

ДОСТАВКА И НАВЕДЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МИШЕНЬ В ПЕРВЫХ ОПЫТАХ НА КАМЕРЕ МНОГОЦЕЛЕВОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Д. В. Бакайкин, А. В. Андраманов, В. Е. Гаганов, С. Ф. Попов., И. И. Соломатин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров

Введение

Многоцелевой исследовательский комплекс является составной частью установки нового поколения и предназначен для проведения экспериментов по моделированию различных физических явлений с использованием лазерного излучения 16-и лазерных каналов (2-х силовых модулей) установки [1]. Генерация и накопление энергии лазерного луча происходит на длине волны 1054 нм, а воздействие на мишень происходит при помощи излучения второй гармоники на длине волны 527 нм. Кристалл преобразователь частоты находится рядом с пятым поворотным зеркалом системы транспортировки лазерного излучения, а само зеркало применяется непосредственно для наведения лазерного излучения на мишень. Сразу за пятым поворотным зеркалом находится линза финального оптического модуля (ФОМ), которая фокусирует силовое лазерное излучение на мишень. Лучи первой и второй гармоники в фокальной плоскости второй гармоники линзы ФОМ пространственно разведены. Поэтому, точное наведение на мишень силового излучения второй гармоники $\lambda = 527$ нм можно провести только если есть юстировочный пучок с $\lambda = 527$ нм, который должен падать на линзу ФОМ в точности по направлению силового излучения. Трудность наведения лазерного излучения на мишень в первых опытах заключалась во временном отсутствии зелёного юстировочного лазера. Была предпринята попытка разработать способ наведения на мишень при помощи юстировочного излучения с $\lambda = 1054$ нм [2].

В данной работе описаны расположение и настройка основных составных частей установки нового поколения. Описаны принципы наведения лазерного излучения с $\lambda = 1054$ нм на мишень и приведены результаты первых экспериментов.

Составные части установки нового поколения

Силовой усилитель

Силовой усилитель установки нового поколения предназначен для генерации и накопления энергии лазерного излучения и построен по модульному принципу. 192 лазерных канала состоят из 24 модулей по 8 каналов в каждом. Каждый модуль работает по четырехпроходной схеме.

Транспортная система

Система транспортировки служит для передачи с помощью зеркал силового лазерного излучения на первой гармонике от ТПФ каждого канала до кристалла-преобразователя во вторую гармонику, далее через финальный оптический модуль к мишени, расположенной в цилиндрической мишенной камере. Из восьми лазерных пучков одного модуля с помощью зеркал системы транспортировки формируются два кластера по четыре лазерных пучка в каждом, которые вводятся в мишенную камеру. Первое поворотное зеркало транспортной системы устанавливается за выходной линзой транспортного пространственного фильтра, затем идёт второе зеркало, направляющее излучение на третье и дальше падая на четвертое зеркало

