

УДК 621.373:531.748

## Комплекс оборудования и способ наведения лазерных пучков в заданные точки мишени

© 2019 г. С. А. Бельков\*, доктор физ.-мат. наук; В. И. Вензель\*\*;  
Е. В. Калашников\*\*, канд. физ.-мат. наук; И. И. Соломатин\*;  
А. В. Чарухчев\*\*, канд. техн. наук; А. В. Андраманов\*;  
В. Е. Гаганов\*; В. С. Миловидов\*\*

\*Институт лазерно-физических исследований Российского федерального ядерного центра — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров Нижегородской обл.

\*\*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.

E-mail: evk1955@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.04.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-08-XX-XX

Описан способ автоматической юстировки и наведения лазерных пучков в заданную точку пространства с помощью кубических имитаторов мишени, используемых на многоканальной лазерной установке при фокусировке и сведении излучения на мишень в кубической симметрии её облучения для исследования различных процессов в области физики высокотемпературной плазмы. Представлен комплекс оборудования, этапы сведения и фокусировки лазерных пучков в заданные точки мишенной камеры, а также способ измерений длины произвольного отрезка на удалённом объекте по его изображению на дисплее и экспериментальная оценка точности таких измерений на тестовом объекте — на грани кубического имитатора мишени.

**Ключевые слова:** мишенная камера, трёхмерная метка (3D метка), автоколлимационный канал, лазерная установка, кубический имитатор мишени, автоматическая юстировка.

**Код OCIS:** 120.4820.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В лазерной физике при исследованиях различных процессов конверсии лазерного излучения в рентгеновское излучение, физики нагрева и сжатия плазмы и других явлений при взаимодействии излучения с веществом, как за рубежом [1–3], так и в России [4–6], актуальны задачи юстировки лазерных пучков на многоканальной лазерной установке.

Целью данной работы является реализация способа и создание оборудования, обеспечивающего возможность автоматического наведения лазерных пучков многоканальной лазерной установки на мишень в кубической симметрии облучения.

Предлагаемый нами способ [7] позволяет решить комплекс задач наведения рабочего излучения на мишень с использованием юстировочного излучения в непрерывном режиме перед проведением физических экспериментов на многоканальной лазерной установке, подобной американской NIF [1, 2] и французской LMJ [3].

В ходе данной работы проведены расчёты, направленные на определение требований к параметрам системы юстировки и наведения пучков, узлам системы.

В результате показана возможность обеспечения заданной точности наведения для мишеней различного типа на многоканальной лазерной установке с применением кубических имитаторов мишени.

Задачи юстировки, которые необходимо решить при подготовке мишени к физическим экспериментам на многоканальной лазерной установке, можно разделить на три части. Это определение, фиксация и воспроизведение координат центра сферической вакуумной камеры взаимодействия излучения с мишенью — мишенной камеры (МК); сведение и фокусировка пучков лазерных каналов в заданные точки имитатора мишени в центральной области МК и юстировка самой мишени.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРА МК

Для автоматической юстировки многоканальной лазерной установки, предназначенной для исследований в области физики высокотемпературной плазмы, задача дистанционного определения и контроля координат центра сферической МК радиусом  $R$  порядка 5 м с точностью  $\pm 20$  мкм может быть решена с помощью датчиков центра мишенной камеры (ДЦМК) (рис. 1), которые расположены вне МК. Кроме основного их назначения — фиксации координат центра сферической МК, эти же датчики используются при контроле юстировки объектов, в частности самой мишени, относительно центра камеры и играют роль датчиков мишени (ДМ). Разработанные нами датчики [8] обладают достаточно большой долговременной стабильностью — точность повторного воспроизведения координат центра МК менее 30 мкм в условиях отсутствия тепловых и механических помех. Датчики обеспечивают юстировку объектов по меткам (визирам), установленным на этих объектах в поле зрения  $\pm 50$  мм относительно центра мишени с точностью не хуже 20 мкм. При этом в процессе поиска и фиксации центра МК используется материальное тело в виде куба, содержащего материальную точку, которая принимается в качестве

центра МК и координаты которой являются координатами искомого центра.

