

УДК 621.865.8

DOI 10.17513/snt.40369

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЛАЗЕРНЫЙ КОМПЛЕКС С УПРАВЛЯЕМЫМ ТЕЛЕСКОПОМ

Умнов В.П.

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, e-mail: mex-rob@yandex.ru

В данной работе представлен новый лазерный комплекс, основанный на использовании шестилучевого газоразрядного лазера, который обеспечивает высокую степень универсальности и отличные потребительские характеристики, особенно важные при мелкосерийном производстве. Основу лазерного комплекса составляет газоразрядный лазер, состоящий из шести автономных лазеров (трубок, заполненных смесью углекислого газа, гелия и азота). В комплексе предусмотрено автономное управление мощностью излучения каждого из шести лазеров. С целью обеспечения высокого качества выполнения лазерных технологических процессов при многолучевой обработке в комплексе предусмотрено автоматическое управление температурой, положением лазерных пятен в зоне нагрева обрабатываемой поверхности, а также пространственным положением объекта обработки с организацией обратных связей по указанным параметрам. Для этого комплекс оснащен совокупностью датчиков, контроллеров и других компонентов, обеспечивающих автоматическую подготовку управляющих программ и управление процессами выполнения разнообразных лазерных операций. В лазере предусмотрен управляемый телескоп, включающий набор плоских, вогнутых и выпуклых зеркал. Вогнутые зеркала могут перемещаться посредством управляемых контроллером приводов микроперемещений по двум ортогональным координатам. Для разработки программного обеспечения телескопа создана его математическая модель в векторно-матричной форме.

Ключевые слова: многолучевой лазер, зеркало, датчик, управляемый телескоп, система координат, линза, шаговый привод, микроперемещение, математическая модель, матрица

AUTOMATED MULTI-BEAM LASER COMPLEX WITH A CONTROLLED TELESCOPE

Umnov V.P.

Vladimir State University named after Alexander Grigorevich
and Nikolay Grigorevich Stoletov, Vladimir; e-mail: mex-rob@yandex.ru

This paper presents a new laser system based on the use of a six-beam gas-discharge laser, which provides a high degree of versatility and excellent consumer characteristics, especially important in small-scale production. The laser complex is based on a gas-discharge laser consisting of 6 autonomous lasers (tubes filled with a mixture of carbon dioxide, helium and nitrogen). The complex provides autonomous control of the radiation power of each of the 6 lasers. In order to ensure high-quality performance of laser technological processes during multipath processing, the complex provides automatic control of temperature, the position of laser spots in the heating zone of the treated surface, as well as the spatial position of the processing object with the organization of feedback according to the specified parameters. For this purpose, the complex is equipped with a set of sensors, controllers and other components that provide automatic preparation of control programs and control of the processes of performing various laser operations. The laser provides a controlled telescope, including a set of flat, concave and convex mirrors. Concave mirrors can be moved by means of micro-displacement drives controlled by the controller, along two orthogonal coordinates. A mathematical model of the telescope in vector-matrix form has been created to develop the telescope's software.

Keywords: multi-beam laser, mirror, sensor, controlled telescope, coordinate system, lens, stepper drive, micro-displacement, mathematical model, matrix

Введение

Одним из перспективных направлений совершенствования лазерных технологических процессов является создание и применение многолучевого источника излучения с автоматическим управлением выходной мощности. Для обеспечения высокого качества выполнения лазерных технологических процессов при многолучевой обработке необходимо автоматическое управление температурой, положением лазерных пятен в зоне нагрева обрабатываемой поверхности, а также пространственным положением

объекта обработки с организацией обратных связей по указанным параметрам. Применение многолучевого лазера и предложенной структуры системы управления комплексом позволяет: выполнять упрочнение поверхности широким пятном (шириной до 20 мм) без сканирования с регулируемым перекрытием дорожек упрочнения; реализовать лазерную сварку разнородных компонентов, различной толщины при большой ширине стыка между свариваемыми деталями; организовать лазерную наплавку с предварительным подогревом и снятием напряжений в наплавленном треке; расши-

ритель перечень операций, в том числе по обработке композиционных материалов и гибридных лазерных технологий сварки [1, с. 587], выполняемых одним лучом, а также значительно повысить их качество.

Цель исследования – предоставить структурное построение высокоавтоматизированного универсального лазерного комплекса на платформе многолучевого лазера с управляемыми величиной мощности и положением лазерных пятен на поверхности объекта обработки с использованием телескопа, с совокупностью датчиков и управляющих устройств, а также создание математической модели телескопа, которая учитывает все ключевые параметры системы, позволяет оптимизировать ее функционирование.