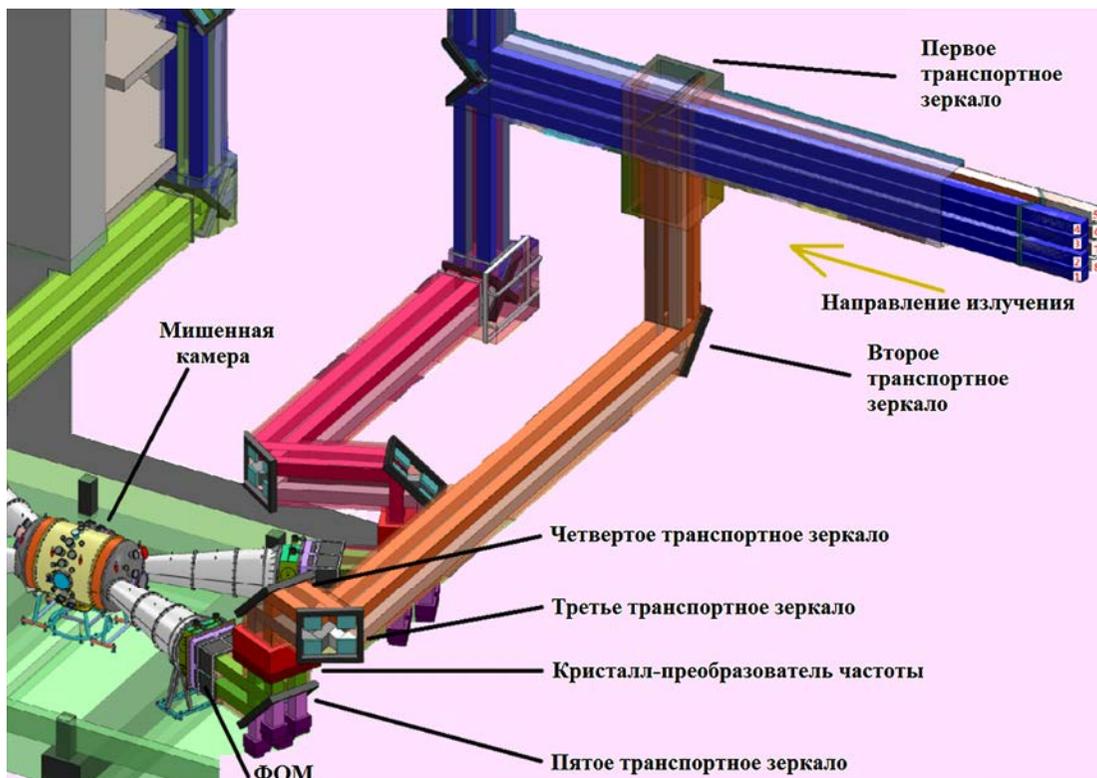


Рис. 1. Транспортная система МИК

пучок проходит через кристалл-преобразователь частоты. Последнее – пятое зеркало транспортной системы установлено перед финальным оптическим модулем на одинаковом расстоянии для всех лазерных каналов. С помощью этого зеркала осуществляется финальная стадия наведения излучения

на мишень. На рис. 1 представлена транспортная система МИК двух кластеров лазерной установки.

Финальный оптический модуль

Финальный оптический модуль (ФОМ) служит для пространственного разведения излучения первой и второй гармоники и последующей фокусировки излучения с длиной волны 527 нм на мишени прямого и непрямого облучения.

В составе конструкции МИК входят 4 финальных оптических модуля, каждый из которых предназначен для фокусировки четырех лазерных пучков, расположенных в конфигурации 2×2 . Все они равномерно расположены вокруг камеры взаимодействия. На рис. 2 показана фотография камеры взаимодействия МИК.



Рис. 2. Внешний вид камеры взаимодействия МИК

Способ наведения лазерных пучков на мишень, результаты первых экспериментов

Как было сказано ранее, сразу за пятым поворотным зеркалом находится линза ФОМ, которая фокусирует силовое лазерное излучение на мишень. На рис. 3 схематично показаны положения линз ФОМ и траектории лазерных пучков первой и второй гармоник. Из данной схемы видим, что в фокальной плоскости второй гармоники лазерные лучи первой и второй гармоник пространственно разведены. Поэтому точное наведение на мишень силового излучения второй гармоники $\lambda = 527$ нм можно провести только если есть юстировочный пучок с $\lambda = 527$ нм, который должен падать на

линзу ФОМ в точности по направлению силового излучения с $\lambda = 1054$ нм.

Трудности в наведении излучения на мишень заключались во временном отсутствии юстировочного лазера на длине волны 527 нм, поэтому, к моменту проведения первых опытов на камере МИК была предпринята попытка разработать способ наведения на мишень при помощи юстировочного излучения с $\lambda = 1054$ нм.

Итак, исходим из того, что для ФОМ точно знаем расстояние до фокальных плоскостей $f_{1054} = 6983$ мм и $f_{527} = 6813$ мм, которые ранее были измерены на стенде.

На рис. 4 представлена общая схема заведения лазерных лучей одного кластера в камеру МИК.