Для определения центра МК достаточно двух ДЦМК. Каждый такой датчик Д1 и Д2 состоит из трёх частей: измерительной (для линейных измерений), автоколлимационной (для угловых измерений) и осветительной, и содержит телескоп и коллиматор со световым диаметром линзового объектива порядка  $D = 300$  мм и задним фокальным отрезком  $f' = 2235$  мм, светодиодный излучатель с  $\lambda_{\text{rab}} = 527$  нм,  $P = 3$  Вт и два матричных приёмника, работающие на длине волны  $\lambda_{\text{rab}} = 527$  нм с чувствительностью  $7 \times 10^{-9}$  Вт/см<sup>2</sup>. Датчики могут регистрировать объекты на расстоянии до 7 м с разрешением не хуже 20,0 мкм в пространстве предметов вблизи центра МК в зоне размером не менее  $50 \times 50 \times 50$  мм. Параметры объектива и узлов, входящих в ДЦМК, требования к параметрам приёмников излучения и другие технические характеристики приведены в [8].

В общем случае для однозначного задания положения тела в пространстве необходимо определить шесть независимых координат — 3 линейных и 3 угловых. Метки, по которым определяются координаты объектов, должны иметь небольшие габариты и легко встраиваться в конструкции объектов. Обычно угловые метки представляют собой зеркала размером 3–5 мм с неотражающим визиром, например, в виде перекрестия с толщиной штриха 30–100 мкм, равнояркого круга или отверстия диаметром 500–1200 мкм. Такие координатные метки одновременно являются угловыми и линейными измерителями.

Для решения задачи определения положения объекта (куба) в центре МК нами предложена

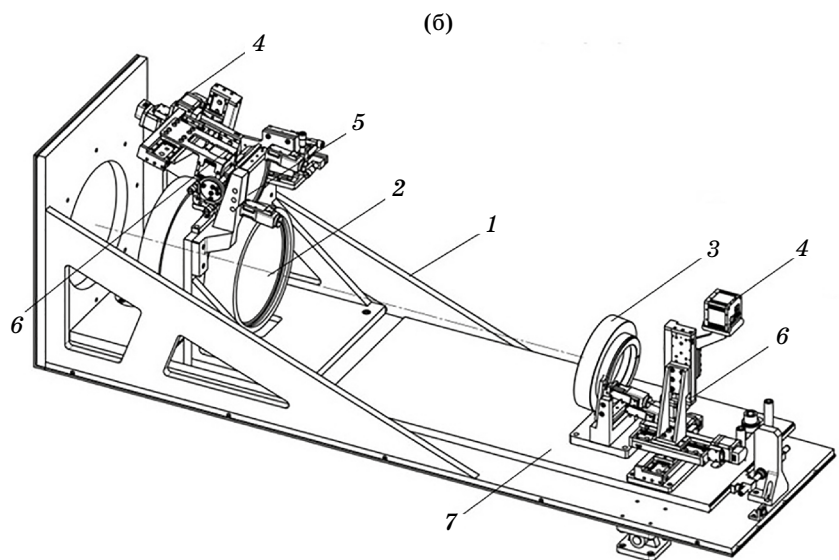


Рис. 1. Вид датчика центра мишенной камеры (ДЦМК): корпус 1, узел объектива 2, зеркало 3, фотоприёмное устройство 4, светоделитель 5, транслятор 6, платформа 7.

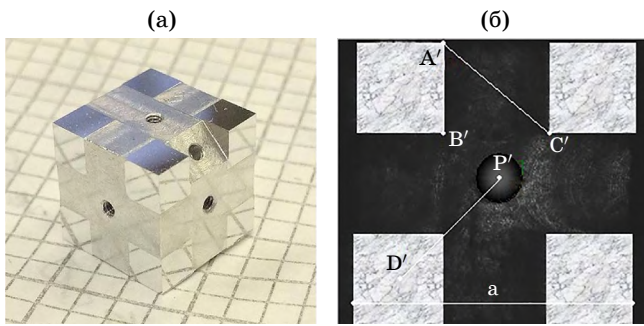


Рис. 2. Кубический имитатор мишени (а) и изображение его грани на экране дисплея (б).

