

СОЗДАНИЕ СТЕНДА И ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕСТИРОВАНИЯ АКТИВНЫХ ДИСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА НАЛИЧИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

Б. Г. Зималин, С. В. Кошечкин, И. В. Кузьмин, С. А. Макаров,
С. В. Мочкаев, В. А. Островский, А. В. Савкин

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

Введение

Активные дисковые элементы (АДЭ) мощных многоканальных лазерных установок на неодимовом фосфатном стекле производятся из заготовок, варка которых осуществляется в платиновых тиглях. Это практически неизбежно ведет к попаданию в стекло частиц платины, что при последующем воздействии лазерного излучения приводит к возникновению разрушений в объеме АДЭ. Поэтому важнейшим параметром качества активных элементов для мощных твердотельных лазерных систем, работающих на фосфатном стекле, является число и размер металлических микровключений платины.

Согласно модели разрушения лазерного стекла из-за наличия платиновых включений, предложенной в [1], лазерное излучение поглощается платиной, при этом тонкий слой платины с фронтальной стороны включения испаряется. Ударная волна проходит сквозь частицу и передается в стекло. Стекло, являясь хрупким материалом, трескается вследствие ударной волны и давления, создаваемого испарившейся платиной. Это разрушение распространяется до тех пор, пока давление паров платины не станет ниже требуемого для дальнейшего распространения трещин.

Визуальный осмотр объема крупногабаритного АДЭ имеет предел обнаружения порядка 30 мкм [2], наблюдения с помощью микроскопа требуют значительного времени. Для визуализации пузырей и непрозрачных микровключений внутри объема стекла АДЭ применяется метод торцевой подсветки [3] с использованием матрицы мощных светодиодов. Пузыри и микровключения становятся видимыми как яркие точки – центры рассеяния излучения подсветки, тогда как пыль на поверхности образца подсвечивается слабо.

Наиболее эффективным методом обнаружения металлических включений является тест на разрушение. Метод тестирования на разрушение заключается в том, чтобы подвергнуть каждую точку образца мощному лазерному облучению. Серия лазерных импульсов из 5–10 выстрелов с плотностью энергии, выше пороговой, позволяет создать в местах нахождения металлических микровключений разрушения, обнаружимые оптическими методами (>30 мкм). Дополнительная серия облучений из 90–100 выстрелов позволяет увеличить разрушения до максимального размера [2, 4, 5].

Целью настоящей работы является создание лазерного стенда и отработка основ методики контроля АДЭ на наличие металлических микровключений.

Стенд контроля активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений

Для контроля активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений создан специальный лазерный стенд, который состоит из следующих основных систем: лазера, системы контроля параметров излучения, системы позиционирования образца и системы регистрации разрушений.

Лазер

Лазер стенда контроля активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений построен по схеме: задающий генератор (ЗГ), система вырезания и тракт усиления. Оптическая схема лазера приведена на рис. 1.

В качестве ЗГ был выбран лазер на кристалле Nd:YAG. Длина волны излучения 1064 нм, длительность импульса ≈ 40 нс, энергия ≈ 15 мкДж, стабильность энергии (среднеквадратичное отклонение) $\approx 3\%$. Лазер работает на частоте повторения 10 Гц.

Графики и осциллограмма импульса представлены на рис. 2: рис. 2а – временная форма лазерного импульса ЗГ; рис. 2б – осциллограмма импульсов в режиме накопления сигнала за ~ 7000 импульсов (~ 12 минут непрерывной работы).

Излучение ЗГ, рис. 1, проходит через первый затвор Поккельса ЗП1, в котором вырезается импульс требуемой длительности, рис. 2в. Затем «нулевой» пространственный фильтр формирует пучок с гауссовым пространственным распределением. Для оптической развязки усилителей и ЗГ используются затворы Фарадея ЗФ, рис. 1. Два прохода через первый усилитель У1 обеспечиваются поляризационным зеркалом ПЗ1 и ячейкой Фарадея ЯФ с фазовой пластинкой $\lambda/2$. Второй затвор Поккельса ЗП2 обеспечивает отсутствие самовозбуждения в схеме. Телескоп Т2 перестраивает изображение пучка из первого усилителя У1 на заднее зеркало и обратно. Телескоп Т3 увеличивает апертуру пучка. После одного прохода через второй усилитель У2 пучок выводится из схемы лазера через фазовую пластинку $\lambda/2$ и систему поляризационных зеркал ПЗ2 и ПЗ3, что позволяет регулировать энергию на выходе лазера.

