

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ФИНАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*И. А. Белов, В. Н. Деркач, И. Н. Деркач, Р. В. Жуков, Б. Г. Зималин,
О. М. Кудряшев, Н. Н. Рукавишников*

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

На основании конструкторской документации создана трехмерная модель финального оптического модуля (ФОМ) мощной лазерной установки в части составляющих его оптико-механических элементов. Экспериментально определены пороги разрушения стандартных материалов, из которых предполагается изготовление конструкции модуля и оправ оптических элементов. В созданной расчетной модели локализованы области оптико-механической конструкции, где плотность энергии обратноотраженного излучения превышает порог разрушения материалов. Предложены меры, направленные на защиту составных частей ФОМ.

Введение

Мощное лазерное излучение, даже сильно ослабленное при многократных отражениях от оптических деталей, может представлять опасность с точки зрения повреждения поверхностей механических элементов конструкции установки. Испарение материалов, на которых превышен порог прочности, может оказаться причиной загрязнения оптических элементов. Попав в интенсивное излучение, частицы материала, находящиеся на поверхности оптической детали, будут гореть, разрушая ее покрытие (зеркальное или

просветляющее). Амплитудные неоднородности оптического тракта, полученные таким образом, далее будут каскадно воспроизводиться, переходя в фазовые искажения и обратно в амплитудные, и приводя к последовательному выводу из строя других элементов оптического тракта.

В данной работе проведен расчет «паразитных» отражений в оптической схеме финального оптического модуля, определены места его конструкции, где порог разрушения материалов превышен. Локализация таких мест необходима для проведения работ по реализации мер, направленных на увеличение порогов повреждения и защиту используемых конструкций и оптических деталей.

Модель финального оптического модуля

Финальный оптический модуль это оптическая система, которая фокусирует пучок и формирует распределение интенсивности излучения на поверхности мишени [1]. В состав ФОМ входят следующие оптические элементы: фазовая пластина (ФП), линза, герметизирующая пластина (ГП) и защитная пластина (ЗП). На рис. 1 согласно конструкторской документации (КД) и расчетной модели показаны оправы перечисленных элементов.

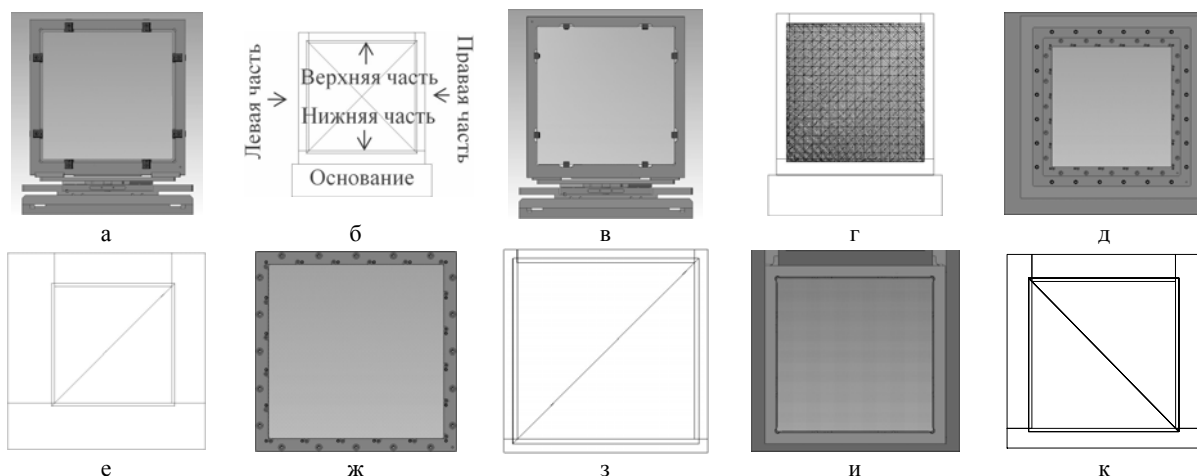


Рис. 1. Оправы ФОМ согласно КД и расчетной модели: а – модель согласно КД оправы и основания ФП; б – оправы и основания ФП, расчетная модель; в – модель согласно КД оправы и основания линзы; г – оправы и основания линзы, расчетная модель; д – модель согласно КД оправы ГП, 1-я по ходу излучения; е – оправы ГП, расчетная модель, 1-я по ходу излучения; ж – модель согласно КД оправы ГП, 2-я по ходу излучения; з – оправы ГП, расчетная модель, 2-я по ходу излучения; и – модель согласно КД оправы ЗП; к – оправы ЗП, расчетная модель

величина поглощения материала в оптическом материале (используется кварц марки HPFS®SG C 7980).