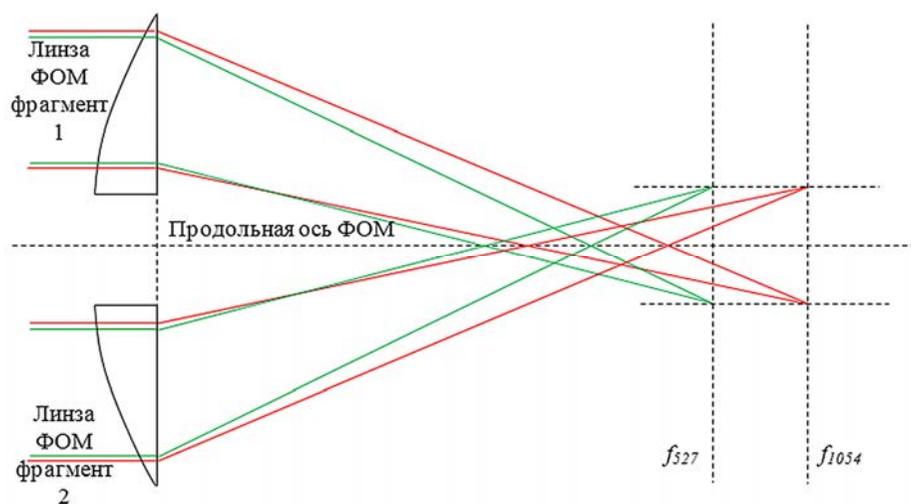


Рис. 3. Схема траектории лазерных пучков первой и второй гармоник после ФОМ

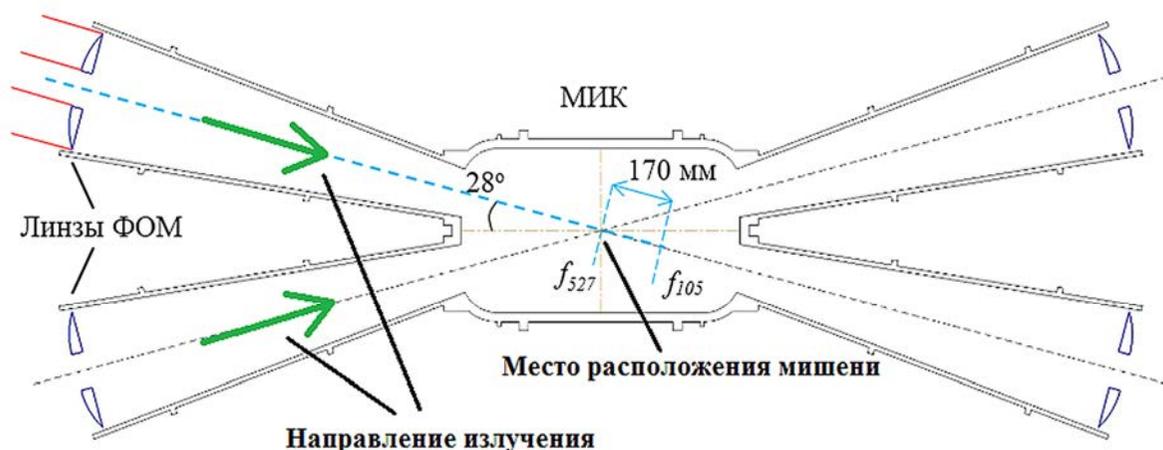


Рис. 4. Общая схема заведения лазерных лучей одного кластера в камеру МИК (вид сверху)

Поскольку в настоящее время есть юстировочные пучки первой гармоники, распространяющиеся в точности по пути силового излучения, то была предпринята попытка использовать их для наведения силовых пучков второй гармоники на мишень.

Перед этим камера МИК была оборудована двумя временными датчиками центра мишенной камеры (ДЦМК), которые включают в себя цифровые камеры для диагностики наведения излучения на мишень.

В первом опыте с мишенью в виде конуса, покрытого изнутри плёнкой из $SxDu$, требовалось провести сведение силовых лазерных пучков перед плоскостью основания конуса, при этом основание конуса обращено к ФОМ, как показано на рис. 5.

Высота конуса составляет 20 мм, основание конуса расположено на расстоянии от $f_{1054} - 158$ мм, как показано на рис. 5.

В результате была выбрана следующая стратегия первого пристрелочного опыта:

1) перпендикулярно продольной оси симметрии ФОМ данного кластера, проходящей через центр камеры МИК, на расстоянии 150 мм от центра камеры МИК (в направлении распространения лазерных лучей), устанавливаем экран для контроля

настройки сведения лазерных пучков излучения первой гармоники;

2) после сведения лазерных пучков излучения первой гармоники по пункту 1, перпендикулярно продольной оси симметрии ФОМ данного кластера вдвигаем экран-мишень, расположенную на расстоянии 150 мм ближе к ФОМ так, что центр экрана совпадает с центром камеры МИК.