Материалы и методы исследования

Состав многолучевого лазерного комплекса представлен на рис. 1, где обозначено: 1 – лазер; 2 – телескоп; 3 – исполнительное устройство комплекса; 4 – питатель наплавочного материала; 5 – устройство технического зрения; 6 – датчик трехмерного сканирования поверхности обрабатываемого изделия; 7 и 9 – контроллеры, выполняющие функции интерфейсов; 8 – измеритель температуры нагрева поверхности; 10 – станция управления комплексом;

11 – блок регуляторов; 12 – компьютерный блок подготовки управляющих программ; 13 – блок компьютерного управления лазером совместно с телескопом.

Многолучевой лазер построен на базе газоразрядного лазера [2, с. 113; 3, с. 14] с шестью трубками, заполненными смесью газов, чаще всего смесью (CO_2), гелия (He) и азота (N_2). В общем случае трубки могут располагаться произвольно относительно центральной оси лазера и по отношению друг к другу, но предпочтительно их следует располагать исходя из одинаковых условий масляного проточного охлаждения. Управление лазером, осуществляемое блоком компьютерного управления 13 выполняет контроль и диагностику его состояния, условий охлаждения и позволяет регулировать мощность излучения каждой из шести трубок. Телескоп 2 включает 24 зеркала, из которых 12 плоских, 6 выпуклых и 6 вогнутых, и служит для приема лучей от лазера, формирования их взаимного относительного расположения и положения в пространстве в различных сочетаниях от совмещения в одно пятно и до шести пятен в зависимости от выполняемой операции с последующим управляемым направлением лучей блоком 6 (каждого вокруг двух взаимно перпендикулярных осей) в оптическую систему исполнительного устройства 3 [4, с. 483].

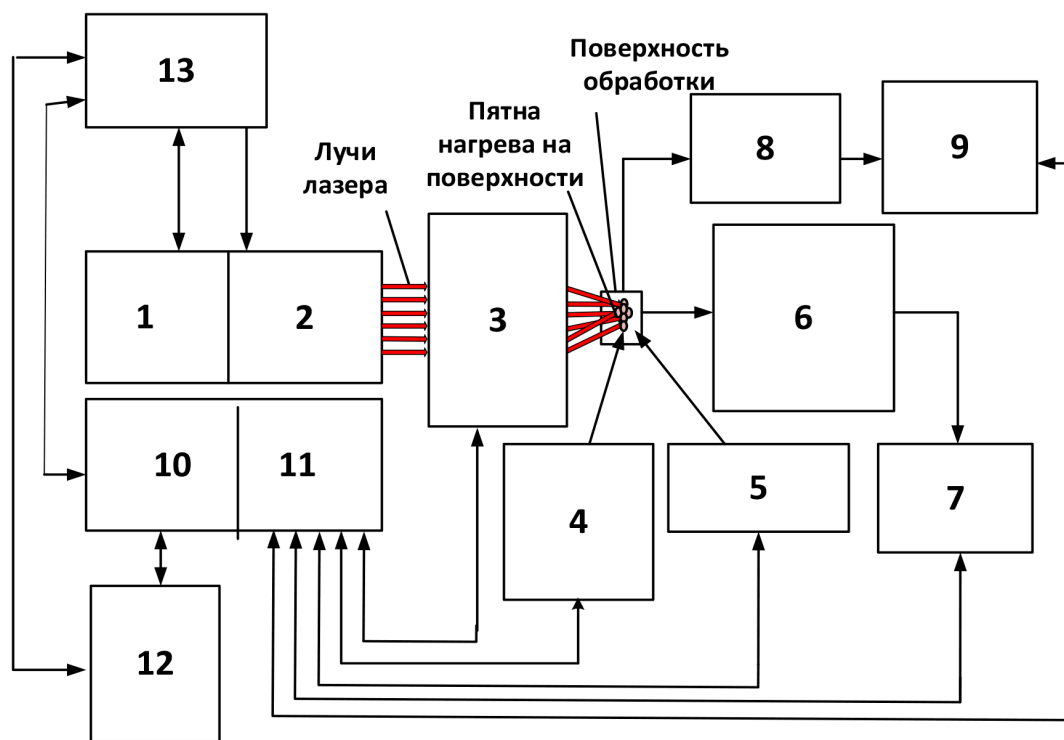


Рис. 1. Структурная схема универсального лазерного комплекса, построенного на базе многолучевого (шестилучевого) газоразрядного лазера