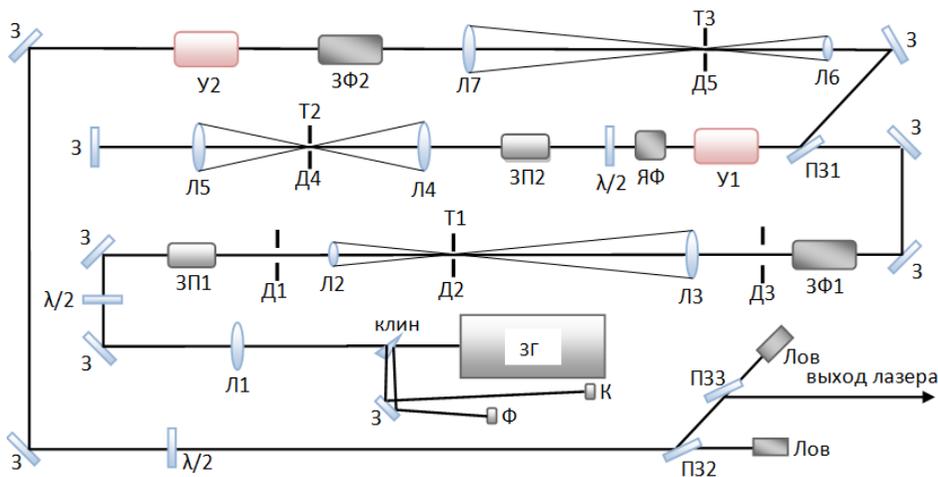


Рис. 1. Оптическая схема лазера стенда контроля наличия микровключений: ЗГ – задающий генератор; З – зеркало; ЗП – затвор Поккельса; Д – диафрагма; ЗФ – затвор Фарадея; ПЗ – поляризационное зеркало; ЯФ – ячейка Фарадея; У – усилитель; $\lambda/2$ – фазовая пластинка; Т – телескоп; К – калориметр; Ф – фотодиод; Лов – ловушка; Л – линза

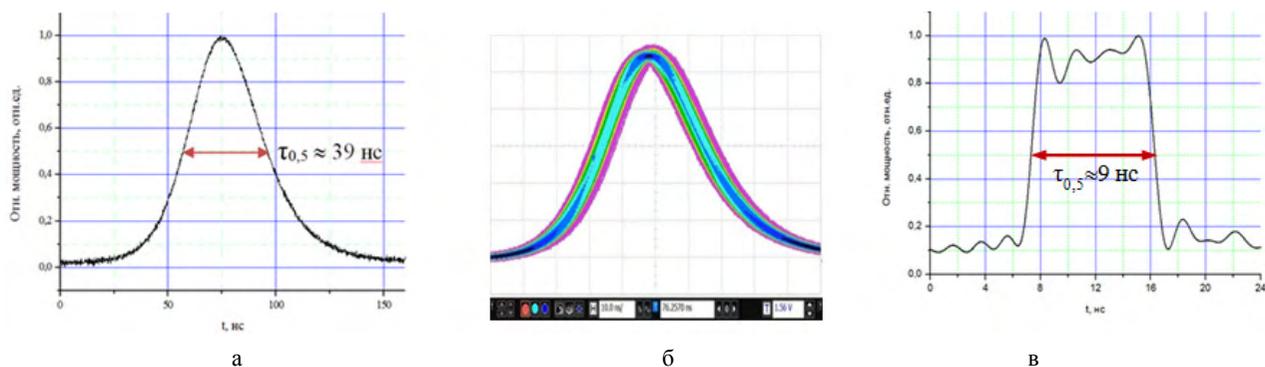


Рис. 2. Графики и осциллограмма импульсов: а – временная форма импульса ЗГ; б – осциллограмма импульсов ЗГ в режиме накопления сигнала за ~ 7000 импульсов; в – временная форма импульса после затвора Поккельса ЗП

Тракт усиления собран на двух квантронах с диодной накачкой и активными элементами из кристалла Nd:YAG диаметром 5 мм (У1, рис. 1) и 10 мм (У2, рис. 1), работающих в двухпроходном и однопроходном режимах, соответственно.

При работе лазера стержни в квантронах нагреваются и в них образуются тепловые линзы. Изменяя токи, подаваемые на усилители, и частоту следования импульсов можно изменять фокусное расстояние тепловой линзы лазера и минимальный размер пятна. Выбран рабочий режим, который позволяет не использовать дополнительную линзу для фокусировки излучения на образец. На выходе второго усилителя (У2, рис. 1) образуется сходящийся пучок с максимальной энергией 240 мДж и минимальным пятном размером $d_{1/e^2} = 2,1$ мм в фокусе тепловой линзы.