В результате попадания на экран-мишень силовых пучков второй гармоники в первом пристрелочном опыте можно будет оценить, как расположить пучки первой гармоники в плоскости f_{1054} так, чтобы в плоскости $f_{1054} - 158$ мм силовые пучки второй гармоники уместились в апертуре основания конуса $\varnothing \leq 5$ мм.

Во время подготовки к пристрелочному опыту для сведения лазерных пучков $\lambda = 1054$ нм, в середине алюминиевого экрана было просверлено отверстие диаметром ≤ 1 мм, в которое наводилось юстировочное излучение с $\lambda = 1054$ нм. Экран-мишень была установлена в фокальную плоскость f_{1054} , перпендикулярно продольной оси ФОМ.

Сведение лазерных пучков $\lambda = 1054$ нм проводили по следующей схеме: перемещение лазерного пятна по экрану производится

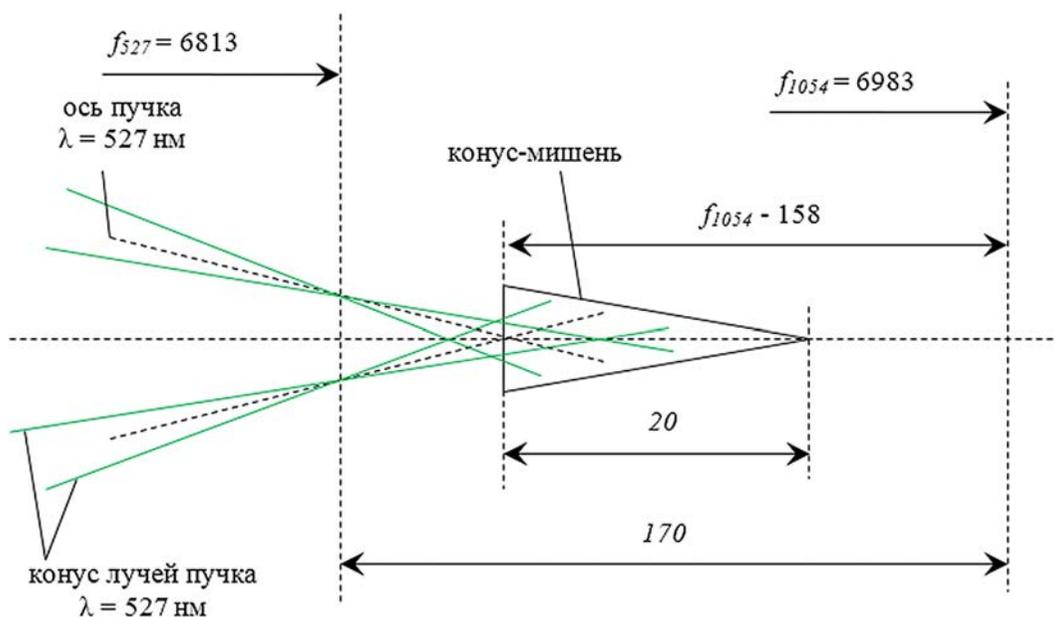


Рис. 5. Схема наведения силовых лазерных пучков на конусную мишень

заклонами пятого транспортного зеркала, которое управляется шаговыми моторами. Поэтому было определено число шагов мотора при движении фокального пятна, например, по горизонтальному диаметру отверстия. То есть требовалось выставить каждый из четырёх пучков на край отверстия, а затем передвинуть внутрь отверстия на определённое число шагов.

На рис. 6 представлена фотография подсвеченного отверстия с камеры ДЦМК.

В итоге был произведён выстрел по экрану-мишени, установленному в плоскости $f_{1054} = 150$ мм. Результаты опыта представлены на рис. 7.

Видно, что отверстия от силовых пучков излучения второй гармоники расположены в вершинах квадрата со стороной $\sim 4,3$ мм, как показано на рис. 7.

Результаты опыта по изучению сведения пучков можно интерпретировать следующим образом. Так как экран-мишень была установлена за фокальной плоскостью f_{527} , то можно предположить, что осевые пучки излучения второй гармоники пересекли продольную ось симметрии ФОМ данного кластера, как показано на рис. 8.