Определение порога разрушения при однократном воздействии излучения на материалы

Исследования лучевой прочности проведены по методике определения оптической устойчивости элементов к действию импульсной лазерной нагрузки. Практическая реализация метода измерения заключалась в том, что на исследуемом объекте позиционировались одновременно несколько пучков, градуированных по величине нагрузки. Повреждение поверхности, сопряженное с положением пучков, наблюдалось визуально под микроскопом. Величина порогового, для разрушения, сигнала определялась как среднее для полей облучения, где еще не наблюдаются и уже наблюдаются признаки абляции поверхности облучаемого материала. Схема стенда для проведения испытаний представлена на рис. 4.

Исходный импульс источника лазерного излучения с гауссовым пространственным профилем интенсивности ($\varnothing 24$ мм по уровню интенсивности 0,1) делится на несколько пучков при прохождении специальной матрицы диафрагм МД ($\varnothing 19$ мм), выполненной в виде нескольких распределенных в одной плоскости апертурных диафрагм (19 диафрагм, $\varnothing 3$ мм каждая). МД выполняет одновременно роль делителя исходного излучения и формирователя апертуры разделенных пучков. Изображение диафрагмы перестраивается на исследуемый образец посредством двух линз Л1 и Л2. Матрица диафрагм располагается в передней фокальной плоскости линзы Л1. В задней фокальной плоскости линзы Л1 внутри вакуумной кюветы, исключая оптический пробой воздуха, установлена диафрагма Д, размером в один дифракционный предел ($\varnothing \approx 2$ мм), предназначенная для формирования разделенных пучков, каждый из которых имеет гауссовый пространственный профиль. На расстоянии 1 м от диафрагмы располагается линза Л2 ($f = 50$ см), в заднюю фокальную плоскость которой перестраивается изображение МД. В результате в плоскости исследуемого образца, размещенного в данной плоскости, формируется 19 разделенных в пространстве лазерных пучков разной интенсивности. Решение схемной и усилительных систем обеспечивает на образцах максимальную нагрузку до 40 Дж/см^2 при энергии излучения ≈ 4 Дж в плоскости расположения МД с изменяемой длительностью импульса. Интегральная (по всем пятнам) энергия излучения и распределение нагрузки по подпучкам контролируются calorиметром и ПЗС камерой (позиции К и CCD1 на рис. 4) при отражении от оптического клина, расположенного перед образцом. Длина волны излучения равняется $\lambda = 1,054$ мкм.

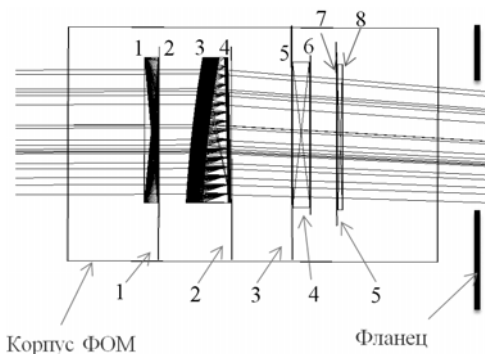


Рис. 2. Положение мест оправ и корпуса ФОМ, где проводится измерение лучевой нагрузки и нумерация оптических поверхностей канала ФОМ. Расчетная модель: 1 - оправа ФП; 2 - оправа линзы; 3 - оправа ГП, 1-я по ходу излучения; 4 – оправа ГП, 2-я по ходу излучения; 5 – оправа ЗП. Цифры 1–5 снизу показывают места оправ, корпуса ФОМ, где проводится измерение лучевой нагрузки. Цифры 1–8 сверху – нумерация поверхностей оптических элементов по ходу излучения