Параметры лазерного излучения на образце

Система контроля параметров предназначена для контроля временной формы, пространственного распределения и энергии лазерного излучения, падающего на исследуемый образец. На рис.3 приведена схема регистрации параметров лазерного излучения. В систему входят: датчик измерения энергии;

оптическое волокно и оптический фотодетектор, подключенный к осциллографу; камера регистрации пространственного распределения.

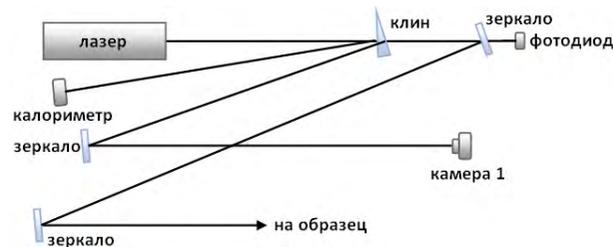


Рис. 3. Схема регистрации параметров лазерного излучения

В табл. 1 приведены основные параметры лазерного излучения стенда контроля наличия микровключений в АДЭ.

Для расчета плотности энергии на образце используется эффективная площадь пучка (площадь пучка с равномерным распределением плотности энергии, равной максимальной плотности энергии в реальном пучке и содержащим такую же энергию), которая определяется следующим образом [6]:

$$S_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon(x, y) dx dy}{\epsilon_{pk}}, \quad (1)$$

где $\epsilon(x, y)$ – пространственное распределение плотности энергии в пятне, а ϵ_{pk} – максимум данного распределения.

Эффективная длительность импульса t_{eff} – это отношение полной энергии импульса E к максимальной мощности импульса P_{pk} [6]:

$$t_{eff} = \frac{E}{P_{pk}} = \int_0^{\infty} P(t) dt / P_{pk}. \quad (3)$$

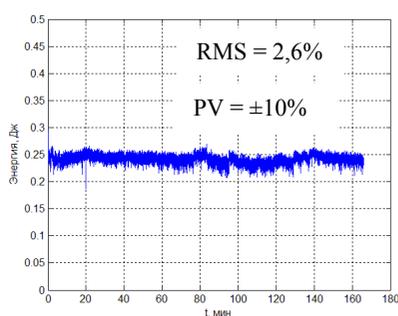
На рис. 4 представлены графики и осциллограмма импульсов: рис. 4а – зависимость энергии на выходе лазера от времени за период $\approx 2,5$ часа, характеризующая стабильность; рис. 4б – характерная временная форма лазерного импульса; рис. 4в – осциллограмма импульсов в режиме накопления сигнала за ~ 5000 импульсов (~ 10 мин непрерывной работы).

На рис. 5 представлено характерное пространственное распределение пучка на образце.

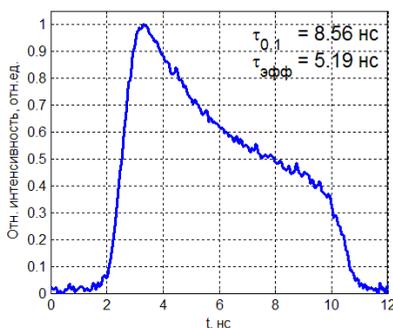
Таблица 1

Основные параметры лазерного излучения на образце

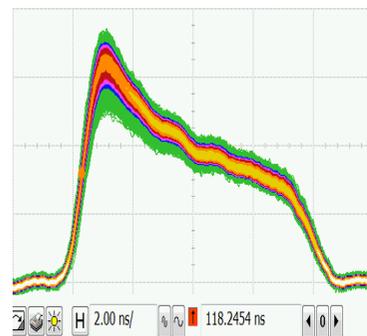
Параметр		Значение
Длина волны		1064 нм
Поляризация		линейная
Частота		10 Гц
Энергия лазерного импульса		до 240 мДж
Стабильность энергии	СКО (RMS)	3 %
	максимальный разброс (PV)	± 10 %
Длительность импульса	$\tau_{0,1}$	9 нс
	τ_{eff}	5 нс
	d_{1/e^2}	2,1 мм
Диаметр пучка в плоскости образца	$d_{0,5}$	1,2 мм
	d_{eff}	1,5 мм
	Плотность энергии в плоскости образца	до 14 Дж/см ²



