

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАСТРОЙКИ МИШЕНИ В ТРАНСПОРТНОМ ПРОСТРАНСТВЕННОМ ФИЛЬТРЕ

М.С. Глушков, И. И. Соломатин, А. В. Виноградов, А. В. Андраманов, Д. В. Бакайкин

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

Лазерная установка нового поколения на основе неодимового стекла рассчитана на облучение мишени излучением второй гармоники (2ω) [1]. Конструкция финального оптического модуля (ФОМ) включает клиновый элемент, предназначенный для разведения второй гармоники и остатков первой гармоники (ω), поэтому наведение лазерных пучков на мишень должно осуществляться на частоте второй гармоники. Для наведения на мишень настроечные источники излучения 2ω будут вбрасываться в фокальные плоскости 2ω выходных линз транспортных пространственных фильтров (ТПФ) каждого из каналов. В качестве настроечных источников 2ω предполагается использовать лазерные диоды с расходимостью порядка нескольких градусов или лазеры. Трудности в совмещении направлений распространения лазерного излучения основной гармоники и настроечного излучения второй гармоники вызваны наличием диагностического клина величиной $3'$ ($0,000873$ рад), установленного под углом $41^\circ 12'$ за выходной линзой ТПФ. Необходимо так вбрасывать настроечное излучение, чтобы после диагностического клина оно распространялось по пути излучения основной гармоники.

Вбрасываемый источник излучения 2ω входит в состав системы транспортировки излучения к камере взаимодействия. На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема стенда вбрасываемого источника излучения второй гармоники. Стенд включает два источника излучения ω и 2ω , выходную линзу ТПФ, диагностический клин, цифровую камеру с зеркальным объективом, стойку управления со специальным программным обеспечением.

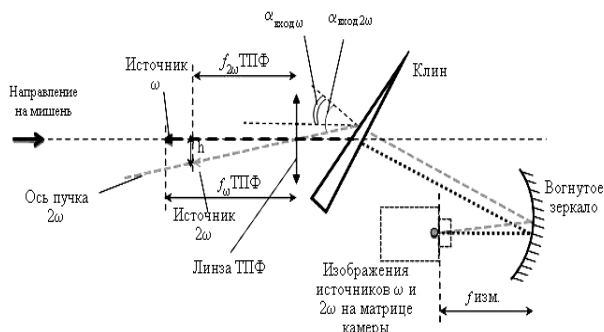


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема стенда вбрасываемого источника излучения второй гармоники

Стенд был создан для экспериментальной проверки расчетных значений величины поперечного сдвига h источника 2ω , при котором пучки лучей ω и 2ω за клином распространяются параллельно друг другу.

Лазерные диоды источника ω установлены в отверстия на горизонтальной планке. Центральное отверстие предназначено для предварительной настройки стенда. Диоды источника ω расположены симметрично относительно центрального отверстия и направлены на линзу ТПФ. Источник излучения ω находится в фокальной плоскости выходной линзы ТПФ на расстоянии f_{ω} ТПФ = 14228 мм. При этом после линзы ТПФ излучение каждого из двух лазерных диодов становится плоскопараллельным. Собственно источник излучения ω является виртуальным и находится в центре отрезка, соединяющего два лазерных диода.

Источник излучения 2ω выполнен в виде вертикальной планки с отверстием (в середине), установленной на трехкоординатный линейный транслятор, позволяющий осуществлять перемещения с точностью 10 мкм. В отверстие установлен лазерный диод с излучением 2ω направленный на линзу ТПФ. Источник излучения 2ω находится в фокальной плоскости 2ω линзы ТПФ на расстоянии $f_{2\omega}$ ТПФ = 13918 мм. Излучение источника 2ω после линзы ТПФ так же становится плоскопараллельным.

Диагностический клин расположен за линзой ТПФ. Клин экспериментального стенда из стекла К8 имеет угол при вершине $0,0071$ рад. Клин заклонен в горизонтальной плоскости на угол 45° . Вершина клина ориентирована так, чтобы лучи проходящие через клин отклонялись в горизонтальной плоскости (плоскости рис. 1). После прохождения клина лучи источников ω и 2ω остаются плоскопараллельными. Диагностический клин отклоняет лучи ω и 2ω на разные углы. Поэтому для того, чтобы на выходе из клина пучки лучей ω и 2ω распространялись параллельно друг другу необходимо, чтобы источник 2ω был сдвинут относительно прямой, проходящей через центр ТПФ4 (источник ω) и центр выходной линзы ТПФ, как показано на рис. 1, при этом $\alpha_{пад2\omega} > \alpha_{пад\omega}$.