Исполнительное устройство 3 представляет собой робот или станок с пятью степенями подвижности (осями) и встроенными оптической системой транспортировки излучения (совокупностью плоских зеркал) от телескопа к поверхности объекта обработки и фокусирующей линзой, располагаемой в оптической головке. В устройство 3 также встроена система охлаждения оптических элементов и, при необходимости, система их юстировки. Питатель наплавочного материала 4 служит для подачи порошка или проволоки в зону обработки при выполнении операции лазерной наплавки или проволоки при выполнении сварки с регулируемой скоростью перемещения и расходом. Устройство технического зрения 5, в качестве которого используется видеокамера, предназначено для контроля положения лазерных пятен на поверхности обработки. Датчик трехмерного сканирования 6 поверхности обрабатываемого изделия (например, бинокулярный триангуляционный лазерный датчик ЛД-2 [5, с. 100]) предназначен для сканирования поверхности обрабатываемого объекта с целью измерения его геометрии и положения в назначенной системе координат и формирования ее модели. Измерение температуры нагрева поверхности или зоны обработки производится датчиком 8, в качестве которого может использоваться пирометр или термограф ИРТИС-2000 СН, имеющий матрицу 640×480 измерительных пикселей, частоту опроса 0,8 с и цифровой выход. Автоматическое управление температурой, положением лазерных пятен в зоне нагрева обрабатываемой поверхности, а также пространственным положением объекта обработки с организацией обратных связей по указанным параметрам позволяет: выполнять широкий спектр лазерных технологических операций с высоким качеством. Параметрами движения исполнительного устройства 3 (величиной перемещения, скорости и при необходимости ускорением) управляет станция управления комплексом 10 с использованием информации с датчиков и устройств 5, 6 и 8, с помощью которых, а также контроллеров 7, 9 организованы обратные связи, необходимые для выполнения операций с высоким качеством. Регуляторы в блоке 11 (ПИД-регуляторы) служат для обеспечения высокой точности перемещения исполнительного устройства 3 в процессе выполнения операции, а также инвариантности процессов к внешним возмущениям.

Компьютерный блок подготовки управляющих программ 12 в соответствии с заданными параметрами процесса вы-

полняет моделирование лазерной операции с использованием информации, получаемой с датчика 6, и выполняет автономное программирование. Если результат моделирования программы роботизированной лазерной обработки соответствует требованиям, программа обработки загружается в блок 13 для фактической реализации. Если моделирование не соответствует требованиям, блоку обработки модели необходимо выполнить повторную попытку и планирование траектории модели. Отметим, что 10 выполняет постоянную диагностику и мониторинг состояния всех устройств комплекса.

Телескоп 3 содержит совокупность вогнутых и выпуклых первичных и вторичных отражающих зеркал по одному на каждый выходной луч излучателя, перемещаемых с помощью управляемых контроллером приводов микроперемещений, состоящих из шаговых микродвигателя и передачи винт – гайка.

Результаты исследования и их обсуждение

Для построения алгоритмов и программного обеспечения системы управления приводами поворота вторичных зеркал необходима математическая модель телескопа. Для ее построения представим схему телескопа, содержащую его основные геометрические параметры и выбранные системы координат, которые приведены на рис. 2–5.

Системы координат выбраны правыми и введены в рассмотрение для удобства построения математической модели. На рис. 2, а, представлено расположение выпуклых и вогнутых первичных и вторичных отражающих зеркал на концентрических окружностях равномерно с угловым шагом $\pi/3$ и симметрично относительно оптической оси телескопа. На рис. 2, б, приведена схема и размеры для i -го вторичного зеркала ($i = 1 \dots 6$ порядковый номер зеркала и шаровой опоры), где т. А и т. В – точки воздействия двух одинаковых приводов привода А и привода В микроперемещений на охладитель для поворота i -го вторичного зеркала вокруг оси $X_{ш1}$ при вращении винтов приводов А и В в одну сторону и с одинаковой скоростью и вокруг оси Y_i при вращении винтов приводов А и В в противоположные стороны; R_i – расстояние от оптической оси до точки поворота i -го вторичного зеркала на i -й шаровой опоре; g_i – расстояние от точки поворота i -го вторичного зеркала на i -й шаровой опоре до центра i -го вторичного зеркала; h_i – расстояние от центра i -го вторичного зеркала до точек А и В по оси Y_i ; M_i – расстояние между симметрично расположенными относительно оси Y_i точками

А и В; X_0, Y_0, Z_0, o_0 – базовая инерциальная система координат; $X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi}, o_{wi}$ – система координат, связанная с центром i -й

шаровой опоры i -го вторичного зеркала. Здесь обозначено $\Psi_i = (i-1)\pi/3$ – угол между осями X_0 и X_{wi} .