система из двух ортогонально расположенных ДЦМК, позволяющие определить две линейные координаты двух координатных меток и две угловые координаты этих меток, которые выполнены в виде зеркальных участков на двух ортогональных гранях кубического имитатора мишени (рис. 2) [8].

Практически в варианте использования двух ДЦМК (Д1 и Д2 на рис. 3) и кубического имитатора мишени (КИМ) с двумя зеркальными взаимно перпендикулярными гранями, как 3D метки, координаты центра куба являются координатами искомого центра МК.

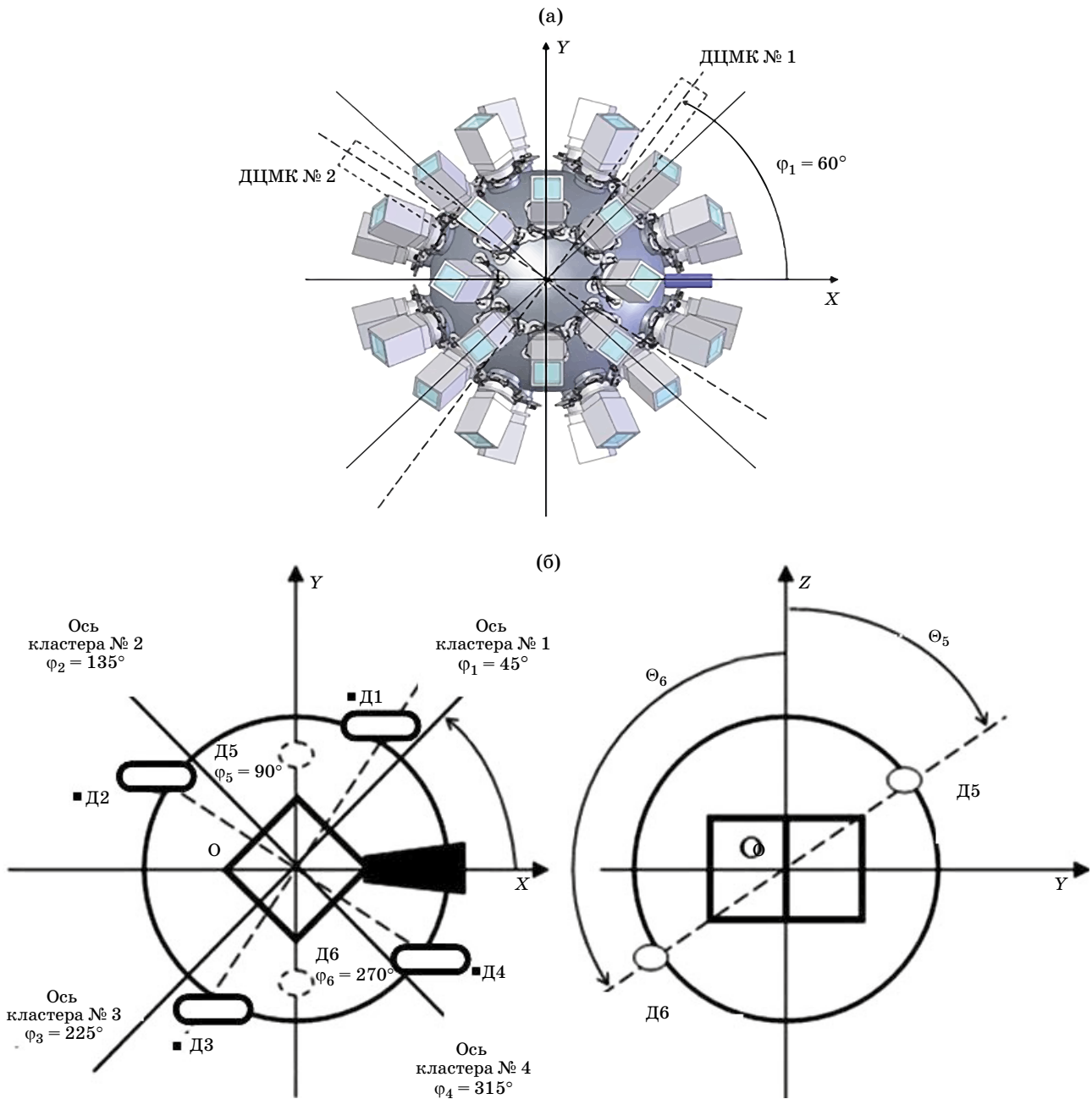


Рис. 3. Размещение датчиков Д1, Д2 (ДЦМК) на мишени в экваториальной плоскости (а), датчиков Д1–Д6 (ДМ) в экваториальной и меридиональной плоскостях (б).