На стенде используются цифровая камера PixeLINK B741EG имеющая следующие характеристики: разрешение – 1280×1024 пикселей; размер матрицы – $8,6 \times 6,8$ мм; размер пикселя – $6,56$ мкм; глубина «цвета» – 256 градаций серого. Цифровая камера

подключена к управляющему компьютеру. Специальное программное обеспечение описано в отдельной главе.

Цифровая камера служит для определения величины угла между падающими на зеркало пучками ω и 2ω . После клина размещено измерительное вогнутое сферическое зеркало с f изм = 1193 мм. В фокальной плоскости зеркала, установлена цифровая камера. Между клином и сферическим зеркалом установлены два плоских поворотных зеркала системы транспортировки (не показаны на рис. 1).

Стандартный способ определения угла между двумя пучками лучей состоит в измерении расстояния между геометрическими серединами световых пятен в фокальной плоскости линзы или зеркала [2]. Диаметр каждого из пятен будет характеризовать собственную расходимость пучков. Середина фокального пятна будет соответствовать оси пучка. Так как по условиям задачи длины волн в пучках различаются (пучки лучей ω и 2ω), то в экспериментах в качестве диагностического объектива выбрано именно вогнутое зеркало. Линза может исказить результаты из-за собственной дисперсии.

Выставление изображений пучков с точностью до 1-го пикселя по камере при фокусном расстоянии вогнутого зеркала 1193 мм – будет соответствовать углу между пучками лучей ω и 2ω за клином – $5,6 \cdot 10^{-6}$ рад (запланированная по техническому проекту лазерной установки точность настройки по углу составляет $\sim 2,6 \cdot 10^{-6}$ рад)[1]. Использование вогнутого зеркала с большим фокусным расстоянием позволит увеличить разрешение при диагностике угла между пучками лучей ω и 2ω .

Оптическая система, состоящая из линзы ТПФ и измерительного сферического зеркала, перестраивает изображение источника ω с уменьшением

~ 12 раз, а изображение источника 2ω с уменьшением $\sim 11,7$ раз. Получаем, что по камере разрешение величины поперечного сдвига Δh источника 2ω составляет ~ 80 мкм на пикселей, что сравнимо с требованиями проекта – 75 мкм. Последняя оценка так же указывает на необходимость использование вогнутого зеркала с большим фокусным расстоянием в создаваемой установке.

Программа обработки данных с цифровой камеры позволяет регистрировать изображения лазерных диодов, задающих положения источников, и вычислять их координаты.

На рис. 2 представлено окно программы, с помощью которой проводилась регистрация изображений лазерных диодов источников ω и 2ω на камере и определение координат изображений источников. Алгоритм определения координат центров изображений диодов основан на вычислении «центра тяжести», поэтому точность определения может быть меньше одного пикселя. Измеренная дисперсия в условиях данного стенда не превышает 0,3 пикселя.

В левом окне программы зафиксировано изображение 3-х маркеров. Крайние горизонтальные диоды излучают на частоте основной гармоники, в середине – диод источника 2ω . В правом окне программы предусмотрены кнопки «источник ω » и «источник 2ω » для вычисления координат источников. Под этими кнопками расположены окошки с координатами центров в пикселях камеры. На рисунке видно, что расхождение по горизонтали составляет 0,1 пиксель (0,656 мкм), что означает совмещение направлений распространения пучков ω и 2ω в горизонтальном направлении.

На рис. 3 представлена схема распространения световых лучей через клин величиной ϕ с коэффициентом преломления n .

