

УДК 621.373.325

Система автоматической юстировки многопроходного восьмиканального силового модуля мегаджоульного лазера

© 2018 г. В. А. Александров*; А. В. Андраманов**; С. А. Бельков**, доктор физ.-мат. наук; В. Г. Бородин*, канд. техн. наук; И. А. Бубнов*; В. Е. Гаганов**; С. Г. Гаранин**, доктор физ.-мат. наук, академик РАН; К. К. Коленчиков*; В. М. Комаров*, канд. физ.-мат. наук; В. К. Князев*; В. А. Малинов*, канд. техн. наук; В. М. Мигель*; В. С. Попиков*; И. А. Смирнов*; И. И. Соломатин**; В. Г. Филиппов*; А. В. Чарухчев*, канд. техн. наук

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

**Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл.

E-mail: l41@niioer.ru

Поступила в редакцию 04.09.2018

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-11-39-49

Представлены оптическая схема и состав системы автоматической юстировки многопроходного силового модуля лазерной установки нового поколения. Описана методика юстировки, основанная на системе ближнепольных и дальнепольных маркеров. Описана управляющая программа системы автоматической юстировки на операционной системе Astra Linux.

Ключевые слова: лазерная установка, автоматическая юстировка, многопроходный силовой модуль, башня, вакуумный пространственный фильтр, реверсор, диафрагменный узел, вторая гармоника, световой маркер, контроллер, управляющий компьютер, программное обеспечение.

Код OCIS: 140.3530

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российском федеральном ядерном центре — Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ) ведется работа по созданию лазерной установки нового поколения, позволяющей при фокусировке излучения второй гармоники в лазерные мишени достичь условий термоядерного горения [1]. Одной из составных частей установки является система автоматической юстировки (САЮ) [2]. Система предназначена для управления положением и ориентацией в пространстве оптических элементов установки в 192 многопроходных лазерных каналах на пути от задающего генератора до мишени как в автоматическом, так и автоматизированном (по команде персонала) режимах. Все 192 канала скомпонованы в 24 лазерных модуля по 8 каналов в каждом. Для про-

верки и отработки научно-технических решений в РФЯЦ-ВНИИЭФ создана четырехканальная лазерная установка «Луч» с элементами САЮ [3–4].

Необходимость разработки САЮ определяется как большим количеством (более трех тысяч) оптических элементов, требующих подстройки перед каждым опытом, так и конструктивными особенностями их компоновки в лазерных каналах: значительная часть этих элементов находится в вакуумных объемах. Время настройки ограничено случайным дрейфом элементов и скоростью обработки информации.

Система автоматической юстировки многопроходного лазерного усилительного канала основана на маркерной методике, заключающейся в видеоконтроле взаимного положения центра юстировочного лазерного пучка относительно центров ключевых оптических элементов усилителя — зеркал

и диафрагм пространственных фильтров [2, 5–7]. Центры оптических элементов задаются серединой отрезка между парами маркеров, являющихся малоразмерными световыми источниками. Маркеры установлены и симметризованы в плоскостях зеркал в ближней зоне (БЗ) и диафрагм пространственных фильтров в дальней зоне (ДЗ).

В настоящей работе представлен созданный полномасштабный стенд, макетирующий силовой четырехпроходный канал установки со штатными контрольными оптическими элементами и устройствами САЮ модуля. Приведены экспериментальные результаты по автоматической юстировке усилительного канала и тестированию программного обеспечения.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА И СОСТАВ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ

Оптическая схема одного силового четырехпроходного канала с устройствами САЮ приведена на рис. 1. Длина канала порядка 100 м, а сечение выходного пучка около 400×400 мм. В состав силового канала входят: два дисковых усилительных каскада, вакуумный транспортный пространственный фильтр (ТПФ) и кюветный пространственный фильтр (КПФ), широкоапертурное торцевое адап-

тивное зеркало усилителя М3 и реверсор, в котором расположены затвор Поккельса (ЗП), юстировочная полуволновая пластина (ПП) и возвратное зеркало реверсора М4. Пространственные фильтры КПФ и ТПФ образованы парами софокусных линз с фокусными расстояниями 15 и 30 м соответственно. В фокальных плоскостях линз КПФ и ТПФ расположены диафрагменные узлы.

Диафрагменный узел представляет собой диск, который приводится во вращение шаговым мотором через зубчатую передачу. На диске имеются четыре отверстия с центрами на расстоянии 100 мм от оси вращения диска. Два отверстия используются как посадочные места для кассет, в каждой из которых располагаются по четыре рабочих фокальных диафрагмы. Центры отверстий диафрагм КПФ и ТПФ сосредоточены в углах квадратов со стороной 26 мм и 50 мм с характерными размерами 3–5 и 4–5 мм соответственно. В третьем отверстии размещена кассета с дальнопольными внеосевыми световыми маркерами, определяющими центры рабочих диафрагм. Маркеры представляют собой широкоугольные источники излучения с длиной волны 1053 нм и размерами излучающей площадки 1×5 мкм. Направление излучения маркеров совпадает с направлением распространения юстировочного пучка через данную диафрагму.