а

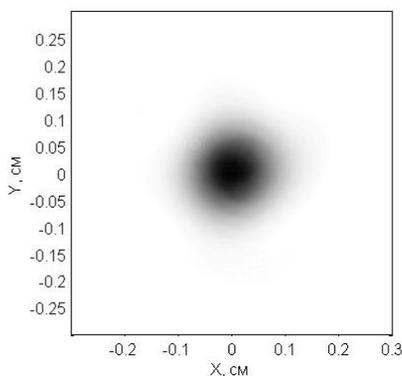


б

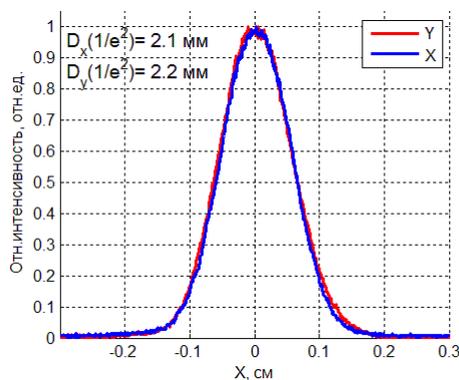


в

Рис. 4. Графики и осциллограмма импульсов: а – зависимость энергии на выходе лазера от времени за период $\approx 2,5$ часа; б – характерная временная форма импульса на выходе лазера; в – осциллограмма импульсов в режиме накопления сигнала за ~ 5000 импульсов



а



б

Рис. 5. Характерный пространственный профиль лазерного пучка на АДЭ: а – изображение пучка; б – распределение интенсивности в пучке

Исследование каустики пучка показало, что при смещении на ± 5 см относительно центра каустики размер пучка не изменяется. При смещении на ± 10 см эффективная площадь увеличивается примерно на 3 %. Таким образом, плотность энергии лазерного излучения фактически не изменяется на толщине образца ($\approx 4,8$ см) в направлении распространения излучения.

Система позиционирования образца

Система позиционирования предназначена для перемещения образца с целью последовательного облучения всей его поверхности. Образец устанавливается рабочими поверхностями, ориентированными под углом Брюстера к лучу лазера, на платформу, позиционируемую в плоскости X-Z. Образец устанавливается в центре каустики пучка, формируемого тепловой линзой лазера. АДЭ закрепляется в специальную оправу с торцевой подсветкой. Сверху и снизу в оправу встроены диодные ленты. Данная подсветка позволяет хорошо рассмотреть включения и пузыри в объеме образца [3]. На рис. 6 приведена фотография системы позиционирования образца и системы регистрации разрушений.

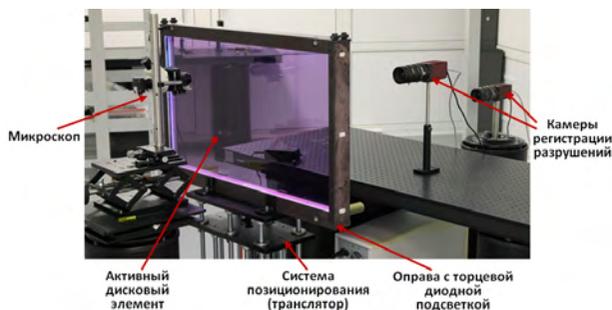


Рис. 6. Системы позиционирования образца и регистрации разрушений

Образцы устанавливаются под углом Брюстера к излучению, так АДЭ располагаются на установке. Это позволяет уменьшить время тестирования. Транслятор перемещает АДЭ с необходимой скоростью в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Скорость сканирования может варьировать для осуществления единичных выстрелов или серии по всему объему образца. Система позиционирования позволяет работать в автоматизированном режиме: после ввода основных параметров запускается транслятор и образец перемещается по заданному алгоритму.

Система регистрации разрушений

Система регистрации разрушений необходима для обнаружения повреждений. В систему входят: две камеры регистрации (камера 2 и 3) и микроскоп.

С помощью камер 2 и 3 АДЭ фотографируется до и после облучения. Камеры устанавливаются на разном расстоянии от образца, чтобы получать фотографии в двух увеличениях. По результатам сравнения фотографий до и после облучения определяется количество появившихся разрушений в объеме об-

разца. Детальное исследование появившихся разрушений проводится с помощью микроскопа.

Методика тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических включений

Методика тестирования АДЭ на металлические включения предназначена для обнаружения металлических включений в активных дисковых элементах. Методика основана на тестировании элементов на разрушение, заключающимся в том, чтобы подвергнуть каждую точку образца мощному лазерному облучению, обнаружить появившиеся разрушения, измерить их количество и размеры.

