

На правах рукописи

Голошевский Николай Владимирович

**Методы и программно-аппаратные средства управления
устройствами лазерной микрообработки с комплементарной
системой позиционирования**

05.13.18 «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель: В.П. Бессмельцев
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией лазерной
графики ИАиЭ СО РАН

Официальные оппоненты: Жмудь Вадим Аркадьевич
доктор технических наук, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования Новосибирский
государственный технический университет


Звездин Валерий Васильевич
доктор технических наук, Набережночелнинский
институт (филиал) федерального государственного
автономного образовательного учреждения
высшего образования "Казанский (Приволжский)
федеральный университет"

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»

Защита диссертации состоится «21» мая 2021 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.005.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан «2» апреля 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  д. ф.-м. н. Ильичев Л.В.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Одной из наиболее динамично развивающихся областей применения лазерного излучения является микрообработка материалов, используемая для создания элементов микроэлектроники, микромеханики и фотоники, защиты документов и ценных бумаг от подделки, аддитивного синтеза. Основными требованиями к обработке в подобных задачах являются микронная точность, субмикронное разрешение и высокое качество (минимизация неконтролируемого оплавления, обгорания материала, отсутствие трещин и сколов). Другим не менее важным требованием, особенно для промышленного применения, является высокая производительность обработки. Точность и разрешение обработки зависят в основном от применяемой системы позиционирования лазерного пучка и фокусирующей оптики, требуемое качество возможно получить при соответствии типа источника лазерного излучения и параметров обработки используемому материалу и характеру желаемой модификации. Использование в высокопроизводительных системах микрообработки импульсных лазеров с частотой следования импульсов сотни килогерц и выше или непрерывных с микросекундными фронтами включения/выключения позволяет выполнять обработку со скоростями порядка метра в секунду по сложной траектории.

Перемещение сфокусированного лазерного пучка со скоростью до нескольких метров в секунду и микронной точностью может осуществляться с помощью электромеханических систем позиционирования на основе шаговых или сервоприводов. Использование в такой схеме короткофокусного объектива позволяет получить световое пятно микронного диаметра, при этом размер обрабатываемых изделий может достигать нескольких квадратных метров. Однако из-за большой массы подвижных элементов системы позиционирования типичное время перемещения с микронной точностью составляет не менее нескольких миллисекунд. Как минимум на порядок более высокое быстродействие при перемещении лазерного пучка по сложным траекториям может быть достигнуто при использовании сканирующих модулей на основе угловых гальванометрических дефлекторов и объективов плоского поля. Получить в этом случае микронный размер сфокусированного пучка возможно лишь при использовании объективов с коротким рабочим отрезком, зона обработки которых не может быть больше нескольких квадратных сантиметров.

Для задач микрообработки объектов больших форматов при обеспечении точности, быстродействия и скорости перемещения пучка и сохранении его микронного размера в плоскости обработки возможно применение комплементарных (составных) систем позиционирования, объединяющих два

различные по типу сканера с взаимодополняющими характеристиками. Один из вариантов реализации комплементарной схемы предполагает использование высокоскоростного сканирующего модуля на основе гальванометрических дефлекторов для развертки лазерного пучка по сложной траектории в малом поле обработки, размер которого определяется используемым фокусирующим объективом. Обработка всей поверхности изделия достигается перемещением обрабатываемого материала и/или сканирующего модуля друг относительно друга посредством многокоординатной системы позиционирования на основе шаговых или сервоприводов, обладающей меньшим быстродействием по сравнению со сканирующим модулем. Точность и быстродействие таких систем зависят от эффективности алгоритмов и программно-аппаратных средств управления, которые должны учитывать искажения, вносимые оптическими компонентами, динамические свойства различных по быстродействию сканеров, особенности используемых лазерных источников. Известные на момент начала работы алгоритмы, программные и аппаратные средства не позволяли полностью реализовать потенциальные преимущества комплементарной схемы.

Целью работы диссертационной работы является создание комплекса программно-аппаратных средств управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка, позволяющих обеспечить высокую производительность микрообработки при микронной точности и субмикронном разрешении.

Основные задачи работы

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. исследовать эффективность современных методов и программных средств управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка;
2. разработать алгоритмы коррекции статических ошибок позиционирования лазерного пучка, связанных с конструктивными особенностями оптического тракта комплементарных систем позиционирования, программные средства для их калибровки;
3. разработать алгоритмы и программные средства динамической компенсации отклонений лазерного пучка от заданной траектории, связанных с переходными процессами электромеханических приводов комплементарной системы позиционирования; предложить методы эффективной настройки системы с использованием математической модели системы управления гальванометрического дефлектора.
4. разработать комплекс программно-аппаратных средств управления устройствами микрообработки с комплементарной системой позиционирования,

реализующий предложенные алгоритмы, выполнить практическую проверку его эффективности.

Научная новизна

- Предложен метод прецизионной калибровки гальванометрических сканирующих модулей, основанный на двухшаговом итерационном алгоритме обработки растровой профилометрической карты тестовой записи калибруемого модуля. На первом шаге координаты реперных точек полагаются соответствующими координатам максимумов суммарной глубины по строкам и по столбцам карты. На втором шаге выделяются фрагменты с центром в найденных точках и корреляционным методом определяются точные значения их координат. Показано, что предложенный метод обеспечивает высокую точность и робастность.