На основании рис. 8 был проведён расчёт смещения фокальных пятен излучения первой гармоники в фокальной плоскости f_{1054} так, чтобы в плоскости основания конуса лазерные пучки $\lambda = 527$ нм уместились в апертуре основания конуса $\varnothing \leq 5$ мм.

Расчёт проводился по следующей схеме:

Прямая ОМ – продольная ось симметрии ФОМ. ZM и ZP осевые лучи пучков $\lambda = 1054$ нм и $\lambda = 527$ нм – соответственно, которые начинаются в середине апертуры линзы ФОМ. М – точка пересечения луча первой гармоники с продольной осью симметрии ФОМ в фокальной плоскости первой гармоники $f_{1054} = 6983$. Р – точка попадания луча второй гармоники на экран-мишень в пристрелочном эксперименте. По результатам пристрелочного эксперимента $РТ \approx 2,15$ мм.

А – точка центра основания конуса-мишени (по условиям опыта, расположенная на

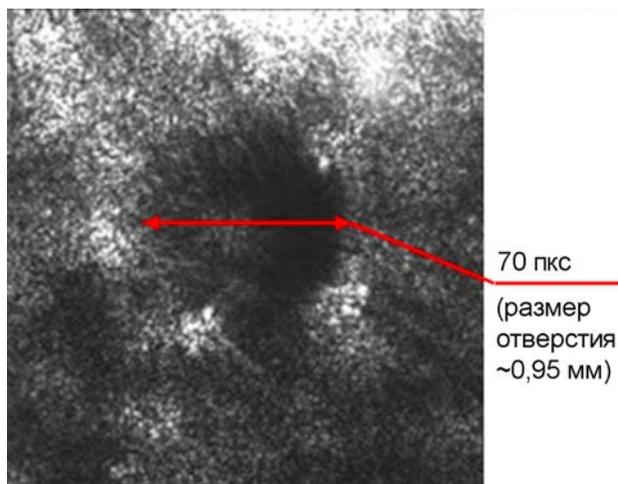


Рис. 6. Фотографии подсвеченного отверстия с камеры ДЦМК

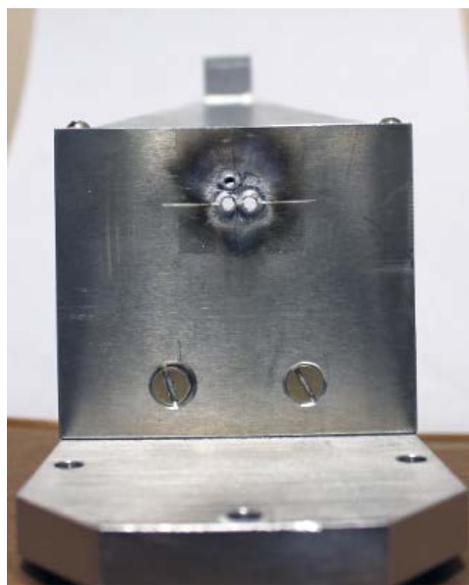


Рис. 7. Фотография мишени пластины после проведения опыта

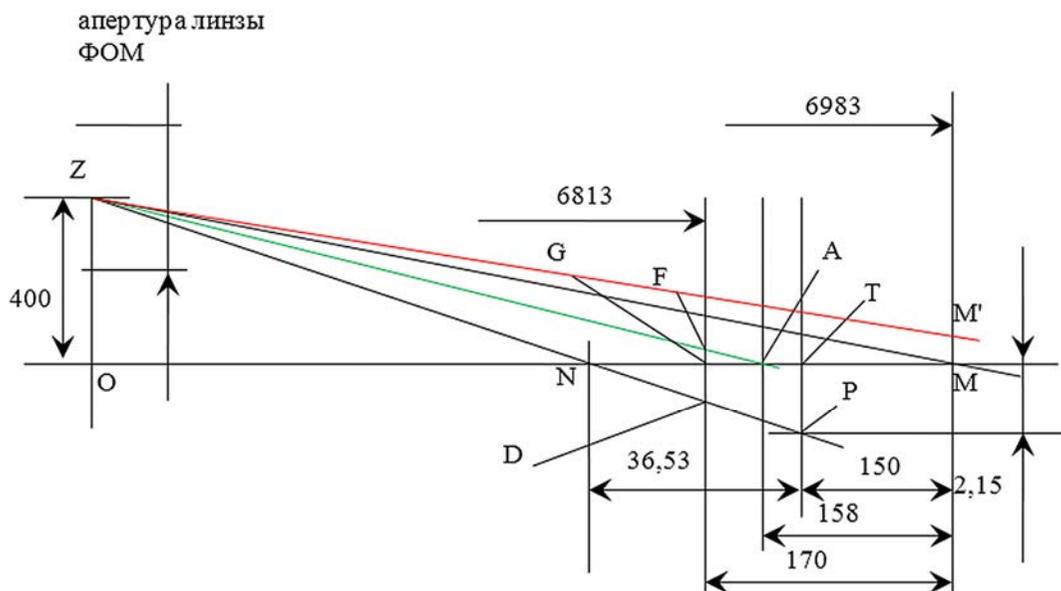


Рис. 8. Положение осевых лучей лазерных пучков первой и второй гармоник, относительно продольной оси симметрии ФОМ