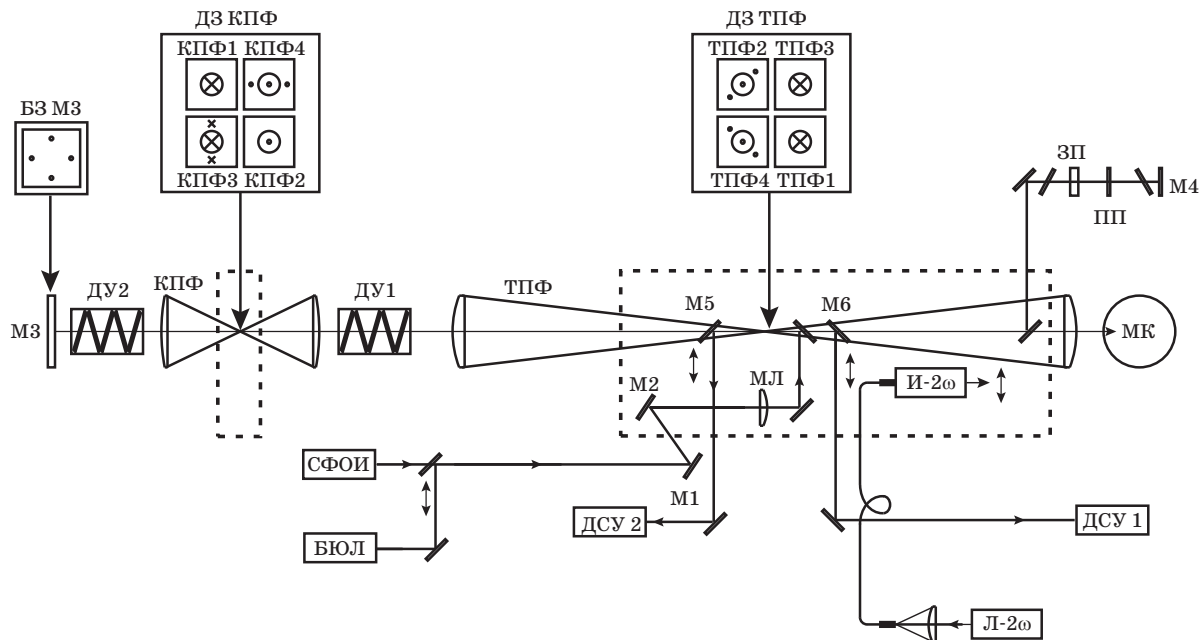


Рис. 1. Оптическая схема силового четырехпроходного канала с устройствами САЮ. СФОИ — система формирования опорного излучения, ТПФ — транспортный пространственный фильтр, КПФ — кюветный пространственный фильтр, ДУ — дисковый усилитель, ДЗ ТПФ — дальняя зона ТПФ, ДЗ КПФ — дальняя зона КПФ, ТПФ1–ТПФ4 — диафрагмы транспортного пространственного фильтра, КПФ1–КПФ4 — диафрагмы кюветного пространственного фильтра, М1–М6 — зеркала с приводами на шаговых двигателях, МЛ — линза с приводами, БЗ М3 — ближняя зона торцевого зеркала канала, ЗП — затвор Поккельса, ПП — вбрасываемая полуволновая пластина, М4 — возвратное зеркало реверсора, ДСУ — датчик силового усилителя, БЮЛ — блок юстировочного лазера, Л-2ω — непрерывный лазер второй гармоники, И-2ω — вбрасываемый настроечный источник второй гармоники, МК — мишенная камера.

Центры диафрагм КПФ и ТПФ определяются по двум маркерам, расположенным в плоскости диафрагм симметрично относительно их центров. Последнее, четвертое отверстие предназначено для контроля состояния оптических элементов канала.

Сформированный в системе формирования опорного излучения (СФОИ) рабочий лазерный пучок размером 20×20 мм фокусируется линзой (МЛ) в плоскость диска и с помощью двух зеркал М1 и М2 заводится в диафрагменный узел ТПФ — в центр диафрагмы ТПФ1. На время юстировки в диафрагму ТПФ1 (цифра обозначает номер прохода лазерного пучка по каналу) вводится излучение блока юстировочного лазера (БЮЛ). Контроль его совмещения с рабочим лазерным пучком осуществляется на входе в усилительный канал с помощью датчиков ближнего и дальнего полей.

После диафрагмы ТПФ1 на первом проходе излучение последовательно проходит через дисковый усилитель (ДУ) — ДУ1, КПФ1 и ДУ2 и отражается от торцевого зеркала канала М3 под небольшим углом к первоначальному направлению, задаваемому конфигурацией размещения рабочих диафрагм пространственных фильтров. На втором проходе пучок распространяется в обратном направлении и, пройдя через КПФ2 и ТПФ2, ответвляется в реверсор с помощью зеркала, расположенного в вакууме вблизи диафрагменного узла ТПФ. После отражения от зеркала реверсора М4 начинается третий проход по силовому усилителю. На третьем проходе пучок проходит через ТПФ3 и КПФ3 и снова поступает на зеркало М3. После отражения от зеркала осуществляется четвертый проход, аналогичный второму. На четвертом проходе излучение проходит через диафрагмы КПФ4 и ТПФ4 и направляется с помощью зеркал сведения в мишенную камеру (МК).

Оси пучков разных проходов распространяются в пределах пространственных фильтров не параллельно друг другу, поэтому в фокальных плоскостях фильтров положение пучка меняется при каждом проходе. Торцевые зеркала усилителя и реверсора изображаются фильтрами друг в друга и при многократном прохождении через усилитель положение пучка на торцевом зеркале усилителя не меняется.

В плоскости торцевого зеркала М3 располагаются две пары маркеров ближней зоны, представляющие собой коллимированные источники света длиной волны 1053 нм с апертурой 10 мм.

Контроль юстировки канала проводится с помощью цифровых видеокамер двух датчиков силового усилителя ДСУ1 и ДСУ2.

В соответствии с алгоритмом юстировки ДСУ1 предназначен для наблюдения, регистрации и контроля положения лазерного пучка после прохождения диафрагмы ТПФ4 относительно маркеров в ближнем и дальнем полях излучения, а также

определения состояния активных элементов дисковых усилителей.

Датчик силового усилителя (ДСУ2) используется для совмещения оси вбрасываемого юстировочного настроечного источника излучения с длиной волны 527 нм (И-2 ω), используемого далее в системе наведения и фокусировки излучения на объект в мишенной камере, с осью четвертого прохода пучка, а также контроля ввода рабочего и юстировочного пучков в диафрагму ТПФ1.

На ДСУ1 и ДСУ2 излучение маркеров и юстировочных пучков направляется путем его ответвления вблизи рабочих диафрагм ТПФ с помощью вбрасываемых зеркальных пар М5 и М6 соответственно.