- Разработан метод повышения производительности системы лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования за счет динамической программной коррекции положения лазерного пучка в реальном времени с помощью гальванометрических дефлекторов по сигналам ошибки положения и скорости перемещения «высокоинерционных» приводов. Использование предложенного метода также позволяет реализовать лазерную обработку в режиме непрерывного перемещения гальванометрического сканирующего модуля относительно обрабатываемого изделия.

- Впервые предложены методы подготовки данных и управления для формирования микроканалов на подложках из оптического стекла, оптических кристаллов и полупроводниковых материалов сканирующим пучком фемтосекундного лазера, обеспечивающие отсутствие микродефектов в виде микросколов и микротрещин на поверхности подложек и микроканалов, а также внутри подложек при высокой производительности обработки.

- Предложена обобщенная структура системы управления устройствами микрообработки с комплементарной системой позиционирования, на ее основе разработан комплекс модульных программно-аппаратных средств для ЭВМ и встроенных контроллеров, содержащих процессор и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС).

Практическая значимость диссертации

Разработанный комплекс модульных программно-аппаратных средств успешно применен для настройки и управления следующих устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой:

- записи синтезированных цифровых голограмм;
- скоростной лазерной микроперфорации, предназначенной для нанесения защитных изображений на документы;

- лазерной микроперфорации непрерывно движущейся ленты (НИИ Гознака, г. Москва);
- промышленной лазерной маркировки средств инициирования взрывчатых веществ (ОАО «НМЗ Искра», г. Новосибирск);
- прецизионных лазерных рабочих станциях «ФПЛ» на основе фемтосекундного лазера для микрообработки заготовок из оптического стекла, созданных для АО "Новосибирский приборостроительный завод" (за разработку присуждена Государственная премия Новосибирской области) и АО «Вологодский оптико-механический завод»

Основные положения, выносимые на защиту

- Использование кросс-корреляционного алгоритма определения координат реперных точек калибровочного объекта с последующей коррекцией положения лазерного пучка методом кусочно-планарной интерполяции для коррекции статических искажений оптического тракта в комплементарных системах позиционирования при высокой робастности позволяет обеспечить относительную погрешность позиционирования лазерного пучка 10^{-5} от поля записи гальванометрического сканирующего модуля.
- Применение в комплементарных системах позиционирования метода динамической компенсации отклонений лазерного пучка от заданной траектории по сигналам от датчиков положения электромеханических приводов и данным калибровки оптического тракта, реализованного в виде программного модуля ПЛИС специализированного контроллера, позволяет существенно увеличить производительность обработки без потери точности в задачах лазерной микрообработки (микроперфорации и микрофрезерования).
- Впервые предложенные оригинальные способы фемтосекундной лазерной микрообработки стеклянных подложек, предполагающие заполнение контура формируемого микроканала растровыми линиями определенной длины, расположенными под углом от 35° до 90° относительно его образующей, позволяют уменьшить количество дефектов при высокой производительности.
- Разработанный комплекс универсальных программных средств для ЭВМ, и программно-аппаратных модулей для специализированных контроллеров, реализованных на основе ПЛИС и встроенных процессоров, позволяет проектировать и создавать высокопроизводительные системы лазерной микрообработки субмикронного разрешения, микронной точности.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: конкурсах научных трудов молодых ученых ИАиЭ СО РАН в 2002-2005 гг., научно-практической конференции «Оптика-XXI век», Москва, 2005 г.; «Лучевые технологии и

применение лазеров», Санкт-Петербург, 2006 г.; «СибОптика», Новосибирск, 2016, 2017 г.; «Fundamentals of Laser Assisted Micro- & Nanotechnologies», Санкт-Петербург, 2007, 2010, 2016 гг.; HOLOEXPO, Нижний Новгород, 2018; «Современные проблемы информатизации», Красноярск, 2019 г.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах в рецензируемых научных журналах и изданиях [1-6], входящих в перечень ВАК РФ, получено 2 патента на изобретение [7, 8] и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [9-12].

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 136 страницах, содержит 68 рисунков и 3 таблицы. Список литературы состоит из 154 наименований.

Содержание работы

Во введении обсуждается актуальность темы исследований, определены цель и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В **параграфе 1.1** рассматриваются особенности управления устройствами с комплементарной схемой позиционирования лазерного пучка, представленной на рисунке 1.

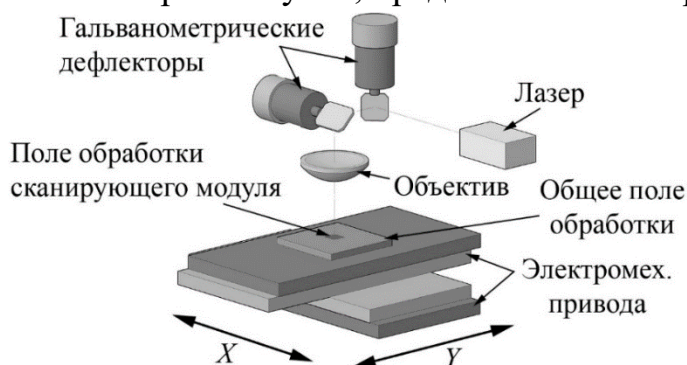


Рисунок 1 Схема комплементарной системы позиционирования

В такой схеме лазерный пучок попадает в установленный над обрабатываемой поверхностью «низкоинерционный» сканер – сканирующий модуль, содержащий пару гальванометрических зеркальных дефлекторов с датчиками углового положения зеркал и фокусирующий объектив плоского поля, который осуществляет развертку пучка в зоне, составляющей часть от общего поля обработки. Перемещение обрабатываемого объекта относительно поля обработки сканирующего модуля осуществляется с помощью «высокоинерционного» сканера, электромеханические приводы которого оборудованы датчиками для контроля их взаимоположения. В данной схеме быстродействие устройства микрообработки в основном определяется