158 мм левее относительно фокальной плоскости $\lambda = 1054$ нм). Поэтому ZA – искомым осевой луч пучка $\lambda = 527$ нм. Идея для расчёта состоит в вычислении угла смещения $\Delta\phi_{527}$ осевого луча ZA относительно осевого луча ZP (ZP – луч пристрелочного эксперимента). Лазерные пучки первой и второй гармоник падают на линзы ФОМ под одинаковым углом, значит сдвиг на угол смещения $\Delta\phi_{527}$ излучения $\lambda = 527$ нм приведёт к такому же угловому сдвигу излучения $\lambda = 1054$ нм. Следовательно, можно вычислить пространственный сдвиг положения фокальных пятен в фокальной плоскости $f_{1054} = 6983$. Это позволит провести наведение на мишень при помощи юстировочного излучения $\lambda = 1054$ нм.

Итак,

$$\Delta\phi_{527} = \frac{FD}{f_{527}}, \quad (1)$$

где F – точка пересечения лучом ZA плоскости f_{527} , D – точка пересечения лучом ZP плоскости f_{527} .

Треугольники ZNO и PNT подобны, поэтому

$$NT = \frac{6833 \cdot PT}{ZO + PT} = 36,531 \quad (2).$$

Треугольники NTP и NGD подобны, поэтому

$$GD = \frac{NG \cdot PT}{NT} = 0,973 \quad (3).$$

Треугольники ZAO и FAG подобны, поэтому

$$FG = \frac{ZO \cdot AG}{OA} = 0,703 \quad (4).$$

$$FD = FG + GD = 1,676 \quad (5)$$

Тогда сдвиг осевого луча ZM составит:

$$MM' = \frac{FD}{f_{527}} \cdot f_{1054} = 1,718 \quad (6).$$

На рис. 9 представлена карта расположения лучей в фокальной плоскости f_{1054} .

Настройка проводилась следующим образом:

1) любым из лазерных каналов наводимся на край отверстия $\varnothing = 1$ мм при этом край отверстия рассеивает излучение и на цифровой камере ДЦМК видим изображение отверстия.