Зеркала М1–М4, линза МЛ и две зеркальные пары М5 и М6 оснащены приводами на шаговых двигателях.

В состав САЮ каждого из 24 лазерных модулей входят следующие основные устройства: восемь датчиков СФОИ, 16 ДСУ, по восемь диафрагменных узлов КПФ и ТПФ с кассетами внеосевых маркеров, восемь настроечных источников излучения 2 ω и блок юстировочного лазера. В пунктирных рамках на рис. 1 обозначены устройства, которые расположены в вакууме. В устройствах и элементах САЮ одного лазерного модуля установлено около 250 шаговых двигателей и 140 световых маркеров. Для их управления используются порядка 150 контроллеров. Изображения маркеров контролируются с помощью 48 цифровых видеокамер. Передача и прием команд управляющим компьютером с элементов САЮ осуществляется по 250 электрическим жгутам.

МЕТОДИКА ЮСТИРОВКИ

Юстировка каждого из 192 лазерных каналов осуществляется относительно начала отсчета местной системы координат в дальней зоне, которая задается центром квадрата с центрами рабочих диафрагм ТПФ в его углах. Диафрагменный узел ТПФ устанавливается жестко закрепленным в соответствии с координатами оптической схемы канала. Направление излучения (наблюдатель находится между диафрагменным узлом ТПФ и мишенной камерой) и взаимное расположение юстировочных дальнопольных пар маркеров, отмечающих положение центров диафрагм ТПФ2, ТПФ4, КПФ3 и КПФ4 в фокальных плоскостях ТПФ и КПФ соответственно, условно изображены на рис. 1 в квадратах, обозначенных ДЗ ТПФ и ДЗ КПФ. Две пары ближнепольных маркеров установлены на торцевом зеркале (квадрат БЗ М3). Финальная юстировка канала заключается в совмещении центров отрезков каждой пары маркеров с центром юстировочного лазерного пучка путем поперечных перемещений диафрагменного узла КПФ

как целого, а также наклонами торцевого зеркала усилителя МЗ, зеркала реверсора М4 и двух зеркал схемы деления М1 и М2 относительно центра диафрагмы ТПФ4, который определяется его осевым маркером. Относительно этого центра рассчитываются разъюстировки маркеров и юстировочного пучка. Если они превышают допустимое значение, то подаются управляющие команды на приводы шаговых двигателей контрольных оптических элементов, выполнение которых должно привести к требуемому взаимному положению юстировочного пучка и маркеров. После отработки этих команд точность юстировки вновь контролируется и при необходимости процедура повторяется до уменьшения рассогласования до допустимого значения.

Процесс юстировки выполняется в следующем порядке. На первой стадии проводится юстировка четырехпроходного усилительного канала с использованием излучения маркеров, а на второй — в него вводится излучение БЮЛ или СФОИ.

Первоначально, по маркерному методу юстируются диафрагменный узел КПФ в плоскости, нормальной к оптической оси усилителя, и два зеркала МЗ и М4, чтобы обеспечить требуемую угловую ориентацию этих зеркал по дальнопольным и ближнепольным маркерам. Изображения маркеров дальнего и ближнего полей, зарегистрированные в ДСУ, передаются в управляющий компьютер.

Затем используется юстировочный пучок, сформированный блоком юстировочного лазера. Излучение БЮЛ вводится в силовой канал так, чтобы центр его пучка был центрирован как в дальней зоне на диафрагме ТПФ1, так и в ближней зоне

на апертуре торцевого зеркала МЗ. При этом пучок распространяется по усилительному каналу, проходя через рабочие диафрагмы в ТПФ и КПФ. В управляющий компьютер передаются изображения дальней и ближней зон пучка с видеокамер ДСУ для формирования команд на выполнение наклонов по двум угловым координатам зеркал схемы деления М1 и М2 до совмещения юстировочного пучка с центром диафрагмы ТПФ4 и в ближней зоне с центром, обозначенным ближнепольными маркерами торцевого зеркала МЗ.

После проведения юстировки лазерный пучок должен удовлетворять следующим требованиям: позиционироваться на апертурах оптических элементов с погрешностью не более 0,5% от размера апертуры, позиционироваться на диафрагмах пространственных фильтров с погрешностью не более 2,5% от их диаметров.

ДИАФРАГМЕННЫЕ УЗЛЫ КПФ И ТПФ

Диафрагменные узлы как КПФ, так и ТПФ (рис. 2) представляют собой высокоточные устройства с дисками, на которых размещены в своих секторах по две кассеты с рабочими диафрагмами и юстировочные кассеты со световыми маркерами. Четыре диафрагмы в кассетах соответствуют числу проходов импульса по лазерному каналу. В юстировочной кассете световые маркеры расположены парами вне зоны оптической оси канала или одиночно на оси симметрии лазерного канала. Замена рабочей кассеты на юстировочную и обратно происходит при повороте диска на угол, равный углу сектора размещения этих кассет на диске.