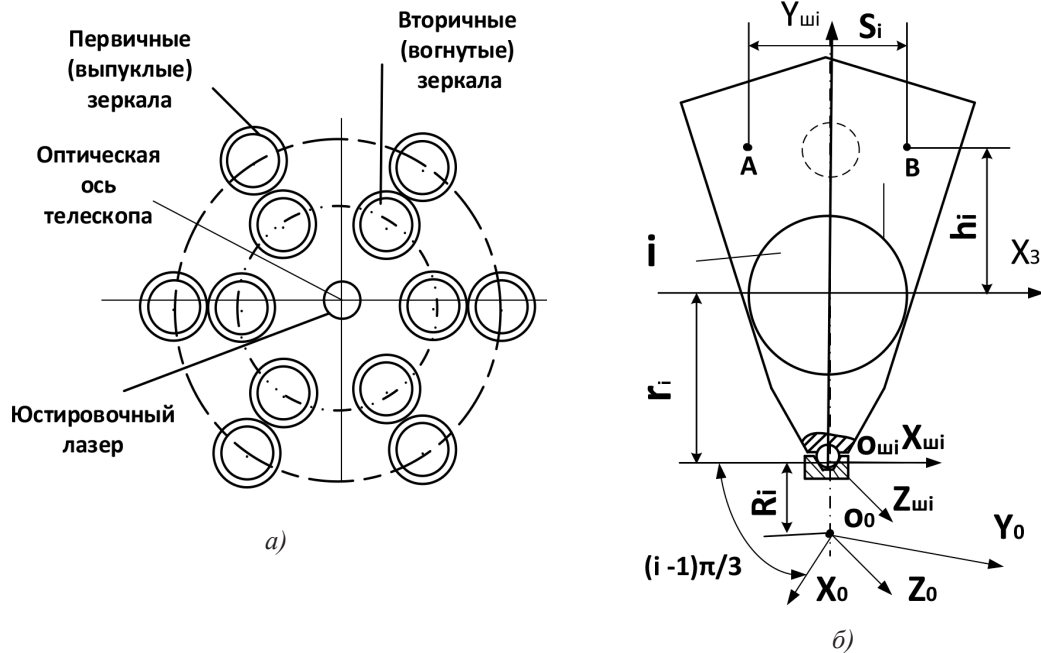


Рис. 2: а – схема относительного расположения первичных и вторичных зеркал; б – размеры и расположение выбранных осей координат i -го зеркала телескопа шестилучевого лазера

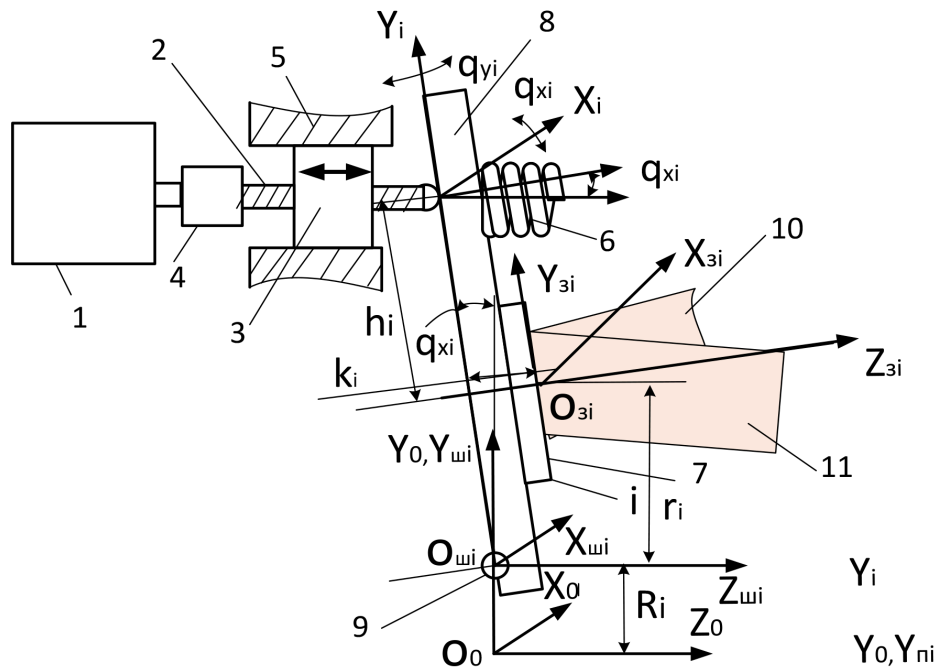


Рис. 3. Схема расположения привода микроперемещений i -го вторичного зеркала: 1 – шаговый микродвигатель А (шаговый двигатель В расположен строго за двигателем А и на рисунке не виден); 2 – микрометрический винт; 3 – гайка; 4 – соединительная муфта; 5 – корпус; 6 – пружина сжатия; 7 – i -е вторичное зеркало; 8 – охладитель; 9 – шаровая опора; 10 – лазерный пучок от i -го первичного зеркала; 11 – лазерный пучок от i -го вторичного зеркала; $X_{zi}, Y_{zi}, Z_{zi}, o_{zi}$ и X_i, Y_i, Z_i, o_i – системы координат, привязанные к центру 1-го вторичного зеркала и к точке воздействия винта 2 на охладитель 8; k_i – расстояние от внешней поверхности охладителя до центра от i -го вторичного зеркала