В результате процедуры взаимной юстировки 3D метки и двух ортогональных датчиков Д1 и Д2 их оптические оси совмещаются с нормалью к каждой из двух ортогональных зеркальных граней кубической 3D метки, проходящими через центр грани куба — центр перекрестия (или отверстия) на каждой грани. Таким образом, точка пересечения осей ортогональных датчиков Д1 и Д2 совпадает с центром куба 3D метки и является центром МК, а положение датчиков Д1 и Д2 в дальнейшем остаётся неизменным.

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ ОТРЕЗКОВ НА ОБЪЕКТЕ

При юстировке КИМ в центре МК и юстировке лазерных пучков при их сведении на КИМ возникает необходимость проводить с достаточно высокой точностью на больших дистанциях измерения длины отрезков и других параметров на самом имитаторе мишени, то есть на плоских гранях КИМ [9].

При этом на дисплее измерительного канала с матричным фотоприёмником любые отрезки на объекте, (например, АВ, АС, ВС), преобразуются в соответствующие отрезки (А'В', А'С' и В'С') (рис. 2б) в системе координат плоского экрана  $\{U, V\}$ .

Для измерений реального объекта по его плоскому изображению необходимо определить масштаб, то есть цену деления одного пиксела изображения по координатам  $\{U, V\}$ , соответствующим реальным размерам объекта в пространстве предметов. Введённые для этого коэффициенты масштабирования  $M$  по координатам позволяют сравнивать реальные отрезки с их изображениями на плоском экране. Для отрезков на плоскости объекта, ортогональной оптической оси измерительного канала, из условия  $AB = (M)A'B'$  и  $AC = (M)A'C'$  справедливы уравнения:

$$\begin{aligned} AB^2 &= (X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2 = \\ &= M_U(U_A - U_B)^2 + M_V(V_A - V_B)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} AC^2 &= (X_A - X_C)^2 + (Y_A - Y_C)^2 + (Z_A - Z_C)^2 = \\ &= M_U(U_A - U_C)^2 + M_V(V_A - V_C)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $M_U$  и  $M_V$  — масштабирующие коэффициенты по координатам  $\{U, V\}$ .

Совместное решение этих уравнений (1) и (2) даёт значения  $M_U$  и  $M_V$ , определяющие метрологическое соответствие между реальными размерами отрезков на объекте в пространстве предметов и его плоским изображением на матрице приёмника и на экране дисплея измерительного канала.

После определения значений  $M_U$  и  $M_V$  любой произвольный отрезок DP между произвольными точками на объекте можно определить как

$$DP^2 = M_U(U_D - U_P)^2 + M_V(V_D - V_P)^2, \quad (3)$$

Для ориентации плоскости, в которой лежат измеряемые отрезки, ортогонально оптической оси измерительного канала ДЦМК на грани КИМ нами предложено использовать нанесённые зеркальные участки КИМ и автоколлимационный канал ДЦМК [9]. При этом координаты точек А, В и С отрезков АВ и АС на плоской грани объекта в виде куба с ребром  $a$  в прямоугольной системе координат можно записать  $A(X_A, a/2, Z_A)$ ,  $B(X_B, a/2, Z_B)$ ,  $C(X_C, a/2, Z_C)$ , если начало системы координат совместить с центром куба. Координаты концов отрезка D'P' на экране дисплея будут равны  $D'(U_D, V_D)$ ,  $P'(U_P, V_P)$ .