2) Вокруг изображения отверстия рисуем реперные окружности, равные ему по

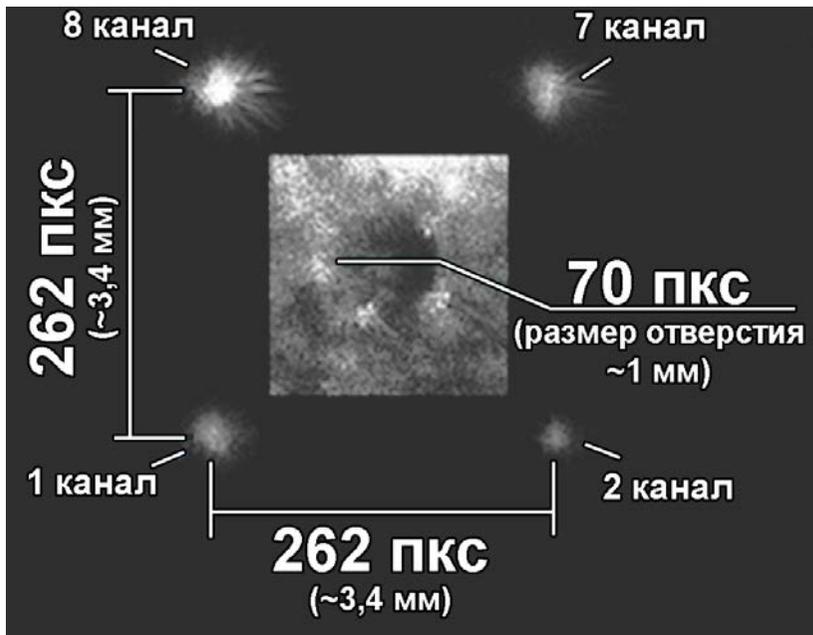


Рис. 9. Схема расположения юстировочных пучков $\lambda = 1054$ нм в фокальной плоскости f_{1054}

диаметру. Описываем окружности квадратом. Теперь, если мысленно перенести изображение квадрата в плоскость f_{1054} , то сторона квадрата будет иметь размер 3 мм.

Измерение диаметра фокальной перетяжки излучения юстировочного пучка $\lambda = 1054$ нм показало:

- размер фокального пятна (по основанию) ≈ 31 пиксель;
- размер пикселя – 7,4 мкм;
- коэффициент перестроения продольного ДЦМК ≈ 2 раза.

Поэтому фокальное пятно ≈ 460 мкм, а половина диаметра пятна $\approx 0,23$ мм.

Из формулы (6) следует, что в плоскости f_{1054} лазерные пучки $\lambda = 1054$ нм следует расположить со смещением относительно центра юстировочного отверстия по вертикали и горизонтали на $\sim 1,7$ мм, то есть в вершинах квадрата со стороной $\sim 3,4$ мм, или чтобы края фокальных пятен касались углов квадрата 3×3 мм как показано на рис. 9.

В результате был проведён опыт по воздействию лазерных пучков на коническую мишень. На рис. 10 представлена фотография установленной конусной мишени.



Рис. 10. Фотография установленной конусной мишени

Фотография узла крепления конуса после проведения опыта представлена на рис. 11.

По фотографиям видим, что отверстие, где крепился конус, осталось круглым и деформировано симметрично. Поэтому можно предполагать, что лазерные пучки были наведены правильно.

В следующем эксперименте на камере МИК требовалось сведение лазерных пучков в фокальной плоскости f_{527} на плоской алюминиевой мишени. По аналогичным предположениям и формулам (1)–(6) были рассчитаны положения осевых пучков излучения $\lambda = 1054$ нм, когда осевые пучки излучения



Рис. 11. Фотография места крепления конусной мишени после опыта

Рис. 12. Фотография плоской мишени после проведения опыта

$\lambda = 527$ нм будут сведены в фокальной плоскости f_{527} . В результате был проведён третий опыт с плоской алюминиевой мишенью. Фотография мишени после проведения опыта представлена на рис. 12.

По фотографиям видно, что на мишени образовался кратер диаметром $\sim 4,3$ мм и глубиной $> 3,5$ мм. Кратер имеет круглую форму, хотя одновременно воздействовало четыре лазерных пучка. Это говорит о том, что описанный способ наведения пучков $\lambda = 527$ нм по юстировочным пучкам $\lambda = 1054$ нм не имеет серьёзных ошибок и продемонстрировал хорошую работоспособность.

Заключение

В данной работе была разработана методика наведения лазерных пучков с $\lambda = 527$ нм при помощи юстировочных пучков с $\lambda = 1054$ нм. Данная методика может быть применена лишь для наведения четырёх пучков одного кластера лазерного модуля.

Проведены три успешных опыта с различными типами мишеней на камере взаимодействия МИК с использованием одного кластера установки нового поколения.

Приведены результаты данных экспериментов, позволяющие сделать вывод, что примененный способ наведения на мишень не имеет серьёзных ошибок и продемонстрировал хорошую работоспособность.

Список литературы

1. Александров В. А., Андраманов А. В., Бельков С. А., и др. Система автоматической юстировки многопроходного восьмиканального силового модуля мегаджоульного лазера // Оптический журнал. 2018. Т. 85, № 11. С. 39–49.
2. Андраманов А. В., Гаганов В. Е., Глушков М. С., Соломатин И. И. Способ наведения частотно преобразованного излучения канала лазерной установки на мишень // Патент РФ на изобретение № 2758944 от 03.11.2021 г.