«низкоинерционным» сканером, а нужная величина поля обработки – «высокоинерционным». Анализ литературы показал, что известные устройства с комплементарной системой позиционирования позволяют выполнять микрообработку с погрешностью не лучше 10 мкм. Для определения возможных путей повышения точности и быстродействия таких устройств исследованы погрешности, возникающие при управлении «низкоинерционным» и «высокоинерционным» сканерами.

В параграфе 1.2, посвященном управлению «низкоинерционным» сканером показано, что технические характеристики современных гальванометрических дефлекторов могут обеспечить развертку пучка с субмикронным разрешением и ошибкой позиционирования $\delta \sim 10^{-5}$ от полного размера поля обработки размером сотни мм², однако значения ошибки в реальных системах обычно на порядки больше. Одна из основных причин ошибок – статические отклонения, возникающие при отображении расчетных данных о положении лазерного пучка (x_s, y_s) в реальную позицию в плоскости обработки (\bar{x}_s, \bar{y}_s) . Их величина определяется параметрами и расположением фокусирующего объектива, конструктивными особенностями, качеством изготовления и настройки элементов оптического тракта сканирующей системы. Для компенсации таких отклонений чаще всего используется преобразование расчетных управляющих воздействий в скорректированные $(\hat{x}_s, \hat{y}_s) = F_{xy}(x_s, y_s)$, подача которых на дефлекторы обеспечивала бы снижение ошибки до требуемого уровня. В прецизионных системах лазерной микрообработки чаще всего используются различные методы кусочно-линейного и полиномиального представления корректирующего преобразования F_{xy} , а для определения его параметров выполняется процедура калибровки (рисунок 2).



Рисунок 2 Функциональная схема алгоритма калибровки гальванометрического сканирующего модуля

При калибровке массив управляющих воздействий дефлекторов (x_{s_c}, y_{s_c}) , подготовленный для формирования на поверхности среды регистрации специальных элементов топологии (реперных точек), без коррекции (т.е. $\hat{x}_{s_c} = x_{s_c}, \hat{y}_{s_c} = y_{s_c}$) поступает на вход сканирующего модуля. Выполняется формирование калибровочного объекта путем развертки на поверхности регистрирующей среды сфокусированного лазерного пучка. Далее с помощью

измерительного модуля формируется карта топологии калибровочного объекта, и выполняется ее анализ – осуществляется поиск координат реперных точек $(\bar{x}_{s_c}, \bar{y}_{s_c})$. Затем, при подготовке данных коррекции определяются различия между найденными координатами и их модельными значениями $\Delta x_{s_c} = \bar{x}_{s_c} - x_{s_c}$, $\Delta y_{s_c} = \bar{y}_{s_c} - y_{s_c}$, и выполняется поиск таких параметров преобразования F_{xy} , при которых отклонения пучка от заданной позиции $\Delta x_s, \Delta y_s$ во всем поле сканирования становятся меньше заданной ошибки δ . Однако ни в одной из рассмотренных работ не показана возможность калибровки системы микрообработки с точностью, которую теоретически позволяют обеспечить современные гальванометрические дефлекторы. Кроме того, в рассмотренных работах основное внимание уделяется алгоритмам калибровки и подготовке данных для нее, и практически не рассматривается влияние ошибок измерения и анализа калибровочного объекта на конечный результат.

В параграфе 1.3 рассмотрены особенности управления «высокоинерционным» сканерами. Показано, что современные электромеханические многокоординатные системы и алгоритмы управления ими позволяют осуществлять позиционирование с точностью до десятых долей микрона. Однако низкая скорость перемещения сервоприводов в заданную позицию с такой точностью снижает общую производительность системы позиционирования с комплементарной структурой. Кроме того, в установившейся позиции могут некоторое время продолжаться затухающие колебания подвижной части сервопривода длительностью от нескольких десятков миллисекунд до единиц секунд с частотой десятки герц, которые могут приводить к появлению ошибок лазерной обработки. Избежать таких ошибок можно, задерживая начало обработки на время стабилизации позиции, либо уменьшая скорость перемещения сервопривода, однако любое из этих решений дополнительно снижает производительность системы.