Решение системы уравнений (1) и (2):

$$\Delta = (U_A - U_B)^2 (V_A - V_C)^2 - (V_A - V_B)^2 (U_A - U_C)^2;$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= [(X_A - X_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2] (V_A - V_C)^2 - \\ &\quad - [X_A^2 + Z_A^2] (V_A - V_B)^2, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= (U_A - U_B)^2 [X_A^2 + Z_A^2] - \\ &\quad - (U_A - U_C)^2 [(X_A - X_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2] \end{aligned}$$

даёт возможность найти коэффициенты  $M_U = \Delta U / \Delta$  и  $M_V = \Delta V / \Delta$ .

Экспериментальная оценка точности измерений длины произвольного отрезка DP (например, расстояния от центра грани куба до центра лазерного пятна) при использовании данного способа проводилась при юстировке лазерного пучка на тестовом объекте в виде куба — на макете кубического имитатора мишени (рис. 2б).

В результате эксперимента при аттестованной длине ребра куба КИМ, равной  $a = 10,008 \pm 0,005$  мм, искомая длина отрезка составила  $DP = 4,942 \pm 0,015$  мм на расстоянии 6900 мм до объекта.

Следует отметить, что усреднение результатов измерений приводит к уменьшению влияния ряда оптических искажений, связанных с удалением изображения от оптической оси объектива. Описанный способ при наличии возможности ориентировать плоскость объекта с помощью зеркальных меток и автоколлимационного канала ДМ повышает быстродействие и точность юстировочных процедур лазерных пучков на объектах. При этом дистанционные измерения являются независимыми от расстояния матричного фотоприёмника до объекта в широком диапазоне изменений дистанции и допускают автоматизацию процесса юстировки.

### 4. КОМПЛЕКС ОБОРУДОВАНИЯ, ЭТАПЫ СВЕДЕНИЯ И ФОКУСИРОВКИ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В ЗАДАННЫЕ ТОЧКИ МК

При проведении физических экспериментов на многоканальной лазерной установке облучение мишени, размещённой в центре МК, производится

лазерными пучками, сгруппированными в финальных оптических модулях (ФОМ).

ФОМ, в свою очередь, сгруппированы в кластеры и создают составные конусные пучки с углом раствора  $60^\circ$ . Всего используется 6 кластеров, в том числе четыре кластера с центрами кластерной группы из ФОМ, расположенными в экваториальной плоскости, и два кластера из ФОМ с центрами в верхнем и в нижнем полюсах МК. Таким образом, конусные пучки всех кластеров облучают мишень в кубической симметрии.

При юстировке многоканальной лазерной установки такого типа комплекс оборудования для наведения лазерных пучков в заданную точку пространства вблизи центра МК состоит из шести датчиков Д1–Д6, размещённых вокруг камеры, КИМ в центре МК и непрерывных юстировочных источников излучения с рабочей длиной волны  $\lambda_{\text{раб}}$  в каждом лазерном канале, которые вбрасываются на трёхкоординатных трансляторах в фокальной плоскости выходных линз пространственных фильтров системы транспортировки лазерного излучения установки.

Размещение датчиков Д1–Д6 и финальных оптических модулей, сгруппированных в кластеры на МК, показано на рис. 3 в сферической системе координат  $(R, \Phi, \Theta)$  и прямоугольной системах координат  $(X, Y, Z)$ : в экваториальной плоскости Д1  $(R_1, \Phi_1, \Theta_1)$ , Д2  $(R_2, \Phi_2, \Theta_2)$ , Д3  $(R_3, \Phi_3, \Theta_3)$ , Д4  $(R_4, \Phi_4, \Theta_4)$ . Два датчика, Д5 и Д6, распложены вблизи верхнего и нижнего полюсов МК: Д5  $(R_5, \Phi_5, \Theta_5)$ , Д6  $(R_6, \Phi_6, \Theta_6)$ .

Комплекс оборудования работает следующим образом. После процедуры определения координат центра МК с помощью двух датчиков Д1, Д2 и КИМ производится юстировка лазерных пучков. Для решения этой задачи используют датчики Д1–Д6 и КИМ, размещённый на 6-ти осевом позиционере в центре МК.

#### 4.1. Юстировка группы каналов на грань КИМ

Алгоритм юстировки всей группы лазерных пучков одного кластера в центр соответствующей грани КИМ содержит следующие этапы:

1. Фокусировка измерительного канала каждого из шести датчиков Д1–Д6 на поверхность грани КИМ, соответствующей одному из шести кластеров.