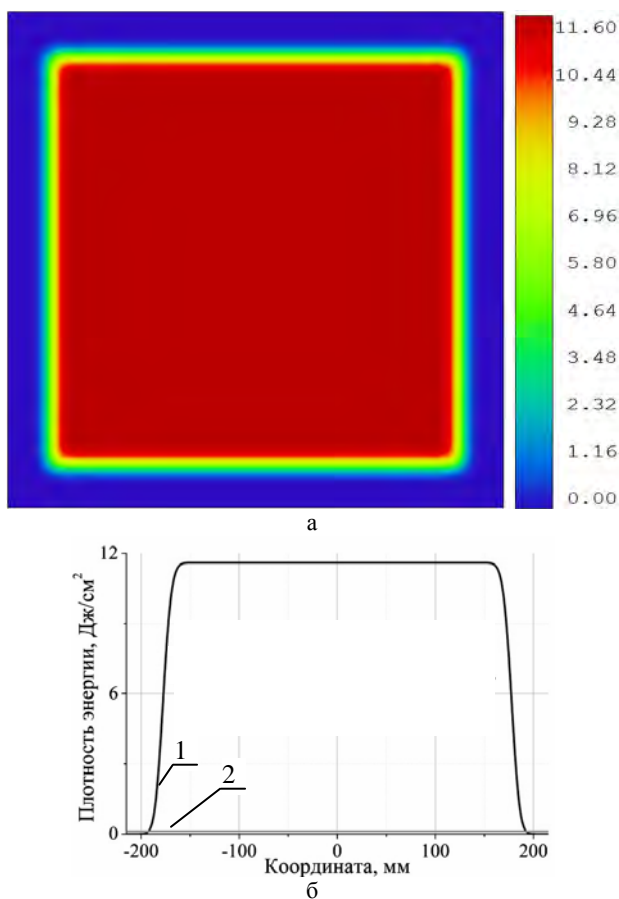


Рис. 3. Распределение плотности энергии: а – на входе в ФОМ двумерное, б – в центральном сечении. 1 – сечение пучка на входе в ФОМ, 2 – уровень 0,01 от пиковой плотности энергии

При попадании полученных лучей на другие оптические поверхности они так же разделяются на две части и т. д. В расчетах не учитывается, ввиду малости,

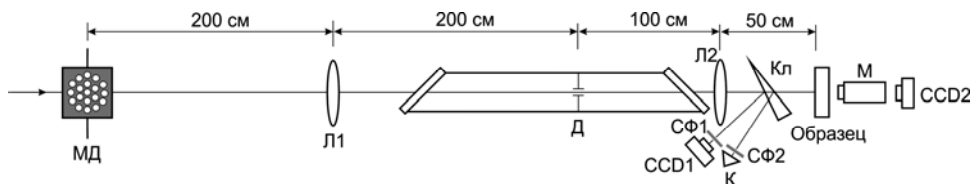


Рис. 4. Оптическая схема определения порога разрушения при однократном воздействии излучения на материалы: МД – матрица диафрагм; Л1, Л2 – линзы с фокусными расстояниями 200 см, 50 см; Д – диафрагма диаметром 2 мм; Кл – клин; СФ1 и СФ2 – светофильтры; К – калориметр; CCD1 и CCD 2 – CCD-камеры; М – микроскоп

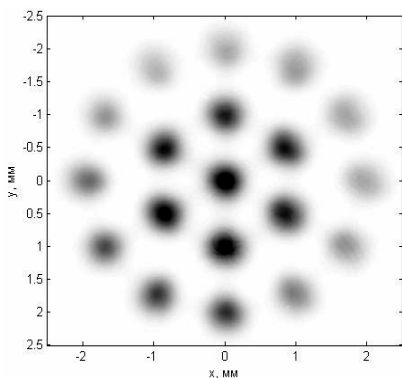


Рис. 5. Изображение ближней зоны матрицы пучков на исследуемом образце

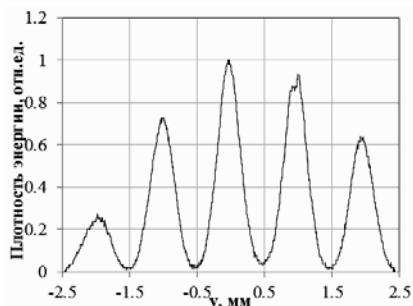


Рис. 6. Пространственный профиль плотности энергии по вертикали

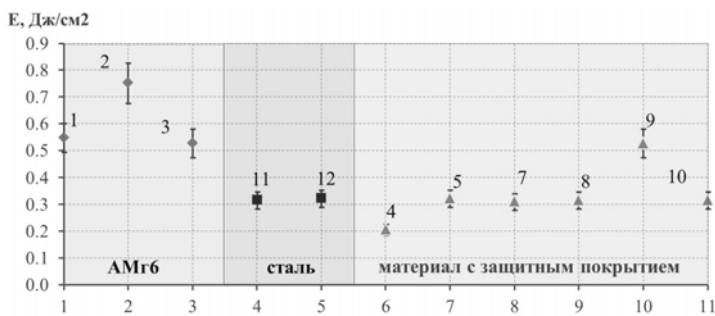


Рис. 7. Порог разрушения материалов (длина волны $\lambda = 1,054$ мкм).