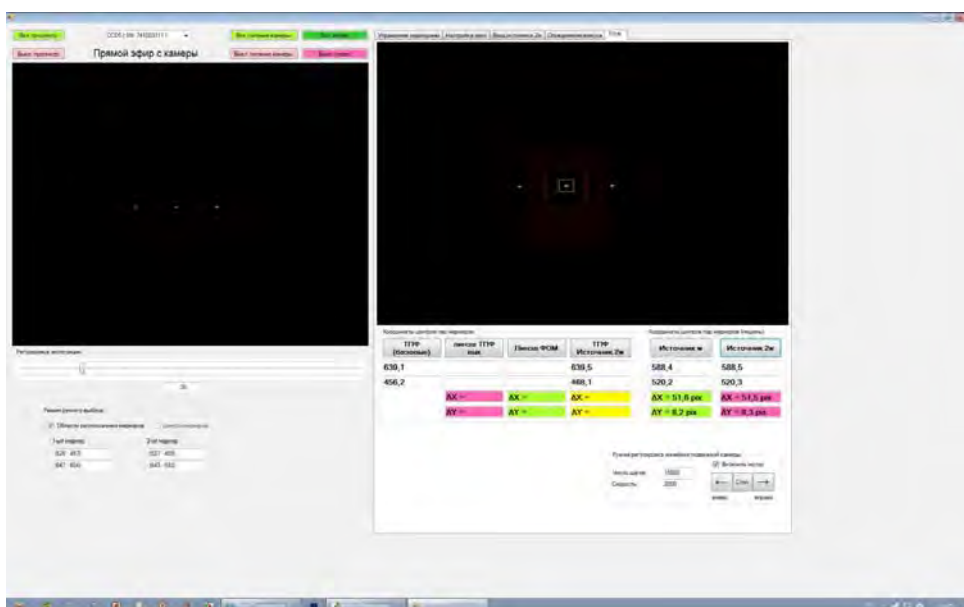


Рис. 2. Окно программы регистрация изображений диодов источников ω и 2ω на камере и вычисления координат источников

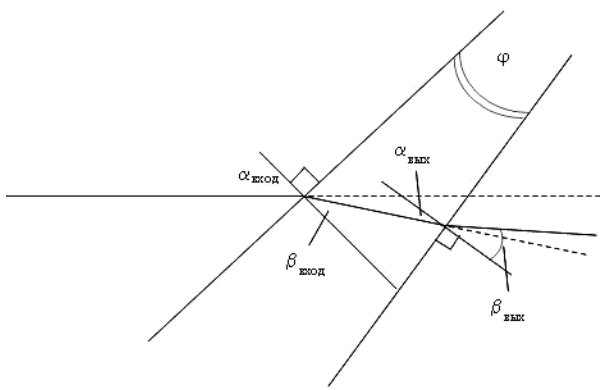


Рис. 3. Ход лучей через клин

В соответствии с законом преломления

$$\sin \alpha_{\text{вход}} = n \sin \beta_{\text{вход}} \quad (1)$$

$$\sin \beta_{\text{вых}} = n \sin \alpha_{\text{вых}} \quad (2)$$

Углы $\beta_{\text{вход}}$, $\alpha_{\text{вых}}$, φ рис. 2 связаны соотношением

$$\alpha_{\text{вых}} = \beta_{\text{вход}} - \varphi \quad (3)$$

Тогда

$$\beta_{\text{вых}} = \arcsin \left[n \cdot \sin \left(\arcsin \frac{\sin \alpha_{\text{вход}}}{n} \right) - \varphi \right] \quad (4)$$

Введем обозначения углов падения на клин для разных длин волн:

$\alpha_{\text{вход } \omega}$ – угол падения «оси» пучка с частотой ω на клин – известен и задается по проекту лазерной установки или по условию проведения эксперимента;

$\alpha_{\text{вход } 2\omega}$ – угол падения «оси» пучка с частотой 2ω на клин.

Требуется, чтобы углы выхода из клина для пучков лучей с ω и 2ω совпадали

$$\beta_{\text{вых } \omega} = \beta_{\text{вых } 2\omega} \quad (5)$$

Поэтому при заданном угле падения основной гармоники можно вычислить необходимый угол падения для излучения второй гармоники (пучок 2ω)

$$\alpha_{\text{вход } 2\omega} = \arcsin \left[n_{2\omega} \cdot \sin \left\{ \varphi + \arcsin \times \left\langle \frac{n_{\omega}}{n_{2\omega}} \sin \left(\arcsin \left(\frac{1}{n_{\omega}} \sin \alpha_{\text{вход } \omega} \right) \right) - \varphi \right\rangle \right\} \right] \quad (6)$$

Для обеспечения нулевого угла между пучками лучей с ω и 2ω за клином требуется сдвинуть источник 2ω относительно прямой, проходящей через центр ТПФ4 и центр выходной линзы ТПФ на величину h , как показано на рис. 1. На основании построений рис. 1

$$\alpha_{\text{вход } 2\omega} - \alpha_{\text{вход } \omega} = \text{tg} \left(h / f_{2\omega \text{ ТПФ}} \right) \quad (7)$$

Откуда

$$h = f_{2\omega \text{ ТПФ}} \cdot \arctg \left(\alpha_{\text{вход } 2\omega} - \alpha_{\text{вход } \omega} \right) \quad (8)$$

Подставляя (6) в (8) получаем выражение для h , которое в результате зависит от $\alpha_{\text{вход } \omega}$, n_{ω} , $n_{2\omega}$ и φ (угла при вершине клина).

