

СТЕНД КОНТРОЛЯ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

*С. В. Кошечкин, О. М. Кудряшев, И. В. Кузьмин, С. А. Макаров, С. В. Мочкаев,
А. В. Савкин, О. В. Триканова, О. А. Шаров*

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

Введение

При создании лазерных установок важным фактором является лучевая прочность используемых оптических элементов: активных элементов для усилителей, просветляющих покрытий линз, отражающих покрытий зеркал.

Для определения лучевой прочности существуют различные методы, которые можно принципиально разделить на две группы. Первая группа рассматривает лучевую прочность как пороговую величину, например [1], а вторая использует вероятностный подход. Разработаны международные стандарты [2, 3], применяемые для определения лучевой прочности, в основе которых лежит вероятностный подход. В России в настоящее время не существует единого стандарта определения лучевой прочности, поэтому в лабораториях применяются различные методы, основанные, как правило, на определении порога разрушения.

Стенд контроля на лучевую прочность позволяет исследовать образцы по методикам из обеих групп. Стенд состоит из лазера на основе кристалла Nd:YAG с длиной волны 1064 нм, системы деления излучения на однопучковый и матричный канал оперативного контроля, системы наведения излучения на образец, системы контроля параметров излучения и системы определения лучевой прочности испытываемого образца.

На стенде предусмотрена возможность работы в режиме сканирования образца по всей площади пучком диаметром ≈ 1 мм по методике аналогичной ISO 1-on-1.

Матричный канал позволяет формировать на исследуемом образце матрицу пучков с гауссовым распределением (отдельные лазерные пучки в матрице имеют распределения близкие к гауссовым). Порог разрушения с помощью данной методики определяется, в большинстве экспериментов, с одного выстрела с точностью $\sim 10\%$ [4].

Методы определения лучевой прочности

Одним из методов, относящихся к первой группе, то есть к методам определения порога разрушения, является многократное облучение поверхности исследуемого образца мощным лазерным пучком с постепенно увеличивающейся энергией [1]. Испытания начинают с плотности энергии, не вызывающей разрушения образца, постепенно увеличивая ее до появления микродефектов. При этом облучают каждый раз новый участок поверхности. За величину порога разрушения образца принимается плотность энергии, равная среднему значению между максимальной величиной $\varepsilon_0 = \varepsilon^-$, при которой разрушение поверхности еще не наблюдается, и минимальной величиной $\varepsilon_0 = \varepsilon^+$, при которой уже появляются микродефекты, т. е.

$$\varepsilon_{\text{пор}} = \frac{(\varepsilon^+ + \varepsilon^-)}{2}$$

Другой метод [5], также относящийся к первой группе, позволяет при наличии серии пятен облучения, полученных на единичном образце, не только оценить пороговую плотность энергии, но и учесть в определенной мере статистический характер процесса разрушения поверхности. Рисунок 1 иллюстрирует вышеупомянутую методику, суть которой заключается в следующем (сверху на рисунке представлено поверхностное разрушение стекла, снизу распределение плотно-

сти энергии в пучке). Если плотность энергии в пятне облучения заметно превышает порог разрушения, то на исследуемой поверхности образуется круговая область, заполненная разрушенными участками.

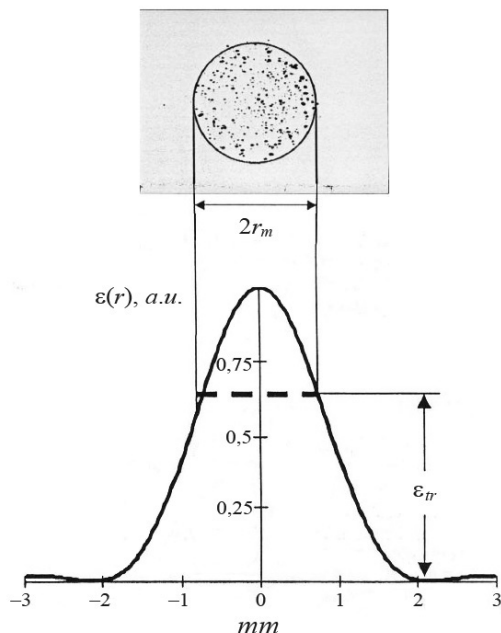


Рис. 1. Иллюстрация для специального метода определения порога разрушения

Вероятностный характер возникновения пробоя, позволяет считать, что граница по контуру наиболее удаленных точек разрушений соответствует пороговому уровню плотности энергии для данного образца. Зная закон распределения энергии в пятне облучения $\varepsilon(r)$, нетрудно определить и уровень плотности энергии $\varepsilon(r_m)$, соответствующий наиболее удаленным точкам разрушений, т. е. определить энергетический порог разрушений в данном пятне облучения. Сверху рис. 1 показан круговой контур, ограничивающий зону разрушений по наиболее удаленным точкам.