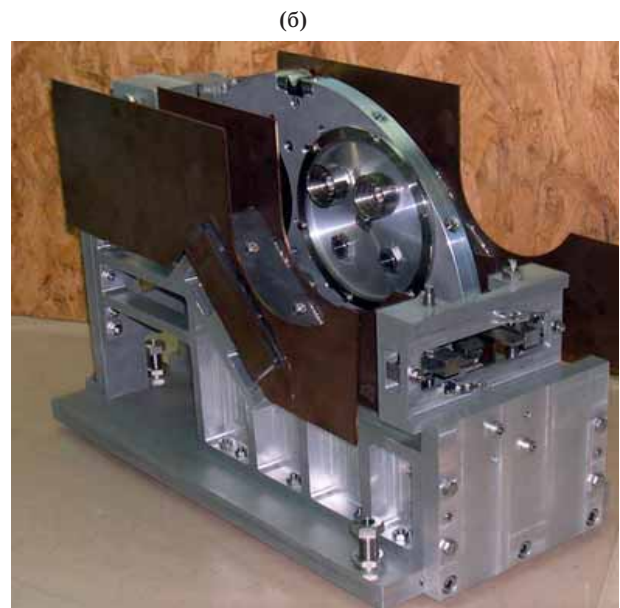
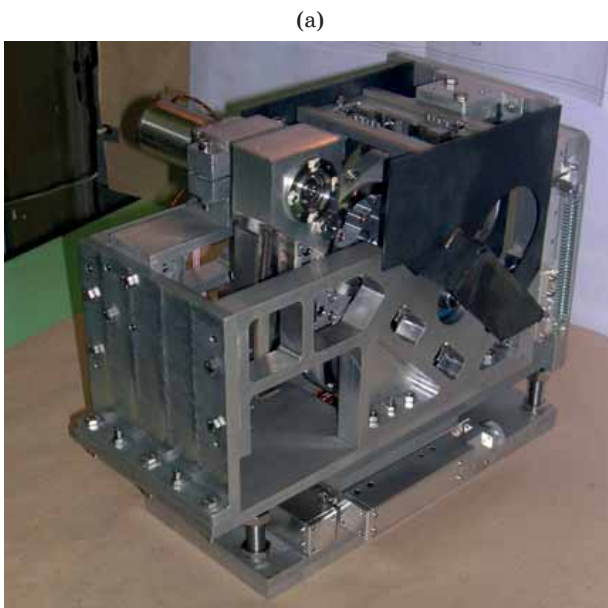


Рис. 2. Диафрагменные узлы КПФ (а) и ТПФ (б).

Критерием эффективности диафрагменных узлов является точность замены рабочих кассет на юстировочную во время юстировок лазерного канала. Для этого создана прецизионно-точная оснастка (стапель-кондуктор) для сборки всех секторов диска диафрагменных узлов по двум базовым отверстиям на кассетах, которые повышают точность срабатывания кинематических звеньев. Опорные плоские пояски и зазоры между диском и кассетами по диаметру последних позволяют размещать и фиксировать прижимными фланцами каждую кассету с любыми необходимыми углами разворотов и по двум линейным координатам.

Время смены положения кассет не превышает 20 с при точности воспроизведения их положения при вращении дисков КПФ и ТПФ ± 3 мкм. Диафрагменный узел КПФ дистанционно перемещается по трем взаимно перпендикулярным координатам с помощью линейных трансляторов с шагом 2,5 мкм. Диафрагменный узел ТПФ допускает перемещение по трем осям только при монтаже на $\pm 1,5$ мм. После монтажа он жестко крепится согласно оптической схеме лазерного канала.

ДАТЧИК СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ

Для контроля положения пучка в САЮ в каждом канале установлены два ДСУ (рис. 3). В состав каждого датчика входят зеркала, два объектива, две одинаковые цифровые видеокамеры и вбрасываемый экран для защиты камер от рабочего импульсного излучения. Оптическая схема датчика содержит два канала наблюдения: канал дальней зоны и канал ближней зоны. В канале дальней зоны регистрируются изображения маркеров, установленных в диафрагменных узлах КПФ и ТПФ и настроечном источнике излучения второй гармоники, а также пучков излучения БЮЛ. Канал ближней зоны выполняет две основные функции: контроль центрировки пучков БЮЛ/СФОИ на апертуре торцевого зеркала МЗ (рис. 1), идентифицируемого двумя ближнепольными парами маркеров, а также состояния оптических элементов в плоскостях, расположенных в пределах всего усилительного канала.



Рис. 3. Датчики силового усилителя.

В датчиках используются видеокамеры высокого разрешения VAC-248-IP с матрицей КМОП серии «VITA-2000» с числом элементов (пикселей) 1920×1200 . Размер пикселей матрицы — $4,8 \times 4,8$ мкм. Камера поддерживает два вида электронных затворов — полнокадровый режим и скользящий затвор. Цифровое изображение передается камерой без сжатия по сети 100 Мбит/с в управляющий компьютер.

Каждая камера установлена на линейном моторизованном трансляторе на шаговых двигателях. Перемещение камеры вдоль оптической оси обеспечивает настройку на рабочие плоскости усилительного канала. Шаговые двигатели трансляторов, а также двигатель защитного экрана подключены к контроллерам, сигналы с которых и соответствующие электрические токи инициализируются от управляющего компьютера оператором.

В канале дальней зоны поле зрения ДСУ составляет не менее 80×80 мм при размере разрешаемого элемента около 160 мкм. В канале ближней зоны поле зрения изменяется от $1,9 \times 1,3$ до $2,1 \times 1,6$ размера световой зоны рабочего пучка при размерах разрешаемого элемента от 2,2 до 1,5 мм в плоскостях изображения торцевого зеркала МЗ и входа в усилитель ДУ1 соответственно.

БЛОК ЮСТИРОВОЧНОГО ЛАЗЕРА

В качестве юстировочного источника непрерывного лазерного излучения в установке используется блок юстировочного лазера (рис. 4). Основные элементы БЮЛ: непрерывный лазер модели ДТЛ-423, генерирующий линейно-поляризованное излучение на длине волны 1053 нм, поворотные зеркала, формирующие вбрасываемые диафрагмы, защитный экран, расширитель пучка, выходной телескоп. Выходной телескоп передает изображение пучка БЮЛ квадратного сечения 20×20 мм с дифракционной расходимостью в заданную плоскость лазерного канала. Неравномерность интенсивности излучения в ближней зоне не хуже 10%. Мощность излучения БЮЛ регулируется в пределах от 1 до 50 мВт.

ВБРАСЫВАЕМЫЙ НАСТРОЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

Лазерная установка рассчитана на облучение мишеней излучением второй гармоники (2ω). В связи с этим наведение лазерных пучков на мишень должно осуществляться на частоте второй гармоники. Для наведения излучения на мишень разработаны настроечные источники излучения 2ω (рис. 5), вбрасываемые вблизи диафрагмы ТПФ4 в фокальные плоскости 2ω выходных линз ТПФ каждого из каналов.