На рис. 4 представлены зависимости величины сдвига настроенного источника 2ω от угла падения излучения первой гармоники на диагностический клин, когда угол между пучками лучей ω и 2ω за клином равен 0. Угол падения a задается в радианах. Величина сдвига $h(a)$ представлена в мм.

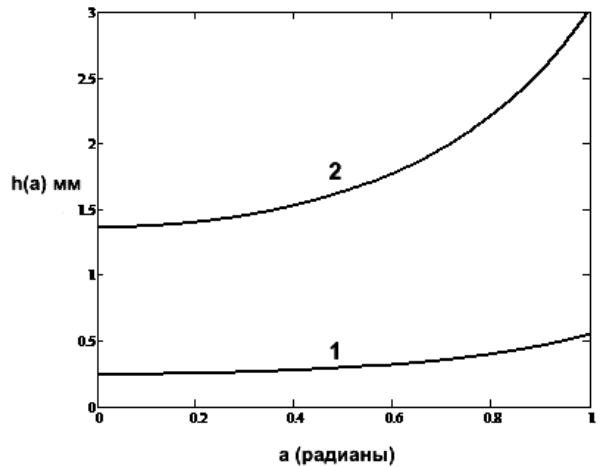


Рис. 4. Зависимость величины сдвига источника 2ω от угла падения излучения первой гармоники на диагностический клин: 1 – лазерная установка нового поколения, 2 – экспериментальный стенд

По проекту лазерной установки угол падений луча первой гармоники на клин составляет $a = ,719076$ рад – $41^{\circ}12'$. Для этого значения угла падения « a » величина сдвига источника h составляет 0,363 мм. Это искомое значение сдвига вбрасываемого источника 2ω на лазерной установке нового поколения относительно прямой – центр диафрагмы ТПФ4 – оптический центр выходной линзы ТПФ, когда угол между пучками лучей ω и 2ω за клином равен 0.

Угол при вершине клина экспериментального стенда $\approx 0,007$ рад. В случае падения излучения основной гармоники на клин под углом 45° (0,785 рад) пучки лучей ω и 2ω после клина будут распространяться параллельно друг другу, когда сдвиг источника 2ω в фокальной плоскости линзы ТПФ составит $h = 2,175$ мм.

Зависимость h от разности коэффициентов преломления для разных длин волн и от величины угла φ более простые – близкие к линейным в интервале разумных величин.

В таблице представлены параметры диагностического клина и результаты расчета величины сдвига h источника излучения 2ω относительно оптической оси, при которых за клином угол между пучками ω и 2ω равен 0° .

Параметры диагностического клина
и результаты расчетов

	Макет	Лазерная установка нового поколения
Угол клина, φ	0,0071 рад (24,4')	0,000873 рад (3')
$\alpha_{\text{пад}} 1054$ (задается)	0,7853 рад (45°)	0,7190 рад (41°12')
$n_{\text{клина}}$	= 1,508 1,522	= 1,4507 1,4606
h	2,175 мм	0,385 мм

Проведение эксперимента включало 3 основных этапа.

Этап 1. Калибровка стенда:

- продольным перемещением камеры добиваемся минимального пятна изображения источника ω ;
- продольным перемещением источника 2ω добиваемся минимального пятна изображения источника 2ω в камере;
- при помощи микрометрической подвижки сдвигаем источник излучения 2ω в поперечном направлении на 20 мм;
- измеряем величину смещения в пикселях изображения источника 2ω на камере;
- вычисляем поперечное увеличение оптической системы для источника 2ω .

Этап 2. Фиксация нулевого положения источника 2ω :

- выводим клин из оптического тракта системы транспортировки лазерного излучения и транспортными поворотными зеркалами корректируем положение источника 2ω на измерительном зеркале и камере;
- при помощи микрометрических подвижек сдвигаем источник в поперечных горизонтальном и вертикальном направлениях до совмещения координат изображений источников излучения ω и 2ω на камере. При этом центр источника ω – центр источника 2ω и оптический центр выходной линзы ТПФ оказываются на одной прямой.