Указанным образом определяется пороговая плотность энергии для каждого из N пятен однократного облучения исследуемого образца, в которых зарегистрированы разрушения поверхности. Полученные данные позволяют не только вычислить среднее значение порога по серии экспериментов, но и построить гистограмму, характеризующую разброс полученных значений.

В РФ разработано и запатентовано устройство для экспресс метода определения лучевой прочности [4]. Метод относится к первой группе и заключается в следующем. Исследуемый образец облучается не многократно одним лазерным пучком с постепенным увеличением энергии, а 1–2 раза матрицей пучков с разной плотностью энергии, в которой максимальная плотность энергии превышает ожидаемую лучевую прочность образца. По картинке разрушения образца и распределению интенсивности лазерного излучения на образце определяются два пучка: один с максимальным значением плотности энергии, при котором разрушение еще не фиксируется, второй – с минимальным значением плотности энергии, при котором регистрируется разрушение. Порогом разрушения исследуемого образца является среднее значение между этими двумя плотностями энергии.

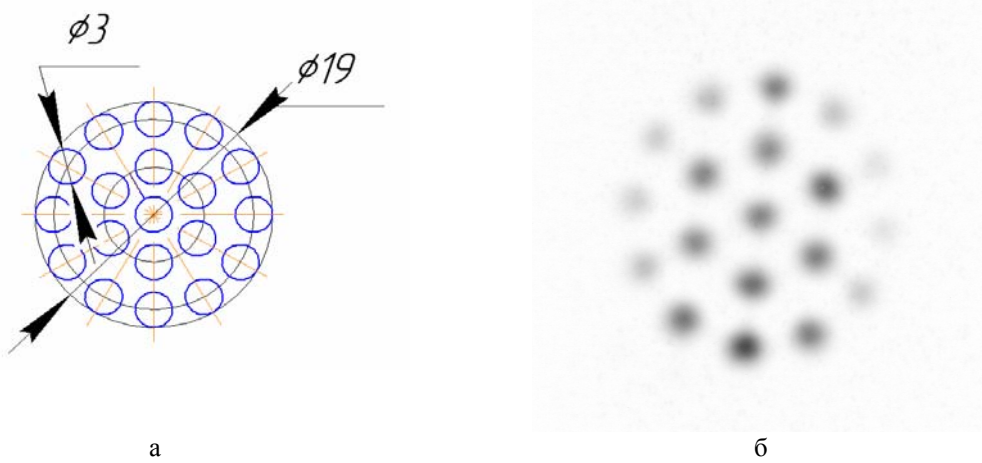


Рис. 2. Изображение матрицы диафрагм (а), соответствующее ей изображение пучка в плоскости образца (б)

Ко второй группе методов определения лучевой прочности, широко используемых за рубежом [2, 3], относятся международные стандарты «1–на–1» и «S–на–1».

«1–на–1»: исследуемый образец подвергается облучению серией импульсов излучения с одинаковой энергией, причём каждый последующий импульс смещается по горизонтали на некоторое расстояние относительно предыдущего участка облучения. Затем энергия излучения увеличивается, и облучение образца проводится по следующему нижележащему ряду и т. д. После этого для каждой энергии определяют число выстрелов, при которых произошло разрушение образца и строится зависимость вероятности разрушения образца от плотности энергии излучения [2].

«S–на–1»: аналогичен «1–на–1» за исключением того, что облучение каждого конкретного участка происходит не однократно, а до тех пор, пока не будет обнаружено разрушение или не будет достигнуто определенное заранее количество облучений S [3]. По результатам исследования определяется срок службы (количество облучений) образца при определенном значении плотности энергии.