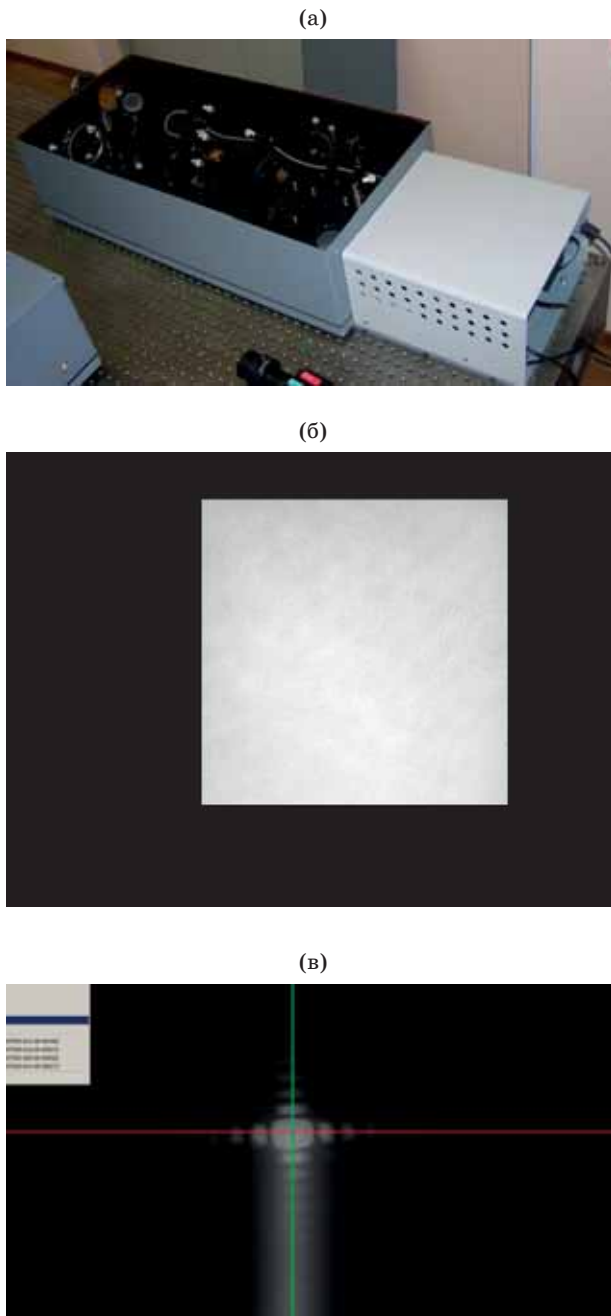


Рис. 4. Блок юстировочного лазера (а) и распределение пучка в ближней (б) и дальней (в) зонах.

Трудности в совмещении направлений распространения излучений лазерного основной гармоники (1ω) и настроечного второй гармоники вызваны наличием диагностического клина, установленного под углом к оптической оси канала между выходной линзой ТПФ и мишенной камерой. Из-за дисперсии показателя преломления материала клина лучи, соответствующие 1ω и 2ω , по-разному отклоняются клином. Поэтому необ-



Рис. 5. Вбрасываемый настроечный источник второй гармоники.

ходимо так вбрасывать настроечное излучение, чтобы после диагностического клина пучки лучей 1ω и 2ω за клином распространялись параллельно друг другу. Конструкция источника должна обеспечить контроль ее установки в заданную точку фокальной плоскости выходной линзы ТПФ, привязку поперечного смещения оси пучка 2ω к оси пучка 1ω и последующий вывод конструкции из зоны рабочего излучения 1ω при переходе к рабочему режиму после выполнения процесса наведения. Контроль вбрасывания источника осуществляется ДСУ2 по положению пары световых маркеров. Центр отрезка, соединяющего эти два маркера, определяет положение настроечного источника излучения 2ω . Маркеры устанавливаются и фиксируются на конструкции источника так, что их излучение проходит через диафрагму ТПФ4 в направлении к торцевому зеркалу канала М3 (рис. 1). Источник 2ω располагается в вакууме. Для формирования излучения источника используется непрерывный лазер DTL-413 с диодной накачкой, генерирующий излучение второй гармоники 2ω на длине волны 527 нм. Лазер находится вне вакуумной зоны — в стойке управления САЮ.

Излучение лазера DTL-413 с помощью оптоволоконного патч-корда и вакуумного переходного разъема поступает на разветвитель 1:8, расположенный в кессоне. Разветвитель используется для равного деления излучения лазера, распределенного между восемью источниками 2ω одного модуля лазерной установки.

Основными элементами конструкции настроечного источника 2ω являются оптоволоконно, два микрообъектива, поляризатор и пара световых

маркеров. Излучение в конструкцию вводится переходным патч-кордом через оптический разъем. Исходящее из торца этого патч-корда излучение коллимируется первым микрообъективом, проходит через поляризатор и поступает на второй микрообъектив. Последний фокусирует излучение на светорассеивателе. Область фокусировки на рассеивателе, ограниченная диафрагмой диаметром около 200 мкм, представляет собой настроечный источник поляризованного излучения 2ω .

Настроечный источник перемещается по трем координатам вакуумными моторизованными линейными трансляторами. Погрешность установки источника излучения 2ω в расчетное место относительно оси пучка 1ω контролируется в ДСУ2 путем регистрации изображения двух светящихся маркеров и по значению не превышает 5 мкм.

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ ПРОГРАММА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЮСТИРОВКИ

Задачей системы автоматической юстировки лазерного канала является проведение без участия персонала финальной настройки оптической схемы усилительного канала по программному алгоритму управляемых оптических элементов и архивирования данных юстировки.

Под автоматической юстировкой понимается окончательная настройка канала так, чтобы рабочее излучение проходило через центры диафрагм пространственных фильтров и апертур зеркал. Методика юстировки основана на получении и обработке изображений излучений БЮЛ/СФОИ/маркеров относительно базовых световых маркеров, имитирующих центры элементов установки. После вычисления значений рассогласований формируются управляющие команды на приводы элементов, имеющих дистанционное управление.