2. Совмещение изображения центра оптической метки (перекрестия, отверстия) в центре грани КИМ с центром матрицы фотоприёмника измерительного канала для каждого датчика Д1–Д6, то есть с координатами проекции центра МК на соответствующей грани КИМ.

3. Введение непрерывного юстировочного источника излучения с рабочей длиной волны  $\lambda_{\text{раб}}$  первого лазерного канала из группы каналов кластера № 1 с осью симметрии  $(\varphi_1 = 45^\circ, \theta_1 = 90^\circ)$

в фокусе выходной линзы транспортного пространственного фильтра (ТПФ) и определение его фактических энергетических значений параметров излучения вблизи центра МК. Перед этой операцией путём осевых перемещений выходных линз ТПФ должны быть реализованы плоские волновые фронты излучения юстировочного лазера на выходе всех ТПФ.

4. Фокусировка юстировочного пучка излучения первого канала кластера № 1 на соответствующую грань КИМ с наблюдением лазерного пятна и регистрацией его с помощью фотоприёмника в измерительном канале датчика Д1. Фокусировка выполняется по командам автоматически путём перемещений фокусирующей системы лазерного пучка с помощью оптической системы ФОМ, которая здесь не рассматривается. При регистрации изображения пятна излучения приёмником датчика Д1 вычисляют его параметры (размеры, коэффициент асимметрии, положение центра тяжести изображения, медиану и другие параметры). Затем с помощью специального программного обеспечения системы автоматической юстировки (САЮ) формируется команда на устройство осевого перемещения фокусирующей линзы ФОМ для совмещения центра тяжести изображения пятна излучения с заданной точкой на грани КИМ, например, с координатами центра отверстия соответствующей грани КИМ.

5. Наведение сфокусированного юстировочного пучка излучения первого канала кластера № 1 в центр грани КИМ с наблюдением процесса и регистрацией координат пятна с помощью приёмника в измерительном канале Д1 (рис. 4). Наведение выполняется по командам на исполнительные устройства путём угловых заклонов зеркала системы ФОМ первого лазерного канала на основе результатов вычислений координат центра тяжести изображения лазерного пятна.

6. Фокусировка и наведение второго лазерного канала из кластера № 1 с осью симметрии  $(\varphi_1 = 45^\circ, \theta_1 = 90^\circ)$  в заданную точку аналогично наведению первого канала. И так далее для всех лазерных пучков кластера № 1 с осью симметрии  $(\varphi_1 = 45^\circ, \theta_1 = 90^\circ)$ .

Одновременно и аналогично выполняется юстировка лазерных пучков в заданную точку (центр отверстия) грани на соответствующей грани КИМ для всех других кластеров: второго кластера с осью симметрии  $(\varphi_2 = 135^\circ, \theta_2 = 90^\circ)$ , третьего кластера с осью симметрии  $(\varphi_3 = 225^\circ, \theta_3 = 90^\circ)$ , четвёртого кластера с осью симметрии  $(\varphi_4 = 315^\circ, \theta_4 = 90^\circ)$ , а также пятого кластера с осью симметрии в верхнем полюсе МК  $(\varphi_5 = 0^\circ, \theta_5 = 0^\circ)$  и шестого кластера с осью симметрии в нижнем полюсе МК  $(\varphi_6 = 0^\circ, \theta_6 = 180^\circ)$ .

В результате процесса юстировки осуществляется фиксацию и сохранение значений линейных