Во второй главе предложены методы и алгоритмы, позволяющие повысить точность и производительность устройств микрообработки с комплементарной системой позиционирования. В параграфе 2.1 рассмотрен метод высокоточной калибровки оптического тракта комплементарных систем позиционирования. В качестве калибровочного объекта используется прямоугольная равномерная сетка из вертикальных и горизонтальных линий, сформированных с помощью калибруемой системы. Используя пороговый характер процесса лазерного гравирования и считая распределение плотности мощности в сфокусированном пучке гауссовым, возможно получить линии шириной менее размера сфокусированной точки с поперечным профилем глубины, также имеющим в первом приближении гауссово распределение. Формирование карты объекта предложено выполнять при помощи

прецизионной сканирующей профилометрической системы с точечным бесконтактным сенсором, что обеспечивает существенно меньшие погрешности определения параметров линии, чем при использовании систем технического зрения. Для анализа полученной карты, представляемой в виде двумерного полутонового изображения, предложен двухшаговый итерационный алгоритм. На первом шаге алгоритма координаты максимумов суммарной интенсивности по строкам и по столбцам изображения полагаются соответствующими координатам узлов сетки $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$, (где i, j – порядковые номера узла по вертикали и горизонтали). Второй шаг алгоритма состоит в применении метода кросс-корреляции с использованием найденных координат. Изображение калибровочного объекта разбивается на фрагменты с центрами в точках $(\bar{x}_a^{ij}, \bar{y}_a^{ij})$, и размерами $w = \alpha \cdot |\bar{x}_a^{(i_c)(j_c+1)} - \bar{x}_a^{(i_c)(j_c)}|$, $h = \alpha \cdot |\bar{y}_a^{(i_c+1)(j_c)} - \bar{y}_a^{(i_c)(j_c)}|$, где $\alpha \in (0,1]$ – вещественный параметр (в экспериментах обычно использовалось значение $\alpha = 0,5$), i_c, j_c – индексы центральных горизонтальной и вертикальной линий сетки. Для фрагмента изображения I , содержащего искомый узел, и изображения-шаблона данного узла T вычисляются значения нормированной кросс-корреляции R по формуле:

$$R(u, v) = \frac{\sum_{u', v'} (T(u', v') \cdot I(u+u', v+v'))}{\sqrt{\sum_{u', v'} T(u', v')^2 \cdot \sum_{u', v'} I(u+u', v+v')^2}}$$

где (u, v) - всевозможные положения шаблона T относительно фрагмента I . По значениям u и v , при которых функция $R(u, v)$ достигает максимума, рассчитывается точное положение узла сетки $\bar{x}_{s,c}^{ij}, \bar{y}_{s,c}^{ij}$ на карте. На рисунке 3 проиллюстрирована работа кросскорреляционного алгоритма.

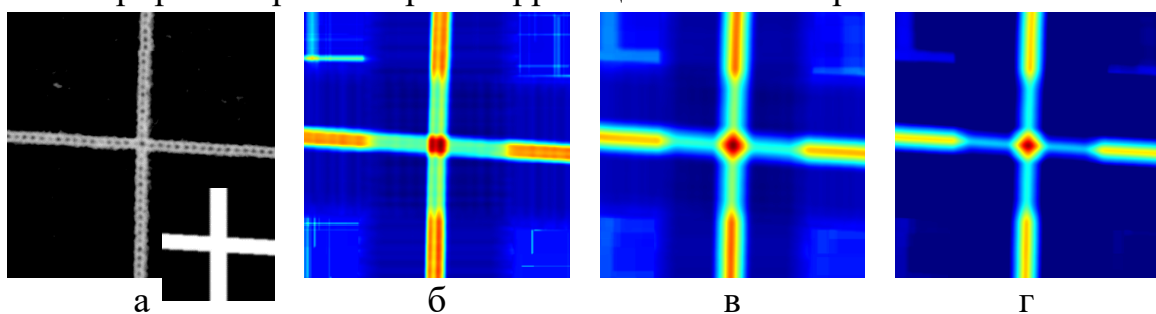


Рисунок 3 Иллюстрация работы кросскорреляционного алгоритма: исходное изображение узла калибровочной сетки и его шаблона T (а) и результаты применения кросскорреляционной функции с шаблонами, построенными без учета наклона и ширины линий (б), с учетом: только ширины линий (в), наклона и ширины линий (д)

Показано, что наиболее точно центр реперной точки определяется при учете наклона и ширины линий (рисунок 3д), кросскорреляционная функция имеет единственный ярко выраженный максимум с наименьшей площадью пика.

Для обеспечения высокой скорости вычислений при компактной аппаратной реализации на микроконтроллерах или ПЛИС предложен следующий алгоритм кусочно-планарной интерполяции функции F_{xy} . Скорректированные управляющие воздействия \hat{x}_s, \hat{y}_s рассчитываются как

$$\hat{x}_s = x_s + k_{sx} \cdot \Delta x_s, \quad \hat{y}_s = y_s + k_{sy} \cdot \Delta y_s.$$

где, k_{sx}, k_{sy} – коэффициенты пропорциональности для перехода между системами координат изображения и управляющих воздействий дефлекторов. Величины смещений $\Delta x_{s_c}^{ij}, \Delta y_{s_c}^{ij}$ в координатах узлов сетки были найдены в процессе калибровки. Расчет смещений $\Delta x_s, \Delta y_s$ во всех остальных точках выполняется следующим образом (рисунок 4):