Программное обеспечение (ПО) управления САЮ реализовано на основе операционной системы Astra Linux. При разработке ПО использовалась среда программирования QT Creator. Программный код реализован на языке C++ [8]. В ПО входят программные пакеты для созданных элементов САЮ: диафрагменных узлов, зеркал и линз, маркеров, юстировочного лазера, датчиков силового усилителя, видеокамер и др. Эти пакеты объединены на мнемосхеме посредством графического диалога, позволяющего адаптировать и видоизменять структуру САЮ.

Разработанное ПО позволяет проводить и автоматизированную юстировку оптического тракта канала. Этот режим юстировки позволяет также тестировать элементную базу САЮ на соответствие технических характеристик, необходимых для штатного оборудования.

Отработка управляющей программы САЮ проводилась на полномасштабном стенде ИЛФИ ВНИИЭФ, макетирующем усилительный канал.

Отработка элементной базы САЮ, включающая монтаж и контрольную сборку элементов САЮ восьмиканального модуля, его управление и проведение вакуумных испытаний, осуществлялась на испытательных стендах АО НИИ ОЭП и проводилась в автоматизированном режиме. Элементы САЮ восьмиканального лазерного модуля были установлены на башнях, размещаемых в центральных вакуумных кессонах КПФ и ТПФ. На рис. 6 приведена фотография одной из башен ТПФ с расположенными на четырех ее платформах элементами САЮ.

На рис. 7 изображена структурная схема управления установки САЮ. Верхний уровень образуют сервер САЮ и местный пульт управления САЮ (МПУ САЮ). Они объединены локальной сетью Ethernet со скоростью обмена не ниже 100 Мбит/с. Сюда же могут входить дополнительные местные пульта управления (МПУ), а также точки доступа для мобильных пультов управления. Взаимодействие с центральным пультом управления (ЦПУ) осуществляется через сервер САЮ. Средний уровень САЮ составляют управляющие



Рис. 6. Башня ТПФ с элементами САЮ. На переднем плане два датчика силового усилителя.

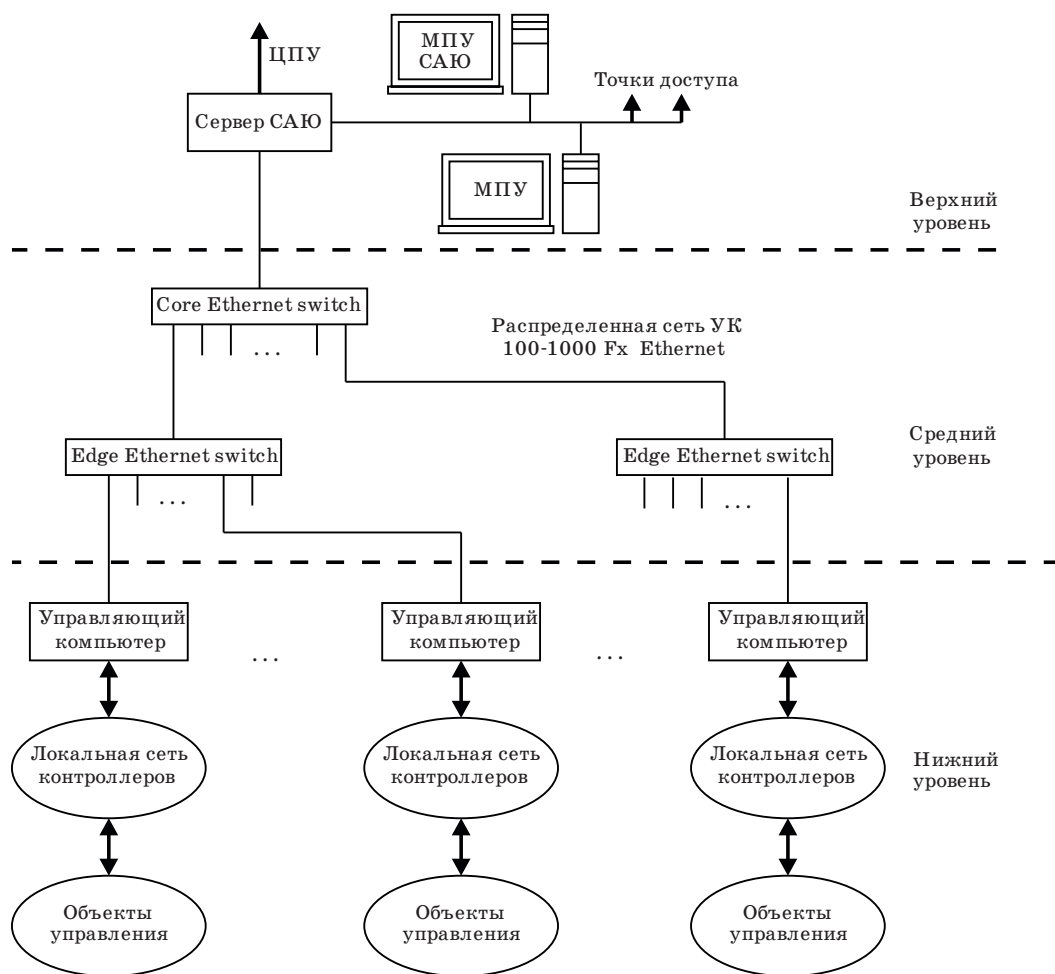


Рис. 7. Структурная схема управления САЮ лазерной установки.



Рис. 8. Субблок для контроллеров шаговых двигателей и световых маркеров (а) и блок ввода/вывода универсальный (б).