Во время облучения транслятор последовательно смещает образец по горизонтали и вертикали по заданному алгоритму. До и после облучения АДЭ фотографируется. Сравнивая фото образца до и после облучения, определяются положения разрушений. Когда местонахождения поврежденных обнаружены, они наносятся на карту разрушений. Размер поврежденных измеряется с помощью оптического микроскопа и эталонной миры. Если количество и размер разрушений не превосходят определенных критических значений¹, то разрушения облучаются дополнительно 100 раз для увеличения их размера до максимального.

При выборе алгоритма сканирования АДЭ ключевое значение имеют следующие параметры: скорость движения образца относительно излучения по горизонтали V , смещение между строчками d_z и максимальная плотность энергии на образце ϵ_{max} . Варьируя три данных параметра можно получать различные режимы облучения с заданным количеством выстрелов в одну точку в определенном диапазоне плотностей энергии. Основной целью при выборе режима сканирования является облучение каждой точки образца не менее чем пятью импульсами с плотностью энергии выше порогового значения (однородное облучение) за минимальное время.

Из работы [2] следует, что для импульса длительностью 6 нс порог разрушения стекла на металлических включениях составляет $\approx 3,5$ Дж/см². При тестировании образцов на наличие металлических включений ключевое значение имеет именно количество выстрелов в каждую точку с плотностью энергии выше пороговой.

При проведении экспериментов по тестированию АДЭ использовались два режима облучения АДЭ:

– режим облучения I – обеспечивает самое однородное облучение АДЭ (пять и более импульсов в каждую точку с плотностью энергии выше порога),

¹ На установке NIF, например, согласно первоначальным требованиям на стекло критическое значение составляло 5 разрушений на слэб размером не более 100 мкм [7], однако при комплектовании каналов использовались слэбы с максимальным числом разрушений 20 и максимальным размером 1000 мкм [8]

но сканирование занимает продолжительное время ~30 часов, также режим I позволяет снизить максимальную плотность энергии;

– режим облучения II – самый быстрый (~15 ч), но не совсем однородный (есть области с облучением четырьмя импульсами в каждую точку с энергией выше порога обнаружения).

В качестве примера рассмотрим режим облучения I, который приведен на рис. 7.

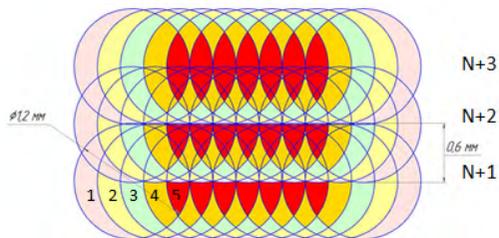
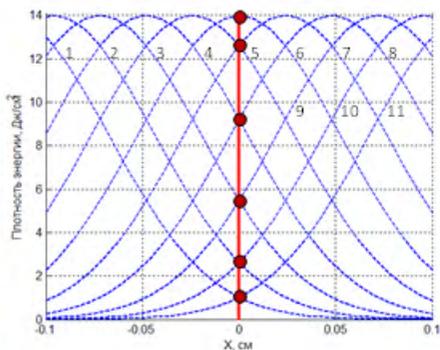
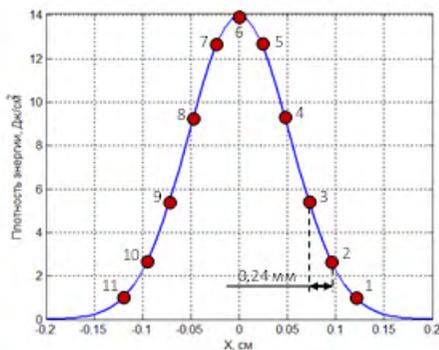


Рис. 7. Режим облучения I

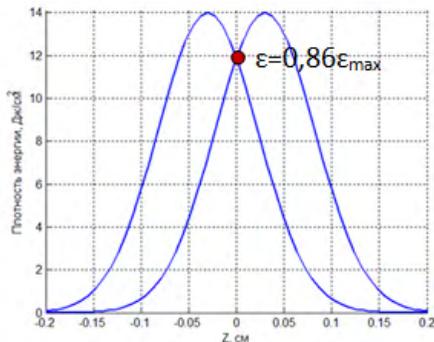
После прохода строчки по горизонтали со скоростью 2,4 мм/с образец смещается на расстояние 0,6 мм (половина диаметра пучка по уровню 0,5) по вертикали, и отстреливается следующая строчка. Окружность – сечение пучка по уровню 0,5 (7 Дж/см²), цифрами и цветами обозначено количество выстрелов в данную область с плотностью энергии от 7 до 14 Дж/см². При флуктуации энергетических параметров излучения в пределах ±10 % минимальная плотность энергии в 7 Дж/см² всегда превышает порог разрушения (5,5 Дж/см²).



