструкция ФОМ (совместно с системой транспортировки лазерного излучения (ЛИ) и информационно-управляющей системой) должна обеспечивать точность наведения ЛИ в заданное положение: в поперечном направлении ± 20 мкм, в продольном ± 40 мкм. В поперечном направлении точность наведения обеспечивается системой поворотных зеркал. В продольном направлении точность зависит также от изменения температуры и давления среды (аргона). Предполагается, что ФОМ работает при температуре среды 23 ± 3 °C и давлениях 775 ± 5 Торр. Зависимость смещения фокальной плоскости ФОМ от изменения температуры и давления среды приведена в табл. 1. В случаях $\Delta T = -3$ °C, $\Delta P = 5$ Торр и $\Delta T = 3$ °C, $\Delta P = -5$ Торр смещение фокальной плоскости максимально и равно 113 и -115 мкм соответственно. Данные значения превышают ± 40 мкм, т. е. для согласования продольного положения фокальной плоскости в зависимости от температуры и давления необходимы их точная диагностика и контроль.

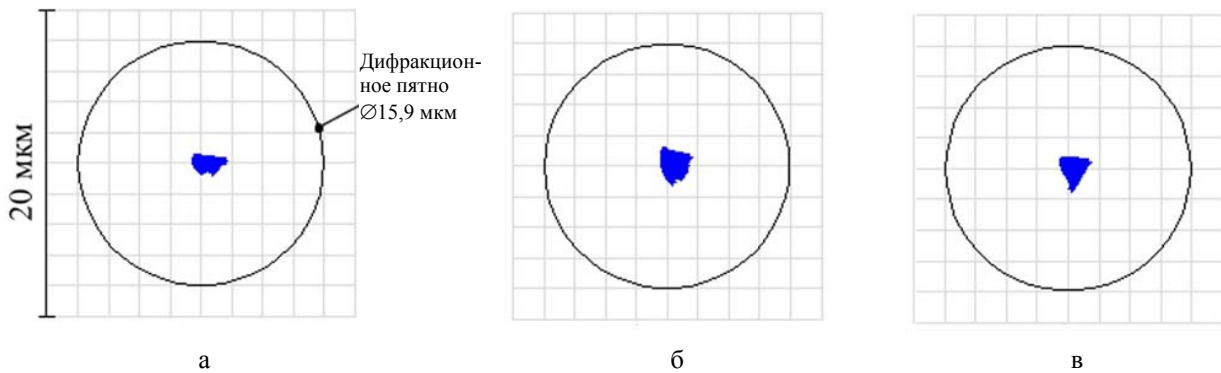


Рис. 4. Расчетное пятно рассеяния в фокальной плоскости ФОМ с учетом вносимых геометрических aberrаций. Кругом выделена область дифракционного пятна: а – угловое поле 0° ; б – угловое поле 10^{-3} рад; в – угловое поле -10^{-3} рад

Таблица 1

Зависимость смещения фокальной плоскости ФОМ
от изменения температуры и давления

T , К	P , Торр	Смещение фокальной плоскости ФОМ, мкм
20	770	57
20	775	85
20	780	113
23	770	-30
23	775	0
23	780	26
26	770	-115
26	775	-87
26	780	-60

В расчетах определены погрешности изготовления и размещения оптических элементов ФОМ (табл. 2).

Клин поверхностей 1, 3, 7, 9 (см. рис. 1) составляет $0,06^\circ$, а размер допуска на наклон поверхностей соизмерим с ним и составляет 0,01–0,05. Исследования показывают, что при наихудшей ситуации, когда погрешности наклона перечисленных поверхностей максимальны, обратно-отраженное излучение второго порядка, идущее в направлении мишени, проходит мимо нее и не повреждает оптические элементы.