- 1 – АМг6 $\sqrt{Rz20}$; 2 – АМг6 $\sqrt{Rz10}$; 3 – АМг6 $\sqrt{Ra2,5}$;
 4 – АМг6 $\sqrt{Rz20}$ с Ан. Окс. нх; 5 – АМг6 $\sqrt{Rz20}$ с Аноцвет. нв.;
 6 – Сталь 10 $\sqrt{Rz20}$ с Кд. хр.; 7 – Сталь 10 $\sqrt{Rz20}$ с Ц. хр.;
 8 – Сталь 10 $\sqrt{Ra2,5}$ с Кд. хр.; 9 – Сталь 10 $\sqrt{Ra2,5}$ с Кд. хр.;
 10 – Сталь 10 $\sqrt{Ra2,5}$ с Ц. хр.; 11 – Сталь 12X18Н10Т $\sqrt{Rz20}$;
 12 – Сталь 14X17Н2 $\sqrt{Rz20}$

Изображение типичной ближней зоны облучения образца представлено на рис. 5, а пространственный профиль матрицы пучков на исследуемом образце – на рис. 6.

Всего проведено испытаний 12 образцов. Результаты представлены на рис. 7. Значения плотности энергии приведены по методу, согласно [2], к длительности импульса по полувысоте, равной 3 нс.

По результатам испытаний для использования в оправках и конструкции ФОМ рекомендовано использование материала АМг6 $\sqrt{Rz10}$, как имеющего наибольшую величину порога разрушения.

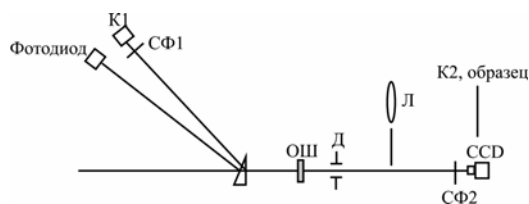


Рис. 8. Оптическая схема экспериментов по определению порога разрушения в частотном режиме облучения материалов: Д – диафрагма диаметром 7мм; Л – линза с фокусными расстоянием 10 см; Кл – клин; СФ1 и СФ2 – светофильтры; К1, К2 – калориметры; CCD – CCD-камера; ОШ – оптоволоконная шайба

Исследование порогов разрушения материала при многократном воздействии излучения. Зависимости порогов от длины волны излучения

Для проведения измерения порога разрушения материала при многократном воздействии излучения использовался лазер накачки петаваттного канала установки «Луч». Длина волны первой гармоники $\lambda_{1\omega} = 1,054$ мкм, второй $\lambda_{2\omega} = 0,527$ мкм. Измерения проводились по схеме, представленной на рис. 8.

Излучение с выхода оптоволоконной шайбы ОШ через диафрагму Д попадало на CCD-камеру или заменяющий ее образец. Измерение энергии, поступающей на образец, проводилось в откалиброванной эквивалентной схеме. Частота выстрелов равна 1 Гц. Полученная зависимость плотности энергии, при которой происходит разрушение поверхности, от разного количества выстрелов для выбранного материала АМг6 $\sqrt{Rz10}$ показана на рис. 9. Длительность импульса 3 нс.

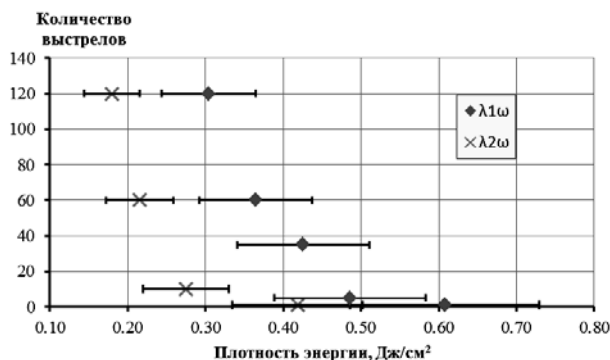


Рис. 9. Зависимость плотности энергии, при которой происходит разрушение поверхности, от разного количества выстрелов. Материал АМг6 $\sqrt{Rz10}$

Видно, что уменьшение значения длины волны излучения сопровождается снижением плотности энергии, необходимой для достижения порога разрушения примерно в 1,7 раза. Так порог разрушения для 1ω и 2ω при 120 выстрелах составляет 0,30 Дж/см² и 0,18 Дж/см² соответственно. Увеличение количества выстрелов с 1 до 120 в одно и то же место приводит к снижению значения порогов примерно вдвое.