компьютеры (УК). Рассматриваются два варианта создания среднего уровня САЮ — с 48 или 192 управляющими компьютерами. В первом ва-

рианте с помощью одного УК проводится юстировка как четырех лазерных каналов установки, так и систем транспортировки излучения этих

каналов в камеру взаимодействия. Во втором варианте для юстировки каждого из 192 каналов установки может применяться один УК, встроенный в блок ввода/вывода универсальный (БВВУ). Связь УК с сервером САЮ осуществляется по распределенной сети на основе Ethernet коммутаторов с оптоволоконным интерфейсом со скоростью передачи не менее 100 Мбит/с. Нижний уровень САЮ представляет собой распределенную сеть контроллеров, управляющих исполнительными механизмами, маркерами и видеокамерами.

Для проведения тестирования элементов САЮ была создана система управления, содержащая восемь субблоков для контроллеров шаговых двигателей и световых маркеров. Каждый субблок (рис. 8а) управляет элементами САЮ одного лазерного канала.

Для размещения контроллеров на полномасштабном стенде используется БВВУ, представленный на рис. 8б. В каждый БВВУ можно установить три вида контроллеров, предназначенных для автоматического управления различными подсистемами, включающими электромоторы различных типов (шаговые двигатели, двигатели постоянного тока), лазерные маркеры, другие системы, требующие управления (камеры, клапаны и пр.).

Все оправы зеркал, диафрагменные узлы КПФ и ТПФ, линейные трансляторы цифровых видеокамер и защитные экраны подключены к контроллерам Urms БВВУ. Маркеры на основе лазерных диодов моделей EST с мощностью излучения 50–100 мВт подключены к контроллерам UrLaser БВВУ. Необходимо управлять мощностью излучения маркеров из-за значительно отличающихся расстояний каждой пары маркеров от ДСУ по ходу луча (от 1,5 до 200 м), разброса их световых характеристик, диаграмм направленности и точности монтажа в кассетах диафрагменных узлов. Контроллеры UrLaser БВВУ позволяют независимо подавать ток от 0 до 250 мА к любому из подключенных к контроллеру маркеров и выравнять их яркости на изображениях в видеокамерах ДСУ.

В качестве примера разработанного ПО на рис. 9 представлен вид рабочего окна на экране монитора в режиме автоматической юстировки.

Перед началом проведения автоматической юстировки каждый маркер должен находиться строго в своей области. На рис. 9 области допустимого начального положения каждого из маркеров очерчены светлыми квадратными рамками (рамками поиска). В случае попадания любого из маркеров за пределы рамки поиска программа выдает

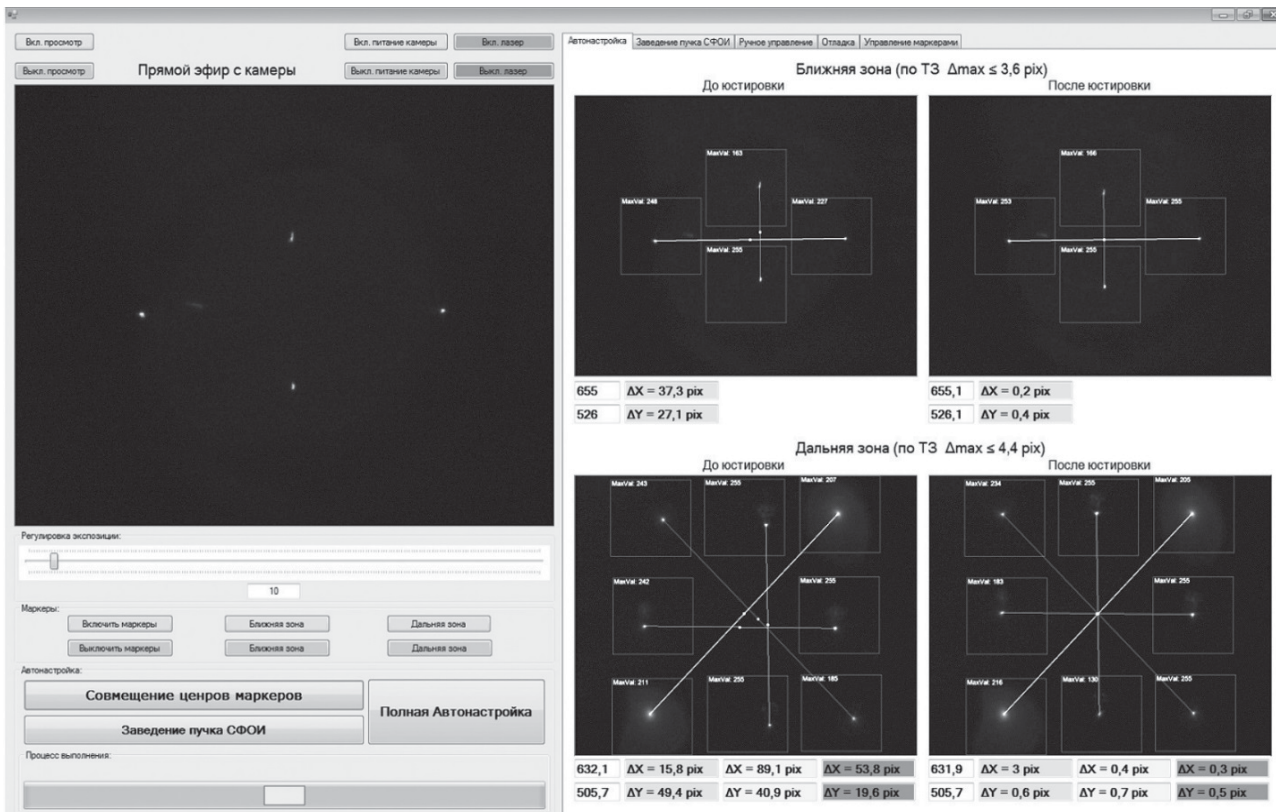


Рис. 9. Вид рабочего окна на экране монитора в режиме автоматической юстировки.

сообщение о необходимости возвращения к автоматизированной юстировке. Центр симметрии расположения маркеров при съюстированном усилительном канале определен «осевым» маркером, размещенным в кассете диафрагменного узла в центре диафрагмы ТПФ4.