Для обнаружения разрушений после облучения образца используются визуальная (глазом, с помощью микроскопа, с помощью регистрации изображения испытываемого образца на камеру и т. д.) или автоматическая регистрация разрушений (например, с помощью микроскопа с анализатором изображения).

Стенд контроля на лучевую прочность

Обобщенная схема стенда контроля на лучевую прочность представлена на рис. 3.

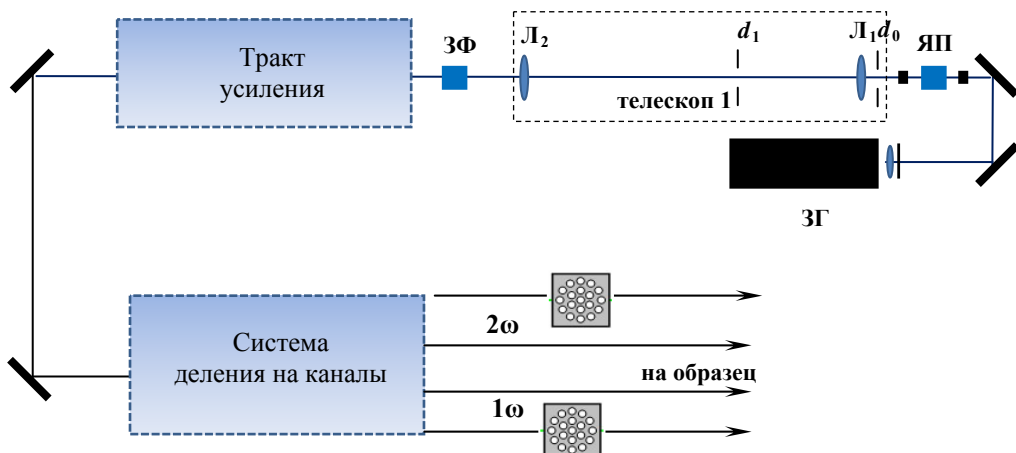


Рис. 3. Обобщенная схема стенда контроля на лучевую прочность

В задающем генераторе (ЗГ) формируется импульсы с энергией ≈ 20 мкДж, длительностью на полувысоте ≈ 25 нс, длиной волны 1064 нм, следующие с частотой до 100 Гц. Из серии импульсов ЗГ вырезается импульс определённой формы и длительности с требуемой частотой до 10 Гц.

Система вырезания импульса располагается непосредственно на выходе ЗГ, до пространственного фильтра (телескопа 1), осуществляющего согласование апертуры лазерного пучка, угловую селекцию излучения в дальней зоне (ДЗ) и формирующего гауссовый пространственный профиль пучка. Пространственные характеристики пучка после вырезания формируются диафрагмой $\varnothing 1,5$ мм, расположенной в ближней зоне и расширяющим телескопом кратностью 1:2 с нулевой селектирующей диафрагмой $\varnothing 400$ мкм, расположенной в дальней зоне. Для оптической развязки каскада усиления и ЗГ на выходе телескопа 1 установлен затвор Фарадея.

Усилительный тракт состоит из двух квантронов с активным элементом $\varnothing 5$ мм и с активным элементом $\varnothing 10$ мм, работающих в двухпроходном режиме (рис. 4) [6]. Такая конфигурация была выбрана по результатам исследований оптимальной схемы усиления.

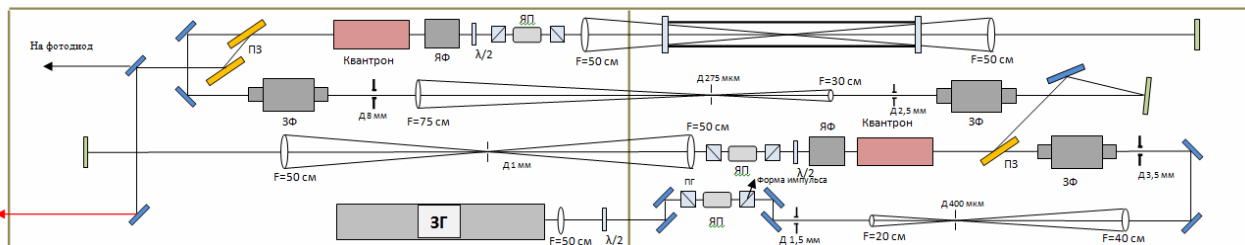


Рис. 4. Схема двухпроходного усиления с двумя квантронами

Затворы Фарадея используются для оптической развязки ЗГ и усилителей. Затворы Поккельса обеспечивают отсутствие самовозбуждения в схеме усиления и формируют временной профиль усиливаемого импульса. По результатам проведенных исследований была выбрана конфигурация системы вырезания, позволяющая получить гладкую форму импульса с длительностью на полувысоте ≈ 3 –10 нс при минимизации потерь энергии (рис. 5).