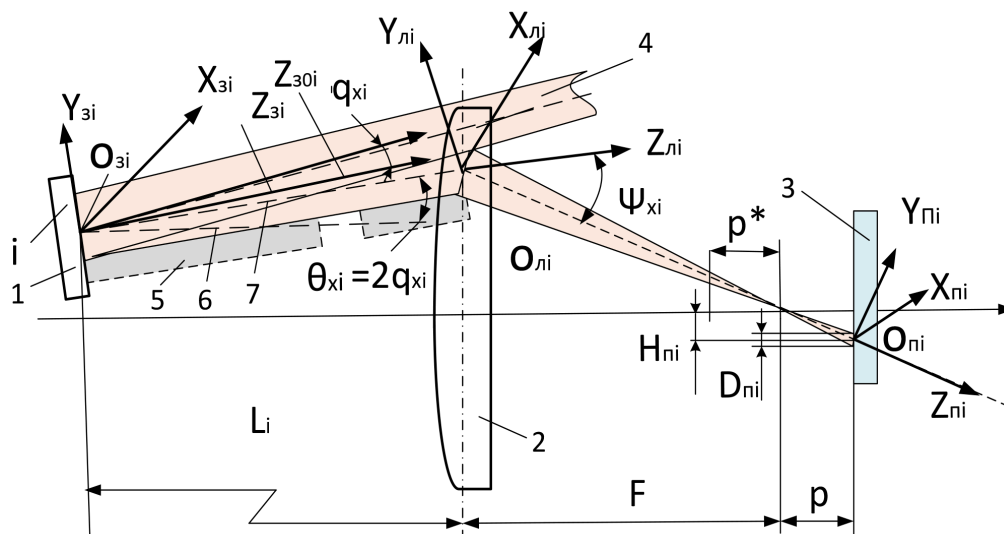


Рис. 4. Схема прохождения i -го лазерного пучка от i -го вторичного зеркала к объекту по сечению в плоскости поворота на угол q_{xi} : 1 – i -е вторичное зеркало; 2 – фокусирующая линза (длиннофокусная, преимущественно плоско-выпуклая); 3 – объект обработки; 4 – лазерный пучок от i -го первичного зеркала; 5 – условно обозначенное средство перемещения лучей до поверхности обработки, включая фокусирующую линзу 2; 6 – ось выходного луча в начальном положении i -го вторичного зеркала (параллельна оси Z_0); 7 – ось выходного луча при повороте зеркала на угол q_{xi} ; L_i – расстояние от центра i -го вторичного зеркала 1 до центра фокусирующей линзы 2 с учетом длины оптического тракта средства перемещения лучей до поверхности обработки; F – фокусное расстояние; p – проекция расстояния от точки фокуса до объекта обработки 3 на ось Z_0 инерциальной системы координат при расположении объекта обработки за фокусом; p^* – проекция расстояния от точки фокуса до объекта обработки 3 на ось Z_0 инерциальной системы координат при расположении объекта обработки перед фокусом (примем $p^* = p$); D_{ni} и H_{ni} – усредненный диаметр i -го лазерного пятна на поверхности объекта обработки и расстояние от центра i -го лазерного пятна на поверхности объекта до оси Z_0 инерциальной системы координат; ϕ – угол между центром лазерного пучка от i -го первичного зеркала и осью Z_0 инерциальной системы координат (постоянная величина); $X_{li}, Y_{li}, Z_{li}, O_{li}$ и $X_{ni}, Y_{ni}, Z_{ni}, O_{ni}$ – соответствующие системы координат