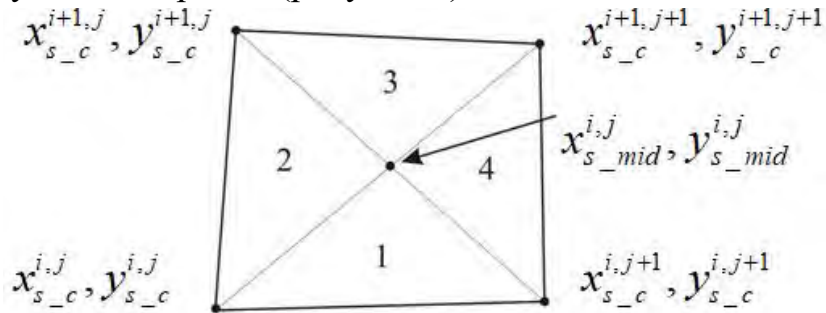


Рисунок 4 Иллюстрация алгоритма вычисления смещений $\Delta x_s, \Delta y_s$ внутри четырехугольника с узлами сетки в вершинах

Для каждой области вычисляются значения в средней точке $x_{s_{mid}}^{ij}, y_{s_{mid}}^{ij}$:

$$\Delta x_{s_{mid}}^{ij} = (\Delta x_{s_c}^{ij} + \Delta x_{s_c}^{i+1,j} + \Delta x_{s_c}^{i,j+1} + \Delta x_{s_c}^{i+1,j+1})/4,$$

$$\Delta y_{s_{mid}}^{ij} = (\Delta y_{s_c}^{ij} + \Delta y_{s_c}^{i+1,j} + \Delta y_{s_c}^{i,j+1} + \Delta y_{s_c}^{i+1,j+1})/4.$$

Введем переменные D – шаг линий сетки ($D = \frac{x_{max} - x_{min}}{N_x - 1}$, считая, что $N_x = N_y$),

$x_s^q = \frac{x_s}{N_x - 1}$, $y_s^q = \frac{y_s}{N_y - 1}$ – значения координат внутри четырехугольника, а также

вспомогательные $A = D - x_s^q + y_s^q$ и $B = x_s^q - y_s^q$. Тогда расчет скорректированных значений Δx_s для каждого из четырех секторов области выполняется по соответствующей формуле:

1. $\Delta x_s = A \times \Delta x_{s_c}^{ij} + B \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2y_s^q,$
2. $\Delta x_s = A \times \Delta x_{s_c}^{ij} - B \times \Delta x_{s_c}^{i,j+1} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2x_s^q,$
3. $\Delta x_s = -A \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j+1} + B \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2(D - x_s^q),$
4. $\Delta x_s = -A \times \Delta x_{s_c}^{i+1,j+1} - B \times \Delta x_{s_c}^{i,j+1} + \Delta x_{s_{mid}}^{ij} \times 2(D - y_s^q).$

Для расчета значений Δy_s используются аналогичные выражения. Все вычисления могут быть выполнены с использованием сложения и умножения двоичной целочисленной арифметики (если N_x и N_y имеют значение $2^k + 1$), что обеспечивает как минимум в 5 раз более высокую производительность по сравнению с другими алгоритмами при реализации на микроконтроллерах, а также на порядок большую компактность при реализации на ПЛИС. Однако

поскольку преобразование F_{xy} заведомо нелинейно, а для интерполяции используется линейное приближение, то найденные значения \hat{x}_s, \hat{y}_s по-прежнему могут приводить к отклонениям позиции пучка больше заданной ошибки позиционирования δ . Для уменьшения погрешности до заданной величины возможно выполнять несколько последовательных итераций рассмотренной выше процедуры. В этом случае в качестве приближения искомым управляющим воздействиям \hat{x}_s, \hat{y}_s рассматриваются последовательности чисел $\hat{x}_{s,k}, \hat{y}_{s,k}$, определяемые рекуррентными соотношениями

$$\hat{x}_{s,k} = \hat{x}_{s,(k-1)} + \Delta x_{s,k}, \hat{y}_{s,k} = \hat{y}_{s,(k-1)} + \Delta y_{s,k}; \hat{x}_{s,0} = x_s; \hat{y}_{s,0} = y_s$$

Дополнительные итерации расчета корректирующих значений благодаря быстрдействию предложенного алгоритма и компактности его реализации также не требуют больших вычислительных и аппаратных ресурсов.

В ходе экспериментальной проверки показана возможность позиционирования лазерного пучка с помощью гальванометрического сканирующего модуля с относительной погрешностью до $\delta \sim 10^{-5}$ при использовании предложенных решений калибровки и коррекции.

В параграфе 2.2 рассмотрен метод, позволяющий компенсировать ошибки позиционирования лазерного пучка, возникающие в результате колебаний его приводов по сигналам от их датчиков положения с помощью «низкоинерционного» сканера. Схема управления комплементарной системой позиционирования в этом случае будет иметь следующий вид (рисунок 5):

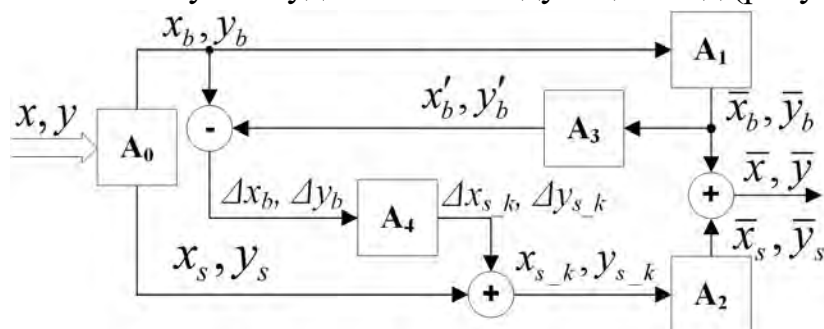


Рисунок 5 Схема компенсации колебаний «высокоинерционного» сканера с помощью «низкоинерционного» сканера