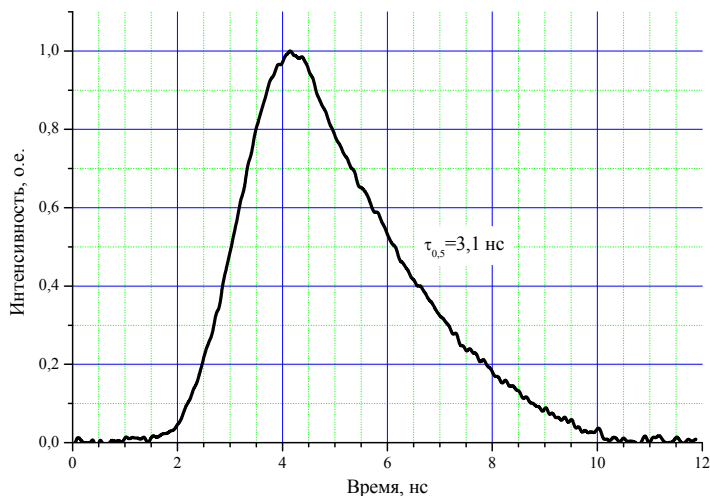


Рис. 5. Оциллограмма усиленного импульса на выходе тракта усиления

Через усилители $\varnothing 5$ мм проходит пучок диаметром ≈ 3 мм, затем пучок увеличивается до размера ≈ 6 –7 мм. Усиленный лазерный пучок имеет диаметр ≈ 8 мм с распределением плотности энергии, представленным на рис. 6.

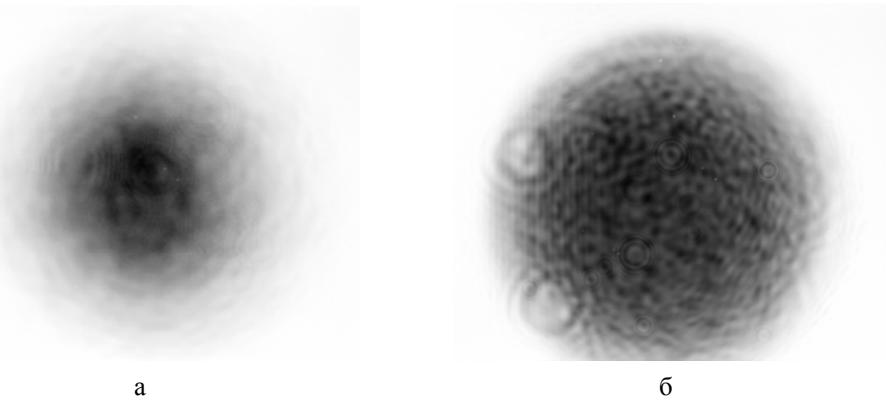


Рис. 6. Изображение пучка на выходе схемы без усиления (слева), изображение пучка на выходе схемы лазера при рабочем усилении (справа)

Используемая схема лазера позволяет получать импульс с энергией до $\approx 0,7$ Дж (статистический разброс менее 10 %) и регулируемой длительностью $\approx 3-10$ нс. При этом плотность энергии в матричном и однопучковом каналах на первой гармонике более 40 Дж/см². Данные параметры позволяют использовать стенд как для измерения порога, так и для определения вероятности разрушения оптических элементов.