а



б



в

Рис. 8. Графики гауссова пучка и его смещения: а – смещение гауссова пучка с постоянной скоростью при движении по оси OX; б – гауссов пучок с отмеченными плотностями энергии, попадающими в одну точку; в – смещение пучка по оси OZ на 0,6 мм

На рис. 8 представлен гауссов пучок и его смещение: рис. 8а – смещение максимума гауссова пучка с постоянной скоростью при движении АДЭ со скоростью $V = 2,4$ мм/с; рис. 8б – гауссов пучок с отмеченными плотностями энергии, попадающими в одну точку; рис. 8в – пересечение гауссовых пучков при проходе соседних строчек при смещении по оси OZ на радиус пучка по уровню 0,5 (0,6 мм).

На рис. 8а линией обозначена одна и та же точка на образце, в которую попадают данные импульсы. Кружками обозначены плотности энергии, попадающие в эту точку. Таким образом, каждую 0,1 с пучок смещается относительно АДЭ на 0,24 мм и облучает одну и ту же точку на образце с плотностью энергии, показанной на рис. 8б. На рис. 8в кружком обозначена максимальная плотность энергии, попадающая в точки между соседними строчками.

В результате оптимизации параметров облучения получен режим облучения III, который позволяет сканировать образцы за меньшее время (~23 ч), чем в режиме I, при этом облучение получается более однородным, чем в режиме II (пять и более импульсов в каждую точку АДЭ с плотностью энергии выше порога). Стоит отметить, если снизить требование для минимальной плотности энергии с 7 Дж/см² до 6 Дж/см², то время затрачиваемое на облучение АДЭ составляет примерно 17 ч (режим облучения IV). Данный режим также можно использовать при тестировании АДЭ, но при стабильности энергетических параметров излучения в пределах ±5%.

Отработка методики тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических включений

Методика тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических включений экспериментально отработывалась на активных дисковых элементах в двух режимах облучения.

При исследовании образца № 1 в режиме I даже при сниженной энергии облучения обнаружилось многочисленных разрушений, поэтому с целью экспериментального определения величины пороговой энергии обнаружения металлических включений исследовались области образца при нескольких значениях максимальной падающей плотности энергии в пучке:

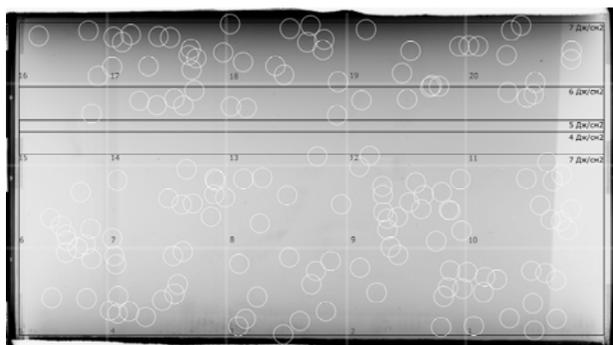
- 1) до 7 Дж/см^2 – 100 разрушений на 400 строчках (12,7 шт./литр);
- 2) до 4 Дж/см^2 – 0 разрушений на 40 строчках;
- 3) до 5 Дж/см^2 – 0 разрушений на 25 строчках;
- 4) до 6 Дж/см^2 – 16 разрушений на 65 строчках (12,2 шт./литр);
- 5) до 7 Дж/см^2 – 38 разрушений на 130 строчках (14,4 шт./литр).

Из полученных результатов следует, что порог разрушения стекла на металлических включениях при облучении образца лазерными импульсами длительностью 5 нс находится в диапазоне от 3,4 до 4 Дж/см^2 (что соответствует падающей плотности

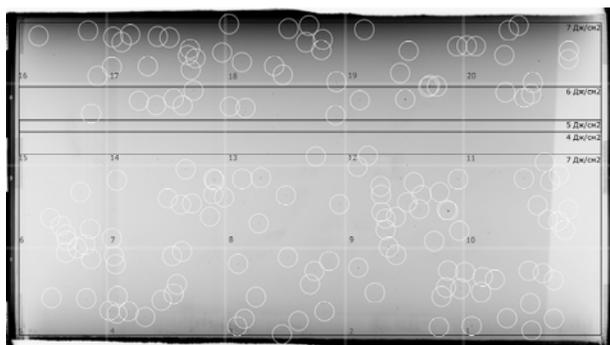
энергии от 5 до 6 Дж/см^2 на образец, расположенный под углом Брюстера). Полученный результат согласуется с зависимостью пороговой плотности энергии от длительности импульса, представленной в [2].