Координаты перемещения лазерного пучка по поверхности обрабатываемого изделия x, y разделяются на два потока: x_b, y_b (позиция «высокоинерционного» сканера A_1) и x_s, y_s (положение лазерного пучка в координатах «низкоинерционного» сканера A_2) так, чтобы $x = x_b + x_s, y = y_b + y_s$. По сигналам x'_b, y'_b с датчиков положения A_3 «высокоинерционного» сканера рассчитывается текущее смещение «низкоинерционного» сканера относительно заданной позиции: $\Delta x_b = x_b - x'_b, \Delta y_b = y_b - y'_b$. Найденное смещение преобразуется блоком A_4 в корректирующие значения $\Delta x_{s,k}, \Delta y_{s,k}$, которые после сложения с x_s, y_s поступают на вход «низкоинерционного» сканера. Для

определения параметров корректирующего блока А4 предложено использовать математическую модель системы, состоящей из гальванометрического дефлектора с драйвером, передаточная функция которой имеет следующий вид:

$$\frac{U_{pos}}{U_{in}} = \frac{K \cdot K_{\theta} \cdot K_e}{J \cdot s^2 + (K \cdot K_{\theta} \cdot K_d) \cdot s + K \cdot K_{\theta} \cdot K_e}$$

где J – суммарный момент инерции ротора J_r и зеркала J_m , K – коэффициент пропорциональности преобразования тока в момент двигателя (принимается допущение, что момент на валу пропорционален току), K_e – коэффициент усиления драйвера, K_d – коэффициент передачи дифференциального звена, K_{θ} – масштабный коэффициент преобразования датчика положения дефлектора. Поскольку компенсация колебаний «высокоинерционного» сканера может выполняться для каждого из его приводов независимо (за счет наличия датчиков положения), то моделирование выполнялось только для одной координаты системы «Cambridge Technology» драйвер 678x + дефлектор 6220. В качестве сигнала рассогласования положения привода «высокоинерционного» сканера Δx_b принята аппроксимация в виде затухающего гармонического процесса $\Delta x_b(t) = A \cdot e^{at} \cdot \sin(2\pi\omega t)$ с $A = 0,21$; $a = -0,03 \cdot 10^3$; $\omega = 54$ и $\omega = 100$. Позиция «высокоинерционного» сканера принята ($x_b = 0$, $y_b = 0$), тогда позиция лазерного пучка в поле обработки определяется как $x = x_s$, $y = y_s$. На рисунке 6 приведены результаты моделирования ошибки положения лазерного пучка с пропорциональным и дифференциальными звеньями в качестве блока А4.