Система деления излучения на каналы и регистрация параметров лазерного импульса

Система деления пучка на каналы располагается после схемы усиления, на выходе которой установлен затвор Фарадея для оптической развязки (рис. 7). Система деления пучка предназначена для выбора режима работы стенда контроля на лучевую прочность и выполнена на основе поляризационных зеркал [7]. Полуволновые пластинки, расположенные перед парами таких зеркал позволяют выбирать рабочий канал, а также регулировать энергию, проходящую в выбранный канал. На стенде предусмотрена возможность работы в четырех режимах: однопучковый, разработанный на базе международного стандарта [2], на длине волны 1064 нм – для сканирования образца целиком пучком с диаметром ≈ 1 мм; матричный на длине волны 1064 нм – для использования экспресс методики определения лучевой прочности [4] и такие же два режима на второй гармонике (532 нм).

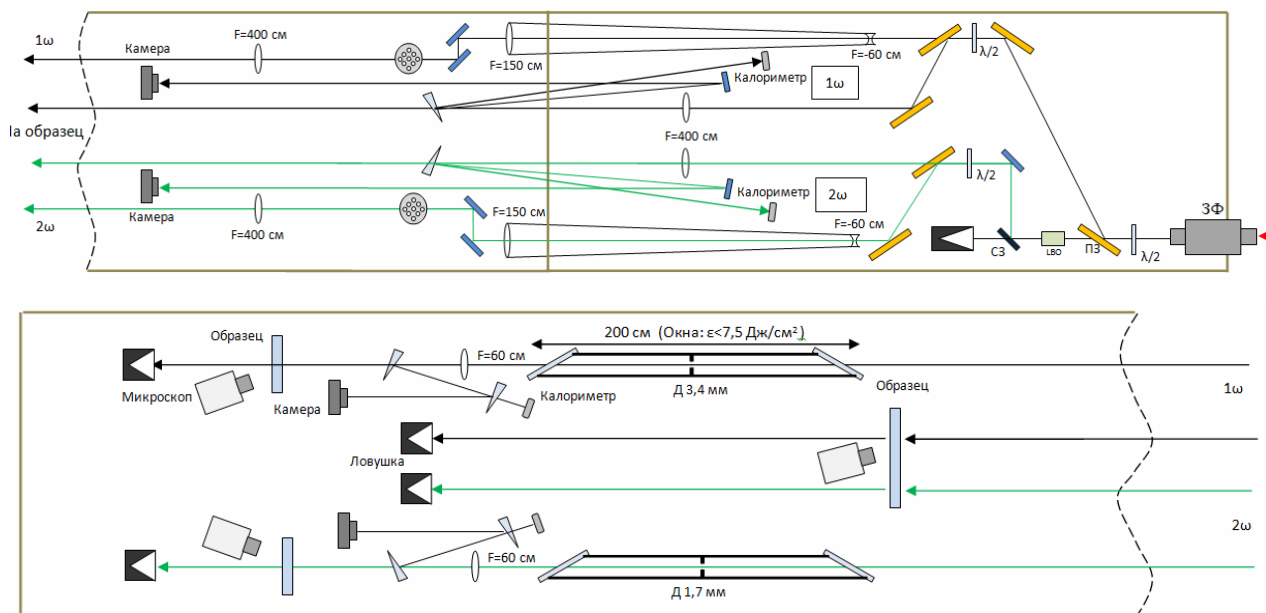


Рис. 7. Схема четырех каналов на стенде контроля на лучевую прочность

В однопучковом канале лазерный пучок диаметром ≈ 8 мм фокусируется линзой с фокусным расстоянием $f = 4$ м, в фокальной плоскости которой располагается образец. В плоскости образца пучок имеет диаметр ≈ 1 мм (рис. 8). Подсветка места облучения осуществляется юстировочным лазером. На то же место наведен микроскоп с камерой для наблюдения дефектов в случае разрушения.