Этап 3. Определение величины сдвига источника 2ω обусловленного диагностическим клином:

- устанавливаем клин под необходимым углом за линзой ТПФ и транспортными поворотными зеркалами корректируем положение источника 2ω на измерительном зеркале и камере;
- при помощи микрометрических поперечных подвижек перемещаем источник 2ω до совмещения координат центров изображений источников ω и 2ω на камере. По лимбам микрометрических подвижек измеряем перемещения h_x и h_y ;
- величину h , равную корню квадратному от суммы квадратов h_x и h_y , будем сравнивать с теоретически вычисленной по формулам.

Графики, представленные на рис. 4, показывают, что удобно провести измерения расчетных величин для двух ориентаций клина при фиксированном положении источника 2ω :

- угол падения излучения основной гармоники на клин - 45° (0,785 рад);
- угол падения излучения основной гармоники на клин ~0,1 рад – в диапазоне углов падения 0–0,1 рад расстояние между изображениями пучков лучей ω и 2ω на камере 2 слабо зависит от точности выставления угла падения излучения на клин.

Расчетным путем было найдено, что при угле падения излучения основной гармоники на клин равном 45° (0,785 рад) пучки лучей ω и 2ω после клина будут распространяться параллельно друг другу в случае сдвига источника 2ω в фокальной плоскости линзы ТПФ на величину $h = 2,175$ мм (график 2 на рис 4). Реальные измерения при установке клина под углом 45° (0,785 рад) дали результат $h = 2,15$ мм (измерения микрометра), что на 25 мкм отличается от расчетного значения (определенная в разделе 1 точность позиционирования – лучше 80 мкм).

По расчетам в случае установки первой грани клина по нормали к падающему пучку лучей ω (угол падения излучения основной гармоники на клин равен 0) пучки лучей ω и 2ω после клина будут распространяться параллельно друг другу, когда источник 2ω в фокальной плоскости линзы ТПФ сдвинут на $h = 1,364$ мм. Реальные измерения дают значение $h = 1,38$ мм (измерения микрометра), что находится в пределах погрешности наших измерений.

Итак, экспериментальная проверка расчетных значений величины сдвига источника 2ω показала, хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений. Поэтому величина сдвига источника 2ω – $h = 385$ мкм, относительно прямой - центр диафрагмы ТПФ4 – центр выходной линзы ТПФ в реальном лазерном канале лазерной установки нового поколения – обоснована. То есть на основании этих результатов – можно проводить разработку конструкции узла вбрасываемого источника.

Было показано, что в канале лазерной установки нового поколения центр источника 2ω будет сдвинут в горизонтальном направлении на расстояние $\approx 0,385$ мм от прямой – центр диафрагмы ТПФ4 – центр выходной линзы ТПФ. Для определения конструкции это несущественная величина. Конструкция определяется другими факторами:

- вбрасываемый источник 2ω должен быть размещен в фокальной плоскости $f_{2\omega}$ ТПФ на расстоянии 700 мм от диафрагмы ТПФ4;
- источник должен устанавливаться на систему из трех линейных трансляторов, один из которых обеспечивает функцию вбрасывания с расстояния, на котором элементы конструкции источника находятся вне зоны рабочего излучения;
- мощный лазерный диод с $\lambda \approx 520$ нм требует наличия теплоотвода. Во время экспериментов было

выяснено, что для обеспечения требуемого температурного диапазона для рассеивания тепла лазерного диода достаточна алюминиевая полоска 5×60 мм. Так как источник 2ω будет находиться в вакууме, то размер тепловода требуется уточнить;

- элементы конструкции источника 2ω не должны закрывать излучение источника ω при калибровке в канале точной диагностики;
- лазерные диоды источников ω и 2ω не должны попадать в поле зрения камеры в канале точной диагностики.

На рис. 5 показан эскиз расположения лазерных диодов на фрагменте настроечного диска диафрагменного узла ТПФ4 (источник ω) и пластины источника 2ω .

Лазерные диоды ТПФ4 установлены на планке ориентированной под 45° к горизонту.

Диаметр силового лазерного пучка в плоскости источника 2ω не будет превышать 10 мм. Таким образом, чтобы полностью выводить пластину источника 2ω из тракта распространения силового лазерного луча, достаточно использовать транслятор с диапазоном перемещения ~ 25 мм.