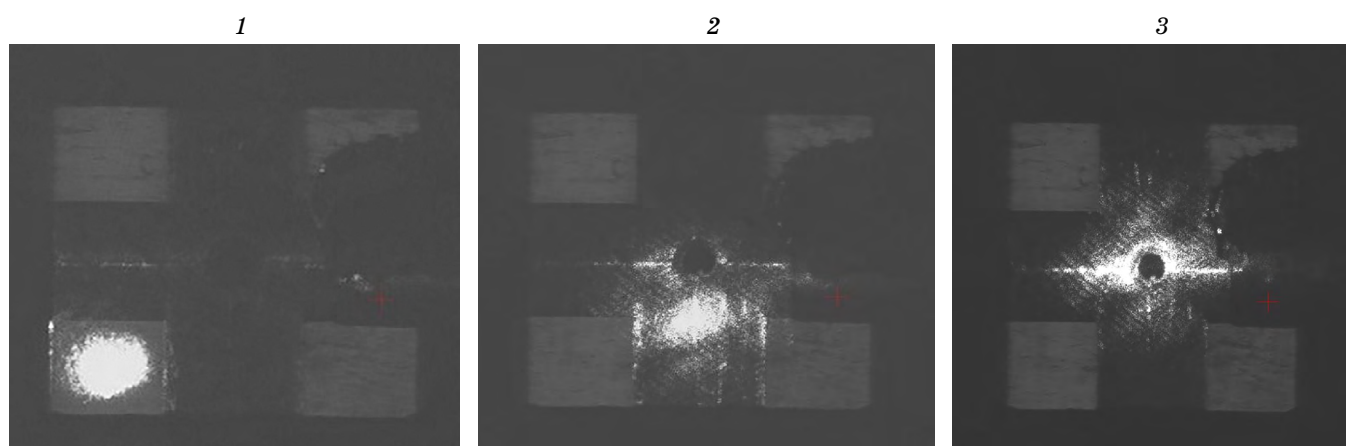


Рис. 4. Фотоснимки (1–3) процесса наведения лазерного пучка в центр грани КИМ (результаты демонстрационного наведения лазерного пучка без фокусировки пучка).

и угловых координат точек центра МК, 6 заданных точек фокусировки пучков на гранях КИМ для всех датчиков Д1–Д6 перед выполнением юстировки мишени.

#### 4.2. Юстировка мишени

На этапе юстировки мишени заменяют КИМ на мишень, снабжённую специальной 3D меткой. Предварительно координаты положения 3D метки относительно мишени измеряют с высокой точностью ( $\pm 1$  мкм) при изготовлении на стадии финишной аттестации. Для финишной аттестации готовой мишени используют высокоточное оборудование — видеоизмерительные комплексы типа Alicona Infinite Focus G5 фирмы Alicona (Австрия). Для варианта криогенной мишени непрямого облучения используется мишенная сборка — сборочная единица, содержащая охлаждаемую до криогенных температур капсулу диаметром несколько мм (мишень), помещённую в центр металлической сферы диаметром 10–15 мм с шестью отверстиями, необходимыми для введения излучения шести кластеров, диаметром 1,2 мм (бокс-конвертор), трубку-держатель с 8-ю отверстиями, специальную 3D метку, микрокапилляры подвода газов, термодатчик и нагреватель, монтируемые на трубке-держателе. Специальная 3D метка выполнена в виде квадратной гайки с равносторонним кругом в центре зеркальной поверхности на каждой из её четырёх граней (рис. 5). Программное обеспечение видеоизмерительной системы высокого разрешения Alicona Infinite Focus G5 для 3D контроля поверхности и разработанные методики для комплексного контроля параметров мишенной сборки позволяют проводить измерения отклонения формы элементов мишенной сборки и комплексного контроля параметров готовой мишени.

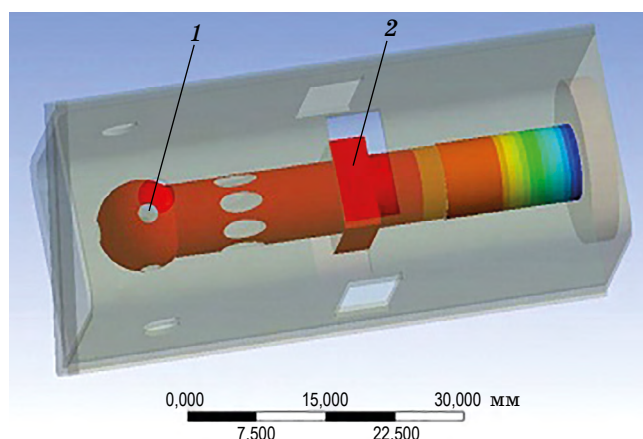


Рис. 5. Сборка криогенной мишени непрямого облучения в бокс-конверторе 1 с оптической трёхмерной меткой 2 на трубке-держателе.