На рис. 9 представлены изображения АДЭ № 1 до и после облучения. Черными прямоугольником выделены области, в которых проводились исследования при разных максимальных плотностях энергии от 4 до 7 Дж/см^2 . Серыми прямоугольниками с цифрами обозначены области снятые камерой 2 при большем увеличении. Кружками обозначены области, в которых по анализу изображений обнаружены изменения после облучения. На рис. 10 приведены характерные разрушения, появившиеся после облучения.

В этом же режиме проведено тестирование еще одного образца (АДЭ № 2). В результате сравнения изображений до и после облучения обнаружено 13 разрушений в объеме (1 шт./литр). Эти разрушения были подвергнуты дополнительному облучению 100 выстрелов на определение их максимального размера. Плотность энергии в лазерном импульсе составляла 7 Дж/см^2 . На рис. 11 показан последовательный рост разрушения, вызванного наличием металлического микровключения, при увеличении количества выстрелов по нему. Как видно из рис. 11, после 100 выстрелов получено разрушение больше миллиметра. На рис. 12 приведены характерные разрушения после облучения 100 импульсов.



а



б

Рис. 9. Изображение АДЭ № 1: а – до облучения, б – после облучения

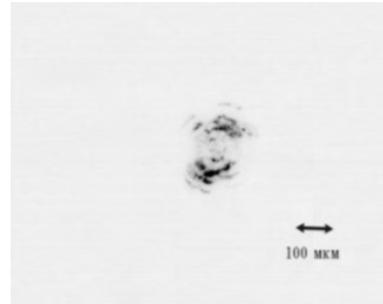
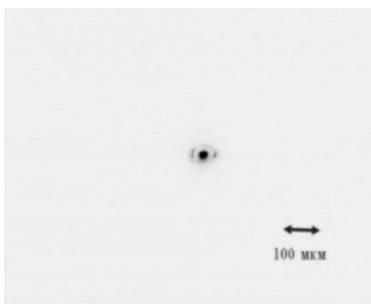
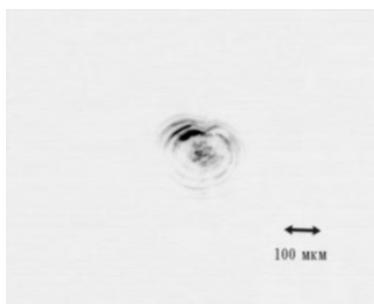


Рис. 10. Изображения характерных разрушений

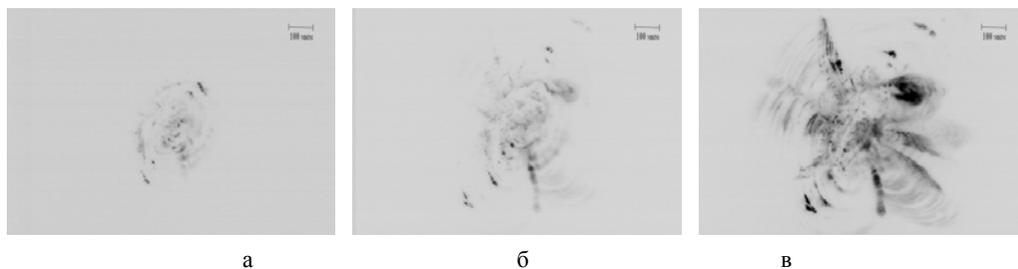


Рис. 11. Изображения разрушения после облучения: а – 5-кратного, б – 10-кратного, в – 100-кратного

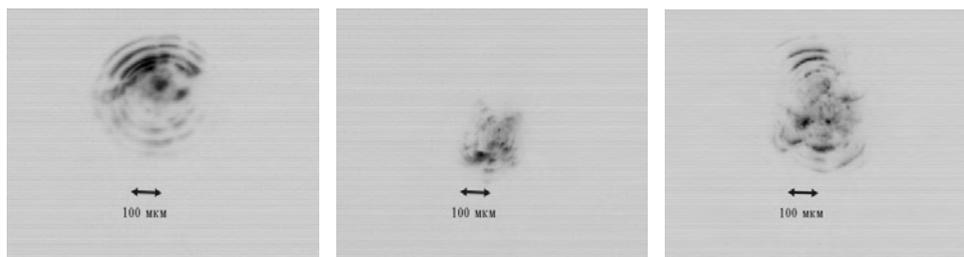


Рис. 12. Изображения характерных разрушений после 100 импульсов

В режиме облучения II проведено тестирование двух АДЭ. В результате тестирования АДЭ № 3 в области облучения зарегистрировано 113 разрушений (9,8 шт./литр). Средний размер разрушений больше 100 мкм. После тестирования АДЭ № 4 получено 92 разрушения (8 шт./литр). Полученные результаты демонстрируют, что режим II также вполне успешно позволяет тестировать АДЭ на наличие металлических включений. Несомненным плюсом данного режима является в два раза меньшее время сканирования образцов, по сравнению с режимом I. Поэтому последующие тестирования еще пяти образцов проводились в режиме облучения II.