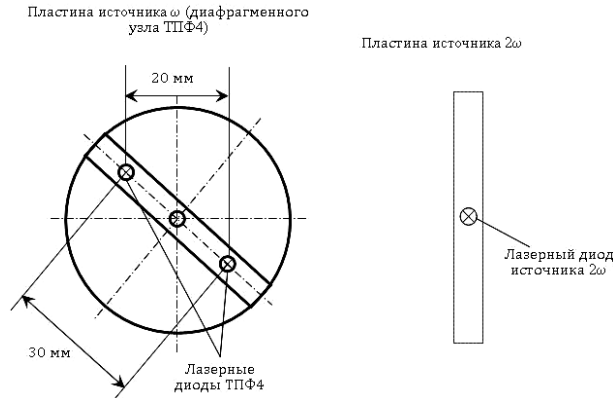


Рис. 5. Вид диафрагменной пластины ТПФ4 и источника 2ω

На рис. 6 представлена оптическая схема системы транспортировки излучения к мишени одного канала лазерной установки нового поколения в режиме настройки.

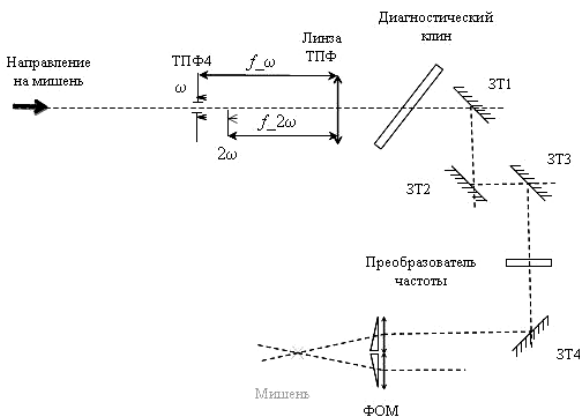


Рис. 6. Система транспортировки лазерного излучения к мишени

По ходу лазерного луча четвертого прохода, выходящего из усилительного канала, в режиме настройки системы транспортировки последовательно расположены следующие элементы:

- источник излучения ω , находящийся в плоскости диафрагмы ТПФ4;
- источник излучения 2ω , находящийся в фокусе 2ω выходной линзы ТПФ;
- выходная линза ТПФ;
- диагностический клин;
- поворотные зеркала системы транспортировки ЗТ1 – ЗТ3;
- кристалл преобразователя частоты;
- поворотное зеркало системы транспортировки ЗТ4;
- финальный оптический модуль (ФОМ).

Наведение лазерных пучков на мишень в лазерной установке нового поколения будет осуществляться на частоте второй гармоники при помощи дополнительного настроечного лазера, вбрасываемого в ТПФ. Поэтому требуется совмещение лазерного пучка основной гармоники с лазерным пучком настроечного лазера. Совмещение усложняется наличием двух диспергирующих элементов – выходной линзы ТПФ и диагностического клина. Совмещение лазерных пучков необходимо осуществлять до преобразователя частоты и контролировать с помощью сферического зеркала и камеры, установленных в канале точной диагностики. Излучение в канал точной диагностики должно заводиться при помощи вбрасываемого плоского зеркала. В кристалле преобразователя, даже если он имеет клин, не произойдет нарушения совмещения из-за совпадения коэффициентов преломления. Разделение произойдет в элементах ФОМа. ФОМ включает клиновый элемент, предназначенный для разведения второй гармоники и остатков первой гармоники. Здесь важно совмещение настроечного излучения 2ω и преобразованного во вторую гармонику рабочего излучения.

Наличие дополнительного канала точной диагностики, ответственного за сведение лазерных пучков обеспечит отсутствие погрешностей вызванных неточностями в изготовлении и ориентации диагностического клина и выходной линзы ТПФ.

Далее описывается предложенный способ настройки, включающий калибровку и настройку в опыте.

Калибровка источника 2ω :

- устанавливается источник 2ω в предположительное положение настройки;
- излучение источников ω и 2ω направляется на сферическое зеркало с цифровой камерой в его фокусе;
- с помощью моторизованных трансляторов источника 2ω совмещаются изображения источников ω и 2ω на матрице цифровой камеры сферического зеркала;
- выводится вбрасываемое зеркало;
- источник 2ω перемещается транслятором из положения настройки в рабочее положение на строго определенное число шагов N.

Литература

Настройка положения источника 2ω в опыте:

- источник 2ω перемещается транслятором из рабочего положение в положения настройки на строго определенное число шагов N ;
- производится настройка мишени;
- источник 2ω перемещается транслятором из положения настройки в рабочее положение на строго определенное число шагов N .

1. Чернов В. Н. и др. Методы и алгоритм автоматической юстировки модуля многопучковой лазерной установки Искра-6 // Оптический журнал, Т. 73, № 1, Январь, 2006.
2. Ландсберг Г. С. Оптика. – М.: Изд. «Наука», 1976.