С целью моделирования одновременного воздействия на оптическую систему всех допусков проведен анализ ошибок методом Монте-Карло. Для каждого цикла моделирования все параметры, для которых установлены допуски, изменяются случайным образом в соответствии с «нормальным» статистическим распределением. В табл. 2 указаны погрешности для 20 модификаций оптической системы. Статистическая обработка полученных результатов показывает, что в «худшей» модификации размер кружка рассеяния, обусловленный геометрическими aberrациями, в плоскости минимального пятна составляет $D_{\text{RMS}} = 20,7$ мкм. Диаметр пятна по уровню 80 % с учетом дифракции равен $D = 28,2$ мкм, что меньше максимально допустимых 40 мкм (согласно техническому заданию на ФОМ). Максимальное компенсационное смещение фокальной плоскости в продольном направлении $\pm 10,0$ мм.

Таблица 2

Допуски на изготовление и размещение оптических элементов ФОМ

Номер поверхности	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхности										
Погрешность радиуса поверхностей, измеренная в кольцах N , шт.	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$
Нерегулярность поверхности, измеренная в кольцах ΔN , шт.	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
Наклон поверхности, угл. градус	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
Децентрировка поверхности, мм	—	—	—	—	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	—	—	—	—
Погрешность конической постоянной	—	—	—	—	$\pm 10^{-3}$	—	—	—	—	—
Погрешность коэффициента преломления	$\pm 10^{-3}$		$\pm 10^{-3}$		$\pm 10^{-4}$		$\pm 10^{-3}$		$\pm 10^{-3}$	
Элементы										
Наклон элемента, угл. градус	$\pm 1,0$		$\pm 1,0$		$\pm 0,02$		$\pm 0,2$		$\pm 0,3$	
Децентрировка элемента, мм	—		—		± 2		—		—	

В плоскости установки мишени отклонение центра пятна от главной оптической оси в поперечном направлении находится в пределах $\pm 10,2$ мм. Приведенные смещения компенсируются на стадии монтажной юстировки.

Заключение

Представлены результаты расчетного исследования характеристик элементов варианта финального оптического модуля мощной лазерной установки УФЛ-2М. Проведена оптимизация параметров элементов ФОМ. В результате размер пятна рассеяния, обусловленный геометрическими аберрациями, в плоскости установки мишени примерно в 10 раз меньше дифракционного.

Общая длина ФОМ составляет ≈ 900 мм (без учета размера вакуумного затвора).

Определены места локализации обратноотраженного излучения с высокой концентрацией энергии. На основании полученных данных оптимизировано взаимное положение элементов во избежание повреждения элементов ФОМ.

Исследовано влияние температуры и давления окружающей среды на смещение плоскости облучения мишени. Определено, что при температуре $T = 23 \pm 3$ °С и давлении $P = 775 \pm 5$ Торр изменение положения фокальной плоскости ФОМ не превышает ± 115 мкм.

Исследованы необходимые допуски на изготовление и размещение оптических элементов. В результате, с учетом ошибок, заданных в рамках назначенных допусков на изготовление и размещение оптических элементов, среднеквадратический диаметр пятна облучения с учетом только геометрических аберраций равен $D_{\text{RMS}} = 20,7$ мкм (с учетом дифракции $D = 28,2$ мкм).

Список литературы

1. Гаранин С. Г., Бельков С. А., Бондаренко С. В. Концепция построения лазерной установки УФЛ-2М // Сб. докл. XXXIX Международ. конф. по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 2012.
2. Hunt J. T. National Ignition Facility. Performance Review 1999. – Lawrence Livermore National Laboratory, 2000.
3. Adolf A., Boscheron A., Dulac A., Journot E. Final optics design for the «Laser Megajoule» // SPIE. 2010. Vol. 3492.

Final Optical Module of a Powerful Laser Facility UFL-2M with Spatial Separation of the First and Second Harmonics of Radiation at the Target Plane

V. N. Derkach, I. N. Derkach, R. V. Zhukov

The final optical module optical scheme and its components optimization have been conducted in order to minimize aberrations. Aberration analysis was based on geometric ray trace through optical system. Regions identified with high density of energy of radiation reflecting back from the FOM components. Study conducted of the necessary tolerance of materials, production and placement of optical elements. As a result, taking into account the errors specified within the assigned tolerances for production and placement of optical elements, the maximum achieved of scattering spot size does not exceeding 40 micrometers. Influence investigated of the environment temperature and pressure on the amount of the compensation offset at the plane of a target.