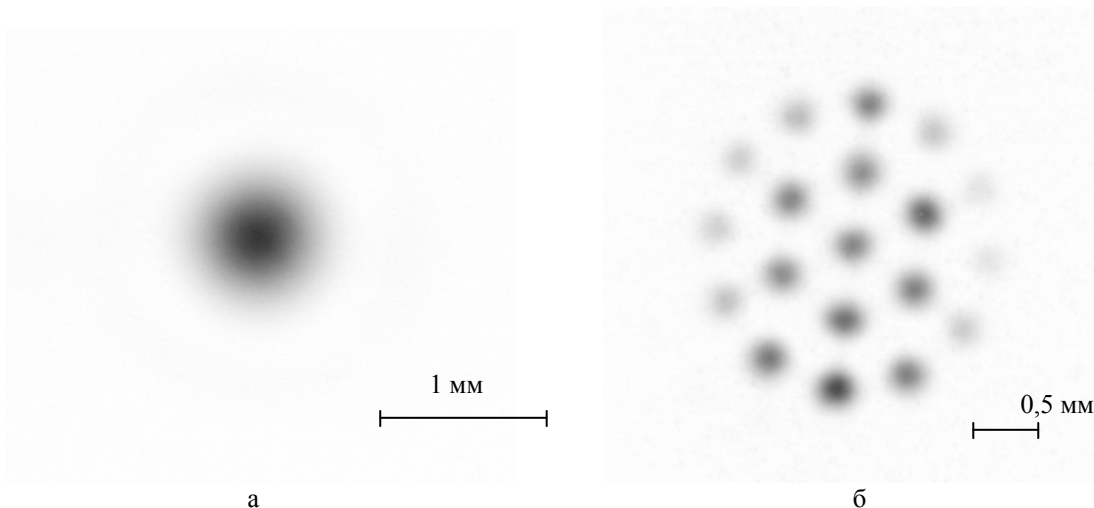


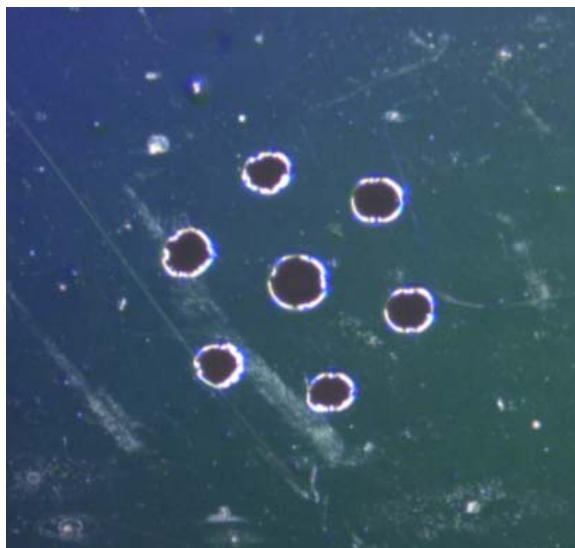
Рис. 8. Изображение пучков на образце в однопучковом канале (а), в матричном (б)

Диаметр матрицы диафрагм составляет 19 мм и для заполнения ее излучением апертура пучка увеличивается до ≈ 20 мм. Плоскость матрицы перестраивается на образец телескопом с фокусными расстояниями линз 400 см и 60 см. В телескопе установлена вакуумная перетяжка с селективирующей диафрагмой размером в один дифракционный предел для предотвращения пробоя воздуха и формирования гауссового профиля каждого из пучков в матрице в плоскости образца (рис. 8).

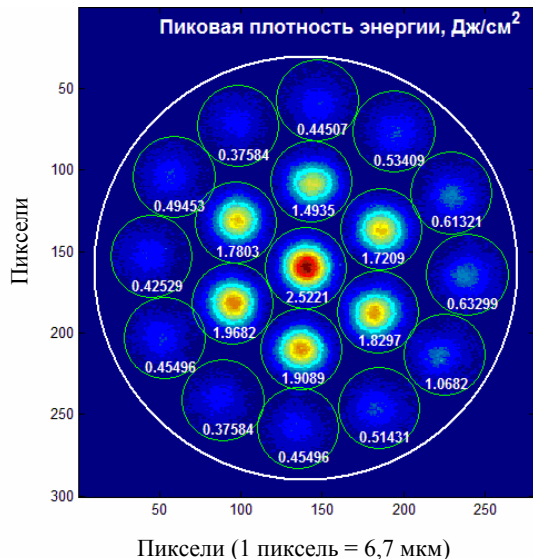
В каждом канале имеется система регистрации параметров усиленного лазерного импульса: часть излучения отражается от клина и попадает на калориметр и камеру. Соотношение между энергиями на калориметре и образце установлено экспериментально и проверено расчетом по формулам Френеля. Временная форма импульса регистрируется на выходе лазера перед системой деления, при этом в однопучковом канале предусмотрена возможность регистрации временного профиля после прохождения исследуемого образца. В матричном канале импульс регистрируется в плоскости, сопряженной плоскости образца.