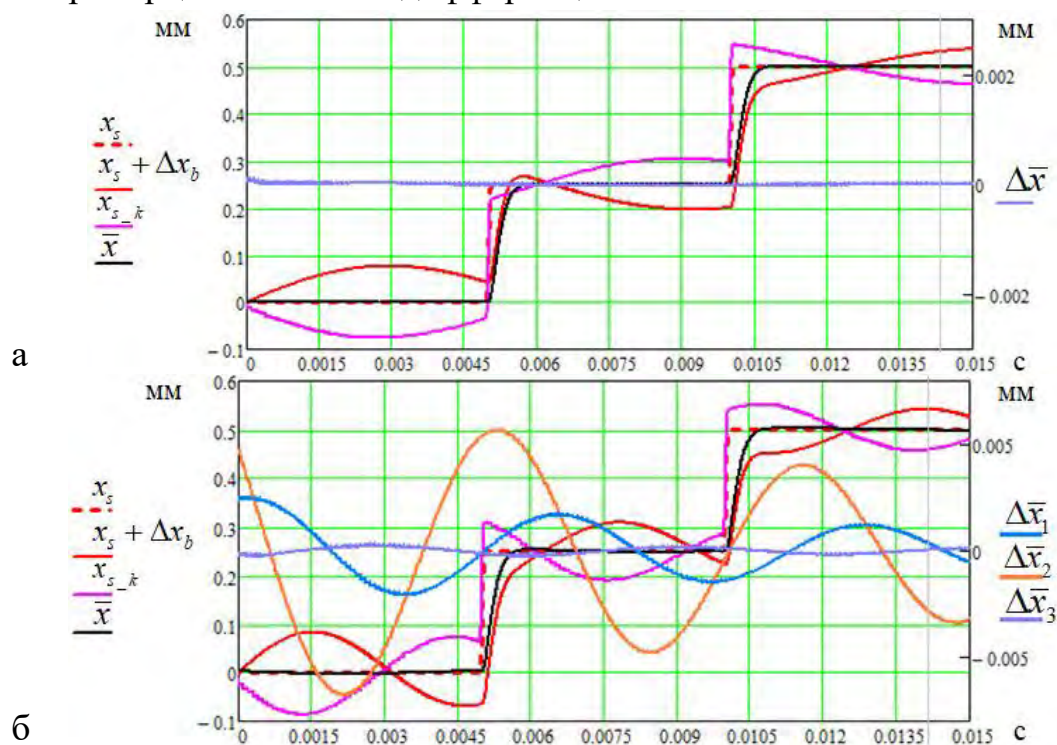


Рисунок 6 Ошибка позиционирования лазерного пучка при: (а) $\omega = 54$, $k_p = 0,99$, $k_d = 31,5$; (б) $\omega = 100$, $k_p = 1$ и $k_d = 30,0$ для $\Delta \bar{x}_1$, $k_p = 0,96$ и $k_d = 30$ для $\Delta \bar{x}_2$, $k_p = 0,96$, и $k_d = 31,5$ для $\Delta \bar{x}_3$

Видно, что при правильно подобранных коэффициентах (в случае для $\Delta\bar{x}_3$) пропорционального k_p и дифференциального звена k_d ошибка позиционирования может быть менее 1 мкм.

Экспериментальная проверка, выполнявшаяся с использованием устройства лазерной микроперфорации, показала, что применение предложенного алгоритма компенсации динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов «высокоинерционного» сканера обеспечивает повышение производительности в 2 раза без потери точности. Использование модели управления гальванометрическим дефлектором для определения коэффициентов корректирующего блока позволяет ускорить настройку устройства и избежать проведения большого числа физических экспериментов и измерений.

Третья глава посвящена разработке программно-аппаратных средств управления устройствами микрообработки с комплементарной схемой позиционирования. В **параграфе 3.1** предложена структура управления, реализующая предложенные методы и алгоритмы (рисунок 7):

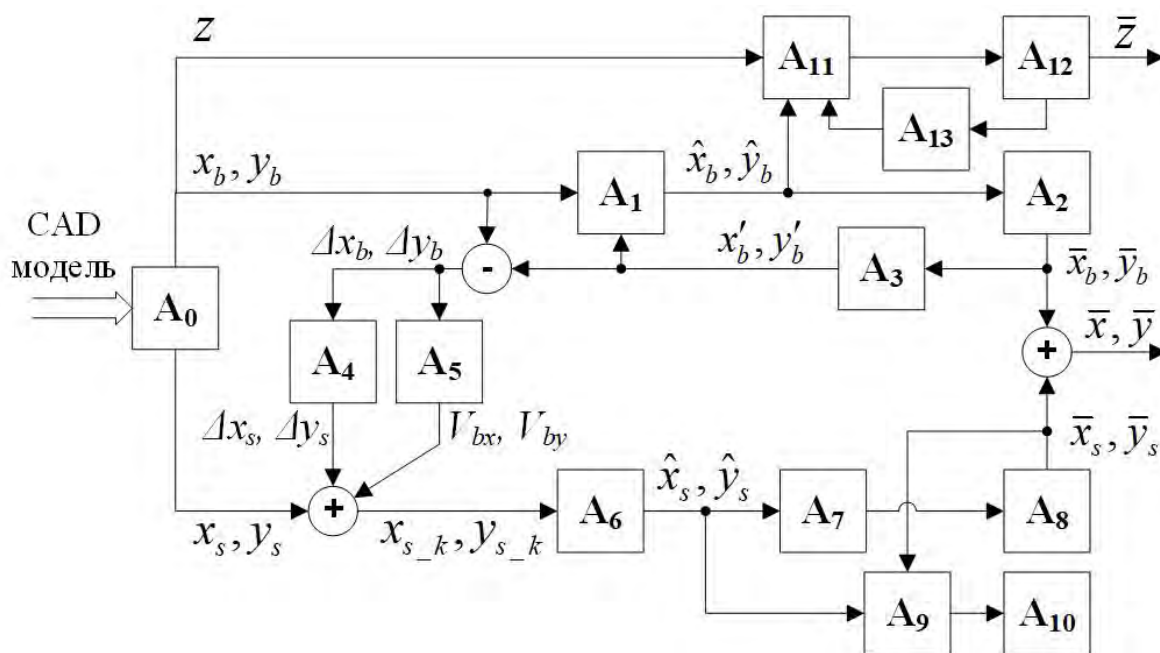


Рисунок 7 Структура средств управления комплементарной системой позиционирования лазерного пучка

CAD-модель задания на обработку преобразуется в модуле A_0 в цифровые команды x , y перемещения лазерного пучка по поверхности обрабатываемого изделия и z – вертикальной позиции фокусирующего механизма. Данные о перемещении в плоскости X, Y разделяются на два потока: x_b, y_b (позиция «высокоинерционного» сканера) и x_s, y_s (положение лазерного пучка в координатах «низкоинерционного» сканера) так, чтобы: $x = x_b + x_s, y = y_b + y_s$. Значения x_b, y_b , преобразованные в \hat{x}_b, \hat{y}_b с помощью модуля A_1 ,

используются для управления позицией двухкоординатного «высокоинерционного» сканера A_2 и определяют координаты рабочего поля «низкоинерционного» сканера A_8 относительно общего поля обработки. Сигналы x'_b, y'_b с датчиков положения A_3 предназначены как непосредственно для управления приводами посредством обратной связи, так и для вычисления ошибки смещения «низкоинерционного» сканера относительно заданной позиции (модуль A_4) $\Delta x_b, \Delta y_b$, и скорости перемещения двухкоординатного «высокоинерционного» сканера V_{bx}, V_{by} (модуль A_5).