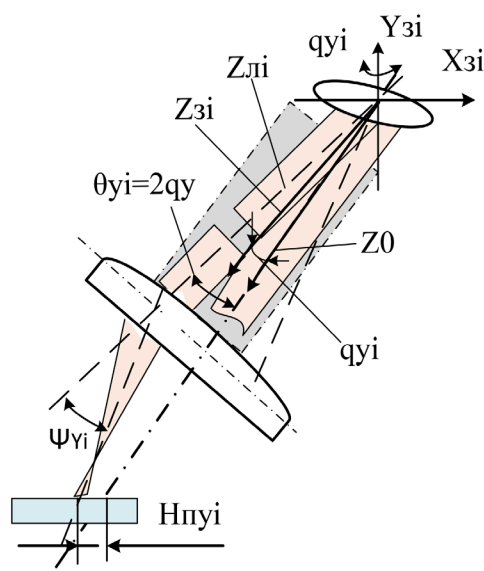


Рис. 5. Схема прохождения i -го лазерного пучка от i -го вторичного зеркала к объекту обработки в плоскости поворота на угол q_{yi} : H_{nyi} – расстояние от оптической оси до центра лазерного пятна на поверхности объекта обработки в плоскости поворота на угол q_{yi}

На рис. 3 представлена схема расположения компонентов привода микроперемещений i -го вторичного зеркала.

На рис. 4 схема прохождения i -го лазерного пучка от i -го вторичного зеркала к объекту обработки.

Условное обозначение средства перемещения лучей до поверхности обработки 5 в рассматриваемом случае допустимо вследствие использования оптической оси в качестве базовой системы координат, отражающие зеркала, располагаемые в нем являются плоскими, а также исходя из того, что лазерное излучение является одномодовым и его расходимость не превышает 1 мрад. На рис. 5 представлена схема прохождения i -го лазерного пучка от i -го вторичного зеркала к объекту обработки в плоскости его поворота на угол q_{yi} .

Учитывая многомерность системы для построения математической модели телескопа целесообразно использовать скалярные или векторно-матричные преобразования [6, с. 13] и однородные координаты операций, а также их представление и преобразование в соответствии с правилом Де-

навита – Хартенберга операций [7, с. 415–419]. Построение модели телескопа можно разделить на три этапа:

- описание положения вторичных вогнутых зеркал в инерциальной системе координат;
- описание взаимосвязи положения вторичных вогнутых зеркал с углами поворота вала шаговых микродвигателей;
- описание взаимосвязи положения лазерных пятен на поверхности объекта обработки, заданного в инерциальной системе координат с углами поворота вала шаговых микродвигателей.

Положение вторичных вогнутых зеркал в инерциальной системе координат может быть представлено с помощью матричного преобразования

$$T_{O3} = T_{Oш} \cdot T_{шз}, \quad (1)$$

где T_{O3} – блочная диагональная матрица, описывающая положение вторичных вогнутых зеркал в инерциальной системе координат, которая имеет вид

$$T_{O3} = \text{diag} \parallel W_{0zi} \parallel, \quad (2)$$

где W_{0zi} – матрица размером 4×4 , описывающая положение координатных осей и центра i -го зеркала в инерциальной системе координат. $T_{Oш}$ – блочная диагональная матрица, описывающая положение шаровых опор в инерциальной системе координат; $T_{шз}$ – блочная диагональная матрица, описывающая положение вторичных вогнутых зеркал в координатах шаровых опор. Блочная диагональная матрица $T_{Oш}$ имеет вид

$$T_{Oш} = \text{diag} \parallel W_{0шi} \parallel, \quad (3)$$

где $W_{0шi}$ – матрица размером 4×4 , описывающая положение координатных осей и цен-

тра i -й шаровой опоры в инерциальной системе координат, имеющая вид

$$W_{0шi} = \begin{vmatrix} C\Psi_i & -S\Psi_i & 0 & RiS\Psi_i \\ S\Psi_i & C\Psi_i & 0 & RiC\Psi_i \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Примечание. C – Cos S – Sin. Матрица (3) отражает поворот координатной системы X_0, Y_0, Z_0, o_0 вокруг оси Z_0 против часовой стрелки (угол положительный) на угол Ψ_i и совмещение начал координат O_0 и $O_{шi}$.

Блочная диагональная матрица $T_{шз}$, описывающая положение центра и координатных осей вторичных вогнутых зеркал в координатах шаровых опор имеет вид

$$T_{шз} = \text{diag} \parallel W_{шzi} \parallel, \quad (5)$$

где $W_{шzi}$, где матрица размером 4×4 , описывающая положение центра i -го зеркала и координатных осей, связанных с i -м зеркалом в координатах i -й шаровой опоры и имеющая вид

$$W_{шzi} = W_{qxi} \cdot W_{qyi}, \quad (6)$$

где W_{qxi}, W_{qyi} – матрицы, описывающие последовательно выполняемые поворот осей координатной системы $X_{шi}, Y_{шi}, Z_{шi}, o_{шi}$ вокруг оси $X_{шi}$ на угол q_{xi} и перенос точки $o_{шi}$ в точку o_{zi} и затем поворот осей координатной системы $X_{шi}, Y_{шi}, Z_{шi}, o_{шi}$ вокруг оси Y_i на угол q_{yi} . Матрица W_{qxi} имеет вид

$$W_{qxi} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Cq_{xi} & -Sq_{xi} & RiC\Psi_i \\ 0 & Sq_{xi} & Cq_{xi} & -kiCq_{xi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Матрица W_{qyi} имеет вид

$$W_{qyi} = \begin{vmatrix} Cq_{yi} & 0 & Sq_{yi} & kiCq_{yi} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -Sq_{yi} & 0 & Cq_{yi} & kiSq_{yi} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