В однопучковом канале исследуемый образец устанавливается на моторизированной оправе с возможностью дистанционного управления и перемещения по двум координатам в плоскости перпендикулярной направлению излучения.

Эффективный диаметр и плотность энергии в пучке, падающем на образец, определяется с помощью алгоритма, реализованного в среде Matlab, куда импортируется изображение, зарегистрированное камерой и энергия с калориметра (рис. 9,б).



а



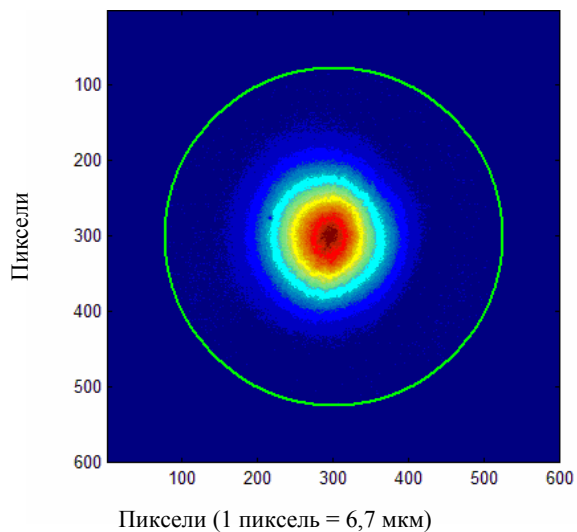
б

Рис. 9. Пример разрушения образца при использовании экспресс-методики (а), изображение пучков в плоскости образца с расчетными плотностями энергии (б)

На рис. 10 представлен пример разрушения золотой дифракционной решетки при использовании однолучевого режима для пучка с пиковой плотностью энергии ≈ 1 Дж/см² при длительности импульса 7 нс.



а



б

Рис. 10. Пример разрушения образца при использовании однолучевого режима (а), изображение пучка в плоскости образца с пиковой плотностью энергии ≈ 1 Дж/см²

Заключение

Создан стенд контроля лучевой прочности, на основе Nd:YAG лазера, позволяющий работать в разных режимах: первая гармоника Nd:YAG лазера (1064 нм), вторая гармоника (532 нм), однолучевой канал, матричный канал на основе запатентованного в РФ устройства. На выходе лазера получен импульс с энергией до $\approx 0,7$ Дж (статистический разброс менее 10 %) и длительностью

≈ 3 нс. При этом максимальная плотность энергии в матричном и однопучковом каналах на первой гармонике более 40 Дж/см². Данные параметры позволяют использовать стенд контроля на лучевую прочность как для экспресс-методики определения порога разрушения оптических элементов, так и для сканирования целого образца по методике аналогичной ISO 1-on-1.

Список литературы

1. Алексеев В. П., Бессараб А. В., Гаранин С. Г., Дмитриев Д. И. и др. Исследование лучевой прочности поверхности экспериментального лазерного стекла // Оптический журнал, 2002. Т. 69, № 1. С. 11–15.
2. International standard ISO 11254-1_2000 First edition 2000-06-01.
3. International standard ISO 11254-2_2001 First edition 2001-09-15
4. Зималин Б. Г., Савкин А. В., Сухарев С. А., Шаров О. А. Устройство для определения лучевой прочности оптических элементов. Патент РФ на полезную модель № 90205, 2009 г.
5. Alekseev V. N., Bessarab A. V., Charukhchev A. V., Chernov V. N., Kotilev V. N., Liber V. I., Rukavishnikov N. N., Sirazetdinov V. S. Express method for estimating surface resistance of optical components to laser-induced damage. Book of abstr. XXVI European Conf. on Laser Interaction with Matter (ECLIM 2000). - Prague, 2000, p. 221.
6. Мак А. А., Сомс Л. Н., Фромзель В. А., Яшин В. Е. Лазеры на неодимовом стекле. М.: Наука, 1990. С. 266
7. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И., Кириллов Г. А., Кочемасов Г. Г., Курунов Р. Ф., Муругов В. М., Сухарев С. А. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС энергией 3,3 кДж и длительностью 4 нс, Квантовая электроника, 2005, т. 35, № 4, с. 299–301.