При юстировке мишени двумя датчиками, например, Д1 и Д2, регистрируются и измеряются координаты центра равнояркого круга специальной 3D метки на мишенной сборке относительно центра МК.

Затем с помощью измеренных данных вычисляются рассогласования положения центра каждого из шести отверстий бокс-конвертора на мишенной сборке относительно соответствующих точек пространства сведения сфокусированных ранее лазерных пучков всех каналов. Также вычисляются и текущие рассогласования координат центров равноярких кругов специальной 3D метки на мишенной сборке относительно координат тех же центров в требуемом рабочем положении мишени.

Величина рассогласования координат положения центров каждого из шести отверстий бокс-конвертора и соответствующих точек простран-

ства сведения сфокусированных ранее лазерных пучков всех каналов уменьшается до требуемой минимальной величины с помощью позиционера мишени с регистрацией датчиками Д1 и Д2 текущего положения специальной 3D метки.

После перемещения мишени в рабочее положение, когда специальная 3D метка будет находиться в расчётном месте, проводится контроль положения центра капсулы относительно центра МК.

## 5. ВЫВОДЫ

Описанный выше комплекс оборудования позволяет реализовать предлагаемый способ полномасштабной юстировки и точного наведения лазерных пучков на мишени различного типа на многоканальной установке с помощью КИМ и ДМ. При этом выполнение указанных выше условий и алго-

ритма юстировки позволяет получить качественно новый технический эффект, а именно:

- юстировать мишени без ограничения типа геометрии сведения пучков на мишень;
- использовать одинаковые устройства для датчиков мишени и датчиков центра мишенной камеры;
- ускорить процесс полномасштабной юстировки многоканальной лазерной установки;
- получить универсальный способ юстировки для различных типов мишеней (прямого или непрямого действия, криогенной или некриогенной);
- размещать датчики мишени как на оси кластерных групп финальных оптических модулей, так и со смещением относительно этих осей;
- упростить конструкцию КИМ и снизить стоимость узла имитатора мишени;
- получить возможность автоматизации всего процесса юстировки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kalantar D.H., Nicola P.Di, Shigleton N. et.al. An overview of target and diagnostic alignment at the National Ignition Facility // Proc. of SPIE. 2012. V. 8505. P. 850509.
2. Nicola P.Di, Kalantar D., Mccarville T. et.al. Beam and target alignment at the NIF using Target Alignment Sensor (TAS) // Proc. of SPIE. 2012. V. 8505. P. 850508.
3. Luttmann M., Vincent Denis, Lanternier C. et.al. Laser Megajoul alignment to target center // Proc. of SPIE. 2011. V. 7916. P. 79160N.
4. Бельков С.А., Долголева Г.В. Определение параметров мишени для получения  $10^{17}$  нейтронов за импульс при энергии лазера 300 кДж // Квантовая электроника. 1998. Т. 25. № 1. С. 49–52.
5. Абзаев Ф.М., Бельков С.А., Бессараб А.В. и др. Исследования по непрямоу (рентгеновскому) облучению высокоаспектных оболочечных микромишеней на установке «Искра-5» // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. Вып. 1(7). С. 155–170.
6. Александров В.А., Андраманов А.В., Бельков С.А. и др. Система автоматической юстировки многопроходного восьмиканального силового модуля мегаджоулевого лазера // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 11. С. 39–49.
7. Калашников Е.В., Вензель В.И., Чарухчев А.В., Соломатин И.И., Куликов М.А. Способ наведения излучения многоканального лазера в заданные точки мишени и устройство для его осуществления // Патент РФ на изобретение № 2601505. 2015.
8. Бельков С.А., Вензель В.И., Калашников Е.В., Соломатин И.И., Чарухчев А.В. Определение центра камеры взаимодействия многоканальной лазерной установки // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 9. С. 46–51.
9. Калашников Е.В., Миловидов В.С., Чарухчев А.В. Дистанционные измерения параметров объекта по его изображениям на дисплее // Сб. трудов VII Межд. конф. по фотонике и инф. оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 556–557.