Произведение матриц (6) и (7) дает следующий результат:

$$W_{шzi} = \begin{vmatrix} Cq_{yi} & 0 & Sq_{yi} & kiCq_{yi} \\ Sq_{xi}Sq_{yi} & Cq_{xi} & -Sq_{xi}Cq_{yi} & -kiSq_{xi}Sq_{yi} + RiSq_{yi}Cxi \\ -Cq_{xi}Sq_{yi} & Sq_{xi} & Cq_{xi}Cq_{yi} & -ki(Cq_{xi}Sq_{yi} - Cq_{xi}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Произведение матриц (4) и (9) позволяет описать положение i -го вторичного зеркала в инерциальной системе координат:

$$W_{0zi} = \begin{vmatrix} C\Psi_i S q_{xi} S q_{yi} - S q_{xi} S q_{yi} S\Psi_i & -S\Psi_i C q_{xi} & C\Psi_i S q_{yi} + S q_{xi} C q_{yi} S\Psi_i & k_i C\Psi_i C q_{yi} + \\ S\Psi_i C q_{yi} + C\Psi_i S q_{xi} S q_{yi} & C\Psi_i C q_{xi} & S\Psi_i S q_{yi} - C\Psi_i S q_{xi} X C q_{yi} & k_i S\Psi_i C q_{yi} + r_i S q_{yi} C x_i \\ -C q_{xi} S q_{yi} & S q_{xi} & C q_{xi} C q_{yi} & -k_i (C q_{xi} S q_{yi} - C q_{xi}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Выполним описание взаимосвязи положения i -го вторичного вогнутого зеркала с углами поворота γ_{1i} и γ_{2i} вала двух шаговых микродвигателей, осуществляющих поворот зеркала вокруг осей $X_{ш1}$ и $Y_{ш1}$. В соответствии с рис. 2, б, и рис. 3 при повороте i -го вторичного вогнутого зеркала вокруг оси $X_{ш1}$ углы поворота γ_{1i} и γ_{2i} будут одинаковыми и равными величине

$$\gamma_{1i} = \gamma_{2i} = t_b^{-1} (r_i + h_i) \operatorname{tg} q_{xi}, \quad (11)$$

где t_b шаг винта. Смещения центра i -го вторичного вогнутого зеркала по осям Y_0 и Z_0 составят величины

$$\Delta Y_0 = r_i C q_{xi} - k_i S q_{xi}, \quad \Delta Z_0 = r_i (1 - C q_{xi}) + k_i S q_{xi}. \quad (12)$$

При повороте i -го вторичного вогнутого зеркала вокруг оси $Y_{ш1}$ углы поворота λ_{1i} и λ_{2i} будут равными величине и противоположными по направлению:

$$\lambda_{1i} = 0,5 M_i t_b^{-1} \operatorname{tg} q_{yi}, \quad \lambda_{2i} = -0,5 M_i t_b^{-1} \operatorname{tg} q_{yi}. \quad (13)$$

Смещения центра i -го вторичного вогнутого зеркала по осям X_0 и Z_0 составят величины

$$\Delta X_0 = k_i S q_{yi}, \quad \Delta Z_0 = k_i (1 - S q_{yi}). \quad (14)$$

Для описания взаимосвязи положения лазерных пятен на поверхности объекта обработки, с углами поворота вала шаговых микродвигателей, воспользуемся рис. 4 и 5. Поскольку при повороте i -го вторичного вогнутого зеркала из начального положения на углы q_{xi} и q_{yi} лазерный пучок повернется вокруг осей X_{zi} , Y_{zi} на углы $\theta_{лxi} = 2q_{xi}$ и $\theta_{лыi} = 2q_{yi}$ соответственно положение пучка на фокусирующей линзе можно описать матрицей:

$$W_{лzi} = \begin{vmatrix} C\theta_{лыi} & 0 & S\theta_{лыi} & -L_i C\theta_{лыi} \\ S\theta_{лxi} S\theta_{лыi} & C\theta_{лxi} & -S\theta_{лxi} C\theta_{лыi} & L_i S\theta_{лxi} S\theta_{лыi} \\ -C\theta_{лxi} S\theta_{лыi} & S\theta_{лxi} & C q_{xi} C\theta_{лыi} & L_i C\theta_{лxi} (S\theta_{лыi} - 1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Преобразование координатной системы $X_{ли}$, $Y_{ли}$, $Z_{ли}$, $о_{ли}$ в систему $X_{пi}$, $Y_{пi}$, $Z_{пi}$, описывающее ориентацию луча и положение лазерного пятна на поверхности объекта обработки в системе координат $X_{ли}$, $Y_{ли}$, $Z_{ли}$, $о_{ли}$, можно представить аналогичной матрицей:

$$W_{лпi} = \begin{vmatrix} C\Psi_{yi} & 0 & S\Psi_{yi} & -L_i C\Psi_{yi} \\ S\Psi_{xi} S\Psi_{yi} & C\Psi_{xi} & -S\Psi_{xi} C\Psi_{yi} & L_i S\Psi_{xi} S\Psi_{yi} \\ -C\Psi_{xi} S\Psi_{yi} & S\Psi_{xi} & C\Psi_{xi} C\Psi_{yi} & L_i C\Psi_{xi} (S\Psi_{yi} - 1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Расстояния до центров лазерных пятен на поверхности объекта обработки можно определить по скалярным выражениям:

– расстояние до центра пятна в инерциальной системе координат по оси Y_0 :

$$H_{пyi} = P V_{yi} F^{-1}; \quad (17)$$

– расстояние до центра пятна в системе координат по оси Y_0 относительно центра координат i -го вторичного вогнутого зеркала:

$$H_{пyi}^3 = P V_{yi}^3 F^{-1}; \quad (18)$$

– расстояние до центра пятна в инерциальной системе координат по оси X_0 :

$$H_{\text{pxi}} = PV_{\text{xi}} F^{-1}; \quad (19)$$

– расстояние до центра пятна в системе координат по оси X_0 относительно центра координат i -го вторичного вогнутого зеркала:

$$H_{\text{pxi}}^3 = H_{\text{pxi}}. \quad (20)$$

В выражениях (17)–(19) обозначено:

$$V_{\text{yi}} = R_i + r_i + L_i (\text{tg} \theta_{\text{xi}})^{-1};$$

$$V_{\text{yi}}^3 = R_i + r_i - H_{\text{pyi}};$$

$$V_{\text{xi}} = L_i (\text{tg} \theta_{\text{yi}})^{-1}.$$

Равенство (20) отражает совмещение осей X_0 и X_{zi} в исходном положении i -го вторичного вогнутого зеркала. Усредненный диаметр лазерного пятна на поверхности объекта обработки можно определить по выражению

$$D_{\text{pi}} = P D_i F^{-1}, \quad (21)$$

где D_i – диаметр лазерного пятна на входе в фокусирующую линзу.

Предложена структура универсального многофункционального лазерного комплекса на базе многолучевого лазера, оснащенного управляемым телескопом с управляемыми величиной мощности и положением лазерных пятен на поверхности объекта обработки, а также системой датчиков информации о параметрах выполнения технологического процесса. Получена математическая модель управляемого телескопа для построения алгоритмов управления

и подготовки программного обеспечения работой комплекса.

Заключение

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при создании высокоавтоматизированных технологических лазерных комплексов различного назначения и широкой номенклатуры обрабатываемых изделий, а также при построении оптических систем с управляемым перемещением зеркал и линз.

Список литературы

1. Звелто О. Принципы лазеров / Пер., под науч. ред. Т.А. Шмаонова. СПб.: Лань, 2008. 720 с.
2. Вейко В.П., Петров А.А., Самохвалов А.А. Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» / под ред. Вейко В.П. СПб.: Университет ИТМО, 2018. 161 с.
3. Игнатов А.Г. Десять лет успеха: рынок фотоники и лазерных технологий (2004–2015 гг.) // Фотоника. 2015. № 3. С. 10–27. URL: <https://www.photonics.su/journal/article/4639?ysclid=m7naa35ay8285351501> (дата обращения: 27.02.2025).
4. Чухланцев Д.О., Умнов В.П., Мальцев В.В., Шипихин Д.А. Универсальный высокоавтоматизированный лазерный технологический комплекс на базе многолучевого лазера // Фотоника. 2020. Т. 14, № 6. С. 482–490. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.6.482.490.
5. Умнов В.П., Лятов Р.А. Система автоматизированной подготовки управляющих программ для лазерного упрочнения изделий сложной формы // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 8. С. 100–104. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37127> (дата обращения: 19.02.2025).
6. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. 128 с.
7. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Пер. И. Г. Араманича (ред. пер.) и др. 6. изд., стер. СПб.: Лань, 2003. 831 с.