Расчетное определение мест конструкции с превышением порога разрушения

Лазерное излучение с высокой плотностью энергии может повреждать элементы конструкции ФОМ. Для локализации таких мест проведен анализ бликов от оптических поверхностей ФОМ и рассчитана максимальная плотность энергии излучения,

падающего на элементы конструкции. Согласно рис. 9 для второй гармоники ($\lambda = 0,527$ мкм) порог разрушения составляет 0,18 Дж/см². Исходя из опыта работы мощных лазерных установок, максимальная плотность энергии может превосходить среднее значение в несколько раз. Так для установки NIF этот коэффициент ≈ 2 [3]. В данной работе взят коэффициент 3. Поэтому, в дальнейших расчетах определим для оценок пороговую величину плотности энергии, при котором происходит разрушение поверхности, как $\varepsilon_0 = 0,06$ Дж/см².

Результаты расчетов бликов от поверхностей оптических элементов ФОМ приведены в таблице.

В качестве примера визуализации результатов, на рис. 10 представлено распределение лучевой нагрузки на поверхности оправы ФП. Основной вклад в значение плотности энергии вносит блик 1-го порядка от поверхности № 8. Необходимо отметить, что та же поверхность № 8 определяет превышение порога разрушения и для других поверхностей конструкции ФОМ.

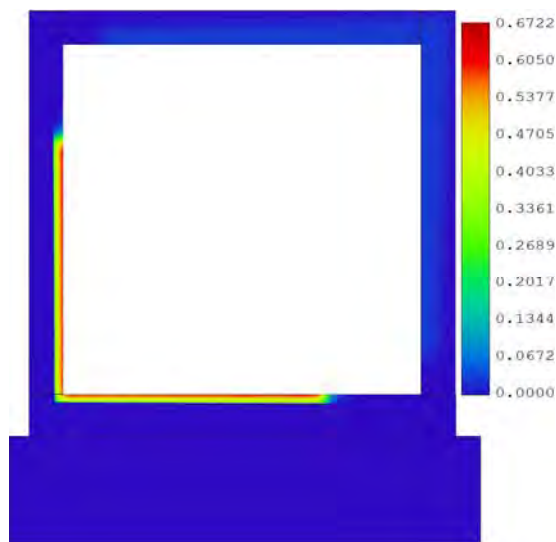


Рис. 10. Распределение плотности энергии бликов на оправе ФП. Основной вклад в значение плотности энергии вносит блик 1-го порядка от поверхности № 8

Пиковые плотности энергии на элементах конструкции ФОМ, полученные при моделировании

Название элемента	Пиковая плотность энергии, Дж/см²				
	Левая часть	Верхняя часть	Правая часть	Нижняя часть	Основание
Оправа ФП	6,72E-01	3,31E-02	3,28E-02	6,60E-01	2,58E-04
Оправа Линзы	3,36E-01	1,01E-03	9,91E-04	3,47E-01	4,50E-04
Оправа ГП (1-я по ходу излучения)	4,51E-02	9,81E-04	9,17E-04	4,44E-02	—
Оправа ГП (2-я по ходу излучения)	4,76E-02	9,23E-04	9,18E-04	4,74E-02	—
Оправа ЗП	5,23E-02	9,06E-04	8,80E-04	5,35E-02	—
Корпус ФОМ	4,80E-03	1,67E-03	1,72E-03	2,38E-03	—
Фланец	3,48E-01				

Лучевая нагрузка, превосходящая порог разрушения ε_0 , приходится на левые и нижние части оправы ФП (6,60E-01–6,72E-01 Дж/см²), левые и нижние части оправы линзы (3,36E-01–3,47E-01 Дж/см²) и на Фланец (3,48E-01 Дж/см²). Поэтому необходимы меры, по защите данных поверхностей от повреждения.