Верхний левый угол занимает текущее изображение с видеокамеры ДСУ. Над изображением находятся кнопки включения/выключения БЮЛ и камеры, а ниже расположен движок управления экспозицией камеры. Ниже движка находятся шесть кнопок включения/выключения маркеров, объединенные в поле «Маркеры». Это поле позволяет включить/выключить маркеры как ближней, так и дальней зоны. Поле «Автонастройка» объединяет три кнопки — «Совмещение центров маркеров», «Заведение пучка СФОИ» и «Полная автонастройка».

Кнопка «Совмещение центров маркеров» запускает на выполнение алгоритм юстировки усилительного канала по апертуре и углу. Кнопка «Заведение пучка СФОИ» запускает на выполнение алгоритм заведения пучка СФОИ/БЮЛ в усилительный канал.

Кнопка «Полная автонастройка» запускает на выполнение алгоритм полной настройки усилительного канала. Сначала выполняется алгоритм юстировки усилительного канала по апертуре и углу. Затем проводится заведение пучка БЮЛ/СФОИ в усилительный канал. Поле «Процесс выполнения» отображает название элемента, который в данный момент настраивается, а также индикатор процента выполнения.

В правой половине окна программы размещен многостраничный компонент с пятью вкладкам: «Автонастройка», «Заведение пучка СФОИ», «Ручное управление», «Управление маркерами» и «Отладка».

Автоматическая юстировка запускается кнопкой «Полная Автоюстировка». При этом открывается вкладка «Автонастройка» в окне программы. Изображения всех маркеров во всех четырех окнах сопровождаются рамками поиска и печатанным значением максимальной яркости маркера.

Исходное изображение с видеокамеры в режиме настройки по апертуре (Ближняя зона) помещается в верхнем левом окне «До юстировки». Там же рисуются отрезки, соединяющие пару реперных маркеров торцевого зеркала канала М3 (рис. 1) и пару настраиваемых маркеров зеркала реверсора М4 (рис. 1). На отрезках точками от-

мечены их середины. Под окном «До юстировки» приводятся координаты середины отрезка, соединяющего реперные маркеры и начальные значения разъюстировки в пикселах. Изображение с камеры после выполнения команд моторами помещается в верхнем правом окне «После юстировки». Так же рисуются отрезки и приводятся значения разъюстировки в пикселах.

В нижних окнах «До юстировки» и «После юстировки» приводятся изображения с видеокамеры в режиме настройки по углу (Дальняя зона). Ярким белым отрезком соединены реперные маркеры ТПФ4. Менее яркими отрезками соединены маркеры КПФ4, КПФ3 и ТПФ2. В соответствующих полях приведены значения начальных и конечных разъюстировок в пикселах. В окне программы открываются также вкладки «Заведение пучка СФОИ», «Управление маркерами», «Ручная настройка».

По окончании автоматической юстировки появляется сообщение о завершении юстировки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для лазерной установки нового поколения создан полноаспштабный стенд, макетирующий силовой четырехпроходный канал установки, со штатными контрольными оптическими элементами и устройствами системы автоматической юстировки. Описана элементная база системы, состоящая из юстировочных источников излучений первой и второй гармоник, датчиков силового усилителя, диафрагменных узлов вакуумных пространственных фильтров, контроллеров исполнительных механизмов и маркеров. Разработана маркерная методика юстировки канала. Методика основывается на симметризации относительно центра выходной диафрагмы транспортного пространственного фильтра изображений маркеров и юстировочного пучка в ближней и дальней зонах. Описана общая структура системы автоматической юстировки лазерной установки, включающая верхний, средний и нижний уровни. Под операционной системой Astra Linux разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять автоматическую и автоматизированную юстировку силового канала. В режиме автоматизированной юстировки протестированы штатные элементы модуля установки, размещенные на башнях центральных вакуумных кессонов, кюветном и транспортном пространственных фильтрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаранин С.Г.* Мощные лазеры и их применение в исследованиях физики высоких плотностей энергии // УФН. 2011. Т. 181. № 4. С. 434–441.
2. *Burkhart S.C., Bliss E., DiNicola P., Kalantar D., Lowe-Webb R., McCarville T., Nelson D., Salmon T., Schindler T., Vilanueva J., and Wilhelmsen K.* National Ignition Facility system alignment// Appl. Opt. 2011. V. 50. № 8. P. 1136–1157.

3. 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 с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 4. С. 209–301.
4. Аушев А.Ф., Бородин В.Г., Бубнов И.А., Вензель В.И., Гаранин С.Г., Горелов А.В., Деркач И.Н., Львов Л.В., Малинова Т.П., Матвеев В.Ю., Михайлов Ю.В., Никитин Н.В., Потапов С.Л., Сидоровский Н.В., Смирнов А.Б., Старченко А.Н., Сухарев С.А., Угрюмов А.В., Филиппов В.Г., Чарухчев А.В., Чернов В.Н. Система дистанционной юстировки четырехканальной лазерной установки на Nd-стекле «ЛУЧ» // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 4. С. 56–64.
5. Бубнов И.А., Гаранин С.Г., Григорович С.Г., Малинова Т.П., Матвеев В.Ю., Соломатин И.И., Старченко А.Н., Филиппов В.Г., Чарухчев А.В., Чернов В.Н. Методы и алгоритм работы юстировочного модуля многопучковой лазерной установки «ИСКРА-6» // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 1. С. 22–28.
6. Гаранин С.Г., Стариков Ф.А., Шнягин Р.А. Использование стохастического параллельного градиентного алгоритма в задаче автоюстировки усилительного канала установки // Опт. спектр. 2013. Т. 114. № 6. С. 934–942.
7. Hilsz L., Challos S., Nicaise F., Luttmann M., Adolf A. Redesign of image processing techniques used for the alignment of the LMJ Amplifier Section // Proc. SPIE. 2010. V. 7797. Optics and Photonics for Information Processing IV. P. 77970A-1.
8. Шлее М. Qt 5.3. Профессиональное программирование на C++. СПб.: «БХВ-Петербург», 2015. 928 с.