В табл. 2 приведены результаты тестирования образцов на наличие металлических включений. Все представленные образцы изготовлены из стекла КНФС 3.

Таблица 2

Результаты тестирования образцов на наличие металлических включений

№	Образец	Исследованная область, мм ³	Количество разрушений		Режим облучения
			шт.	шт./литр	
1	АДЭ № 1	700×360×47	154	13	режим I
2	АДЭ № 2	700×400×46	13	1	
3	АДЭ № 3	700×400×41	113	9,8	режим II
4	АДЭ № 4	700×400×41	92	8	
5	АДЭ № 5	700×420×41	39	3,2	
6	АДЭ № 6	700×420×41	23	1,9	
7	АДЭ № 7	700×420×41	21	1,7	
8	АДЭ № 8	700×420×41	19	1,6	
9	АДЭ № 9	700×420×41	10	0,8	

Заключение

В результате выполнения настоящей работы:

1) создан стенд тестирования активных дисковых элементов на наличие металлических микровключений, в который входят следующие системы: лазер, система контроля параметров излучения, система позиционирования образца и система регистрации разрушений. Основные параметры лазерного излучения: длина волны $\lambda = 1064$ нм, частота $\nu = 10$ Гц, максимальная плотность энергии в плоскости образца $\epsilon_{\max} = 14$ Дж/см², длительность импульса $\tau_{\text{eff}} = 5$ нс;

2) описана методика тестирования АДЭ на наличие металлических микровключений, рассмотрены четыре режима облучения;

3) проведены исследования по нахождению порога разрушения АДЭ на металлических включениях при облучении лазерными импульсами длительностью $\tau_{\text{eff}} = 5$ нс. Из полученных результатов следует, что порог находится в диапазоне $(3,7 \pm 0,3)$ Дж/см² (плотность энергии внутри образца, расположенного под углом Брюстера);

4) экспериментально отработана методика тестирования АДЭ на наличие металлических микровключений. Приведены результаты тестирования АДЭ. Отработанный подход тестирования образцов оказался успешным и позволяет обнаружить металлические микровключения в стекле активных дисковых элементов. В качестве рабочего режима, на настоящий момент рекомендуется режим II, занимающий наименьшее время сканирования.

Литература

1 Pitts J. H. Modeling Laser Damage Caused by Platinum Inclusions in Laser Glass, in Laser Induced Damage in Optical Materials / Proceedings of the Boulder Damage Symposium. Boulder, Colorado, Oct. 1985.

2 Milan O., Hatcher C. W., Campbell J. H. Platinum Particles in the Nd:doped Disk of Phosphate Glass in the Nova Laser, in Laser Induced Damage in Optical Materials // Proceedings of the Boulder Damage Symposium. Boulder, Colorado, Oct. 1985.

3 Rainer F. Mapping and Inspection of Damage and Artifacts in Large-Scale Optics // LLNL. December 22, 1997.

4 Gonzales R. P., Milan O. Evolution During Multiple-Shot Irradiation of Damage Surrounding Isolated Platinum Inclusions in Phosphate Laser Glasse, in Laser

Induced Damage in Optical Materials // Proceedings of the Boulder Damage Symposium. Boulder, Colorado, Oct. 1985.

5 Weinzapfel C. L., Greiner G. J., Walmer C. D. Large scale damage testing in a production environment. Lawrence Livermore National Laboratory.

6 International standard ISO 11254-1_2000. First edition 2000-06-01.

7 Campbell J. H., Ehrmann P., Suratwala T. I. and all. Properties of and Manufacturing Methods for NIF Laser Glasses. FUSION, ICF Quarterly report, 1999. Vol. 9, N 2. P. 7–124.

8 Suratwala T. I., Campbell J. H., Miller P. E. and all. Phosphate laser glass for NIF: production status, slab selection and recent technical advances. Optical Engineering at the Lawrence Livermore National Laboratory, 2004.