Вопрос защиты поверхностей конструкции ФОМ от возможного разрушения действием излучения сводится к:

- нанесению просветляющего покрытия на поверхность № 8;

- выбору способа «обработки» поверхности материала, что приведет к увеличению значения порога разрушения;

- покрытию критических мест защитным стеклом, предотвращающим разлет частиц испаренного материала и попадание их на оптические компоненты.

Все, отмеченные в таблице места с превышением порогового значения плотности энергии, получены с учетом отражения от поверхности № 8. Этот факт определяет еще один возможный сценарий: изменение угла наклона защитной пластины с тем, чтобы отражение от поверхности № 8 в обратном ходе попадало в световую апертуру оптических элементов и не попадало на поверхности конструкции ФОМ.

С точки зрения выбора материала оправ решение может заключаться в предварительной «обработке» поверхности (или специально выделенной его части). Под обработкой следует понимать комплекс мер, направленный на увеличение величины порога и закрепление этого свойства. Основными средствами «защиты» могут являться:

- увеличение площади детали, находящейся под действием излучения, в том числе, и за счет профилирования;

- проведением обработки поверхности методами лазерного упрочнения (отжига поверхности).

- увеличение доли отражения (уменьшения поглощения) излучения от поверхности. Однако в этом случае необходимо учесть отражение не только от поверхностей оптических элементов, но и от данных поверхностей конструкции ФОМ.

Последний эффект, в частности, может обеспечиваться напылением зеркального слоя на часть поверхности.

Закрытие мест, где превышен порог разрушения защитным стеклом, может оказаться наиболее выгодным способом защиты оптических элементов от продуктов абляции. Так частицы испаренного материала остаются в объеме, между поверхностью материала и защитным стеклом, и не попадают на оптические поверхности. В этом случае нет необходимости в дополнительной обработке поверхностей и гарантируется отсутствие загрязнения оптических элементов продуктами абляции. Держатели оптических элементов рекомендуется так же «одеть» в защитное стекло. Либо нанести отражающее покрытие и сделать поверхности выпуклыми. Последнее позволит отраженное от них излучение рассеивать. Прокладки

между кварцем и держателями необходимо так же защитить от излучения высокой плотности энергии.

Заключение

Создана модель оптических элементов и механической конструкции ФОМ.

Проведены работы по определению в импульсном режиме значений плотности энергии, при которых происходит разрушение поверхности материалов. Экспериментально исследованы материалы: разные виды сталей и алюминиевый сплав АМг6 с разной степенью чистоты обработки поверхностей. Также проведены опыты по облучению материалов, защищенных покрытием. Наибольшей устойчивостью к воздействию излучения обладает АМг6, имеющий обработку поверхности $\sqrt{Rz}10$.

Найдено, что уменьшение значения длины волны излучения сопровождается снижением плотности энергии, необходимой для достижения порога разрушения, примерно в 1,7 раза. Так порог разрушения для длины волны излучения первой ($\lambda = 1,054$ мкм) и второй ($\lambda = 0,527$ мкм) гармоники для длительности импульса 3 нс при 120 выстрелах составляет 0,30 Дж/см² и 0,18 Дж/см² соответственно. Увеличение количества выстрелов с 1 до 120 в одно и то же место приводит к снижению значения порогов примерно вдвое.

Проведены расчеты обратно отраженных сигналов с целью локализации мест с лучевой нагрузкой, превышающей порог разрушения. Получено, что критическая лучевая нагрузка приходится на оправы фазовой пластины (6,60E-01–6,72E-01 Дж/см²), линзы (3,36E-01–3,47E-01 Дж/см²), и на поверхности фланца (3,48E-01 Дж/см²).

Предложены методы защиты элементов механической конструкции от разрушений, вызванных воздействием лазерного излучения, а также методы защиты оптических элементов от продуктов разрушения материалов.

Литература

1. Деркач В. Н., Деркач И. Н., Жуков Р. В. Финальный оптический модуль установки «установка нового поколения» с пространственным разведением излучения первой и второй гармоники в плоскости установки мишени // Сборник работ ВНИИЭФ. 2015. Т. 20, № 1. С. 396.
2. Берченко Е. А., Кошкин А. В., Соболев А. П., Федюшин Б. Т. Влияние длины волны лазерного излучения на порог плазмообразования при облучении непрозрачных материалов // Квантовая электроника, 1981, Т. 8, № 7. С. 1582–1583.
3. Conder A., Alger T., Azevedo S., Chang J. et al. Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility // LLNL, November 12, 2007.