Значения x_s, y_s задают положение лазерного пучка внутри поля записи сканирующего модуля, их преобразование выполняется в несколько этапов модулями A_6 и A_7 . На первом этапе выполняется коррекция смещения:

$$x_{s_k} = x_s + k_{bx} \times \Delta x_b + k_{vbx} \times V_{bx}, y_{s_k} = y_s + k_{by} \times \Delta y_b + k_{vby} \times V_{by},$$

где $k_{bx}, k_{by}, k_{vbx}, k_{vby}$ - масштабирующие коэффициенты. Координаты x_{s_k}, y_{s_k} пересчитываются звеном A_6 коррекции геометрических искажений, вносимых оптическими компонентами комплементарной системы. Значения \hat{x}_s, \hat{y}_s преобразуются в цифровые либо аналоговые управляющие сигналы (модуль A_7), по которым сканирующий модуль A_8 задает положение лазерного пучка в поле обработки. Модуль A_9 обеспечивает синхронизацию управления лазерным источником A_{10} по данным о перемещении лазерного пучка в поле обработки сканирующего модуля \hat{x}_s, \hat{y}_s или сигналам \bar{x}_s, \bar{y}_s с датчиков положения гальванометрических дефлекторов.

Привод A_{12} определяет вертикальное положение \bar{z} сканирующего модуля относительно поверхности обрабатываемого объекта и управляется с помощью модуля A_{11} по командам, предварительно рассчитанным для каждой позиции двухкоординатного привода. Для коррекции его позиции могут использоваться сигналы обратной связи от датчика положения A_{13} .

Управление подобной системой требует решения сложных вычислительных задач подготовки данных и одновременного управления в реальном времени несколькими исполнительными устройствами, которые к тому же должны быть синхронизованы между собой. Использование упрощенных операционных систем (ОС) или непосредственная реализация приложения без какой-либо формальной ОС позволяет хорошо прогнозировать работу в реальном времени. В то же время наличие большого количества программных библиотек для создания графического интерфейса пользователя и работы со стандартными САД-моделями, созданных для исполнения в ОС Windows или Linux, требует использования внешней ЭВМ. Исходя из вышеизложенных соображений функции управления устройством с комплементарной системой позиционирования разделены между внешней ЭВМ

и встроенным контроллером системы, содержащим процессор и ПЛИС следующим образом (рисунок 8).

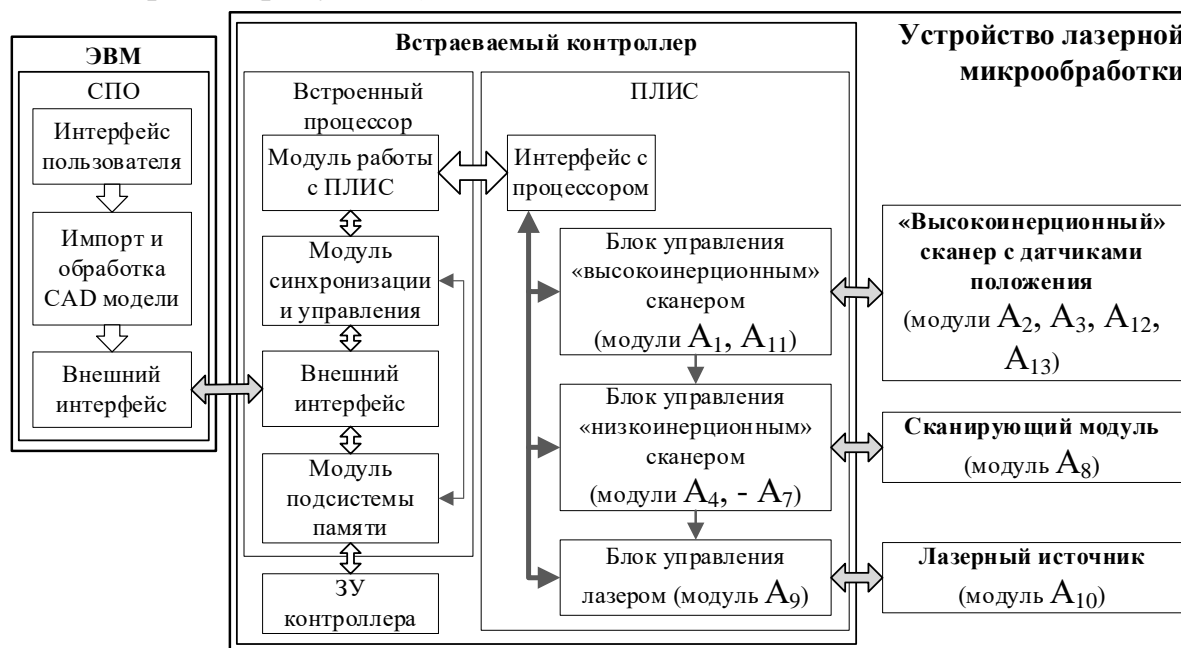


Рисунок 8 Структура средств управления комплементарной системой позиционирования лазерного пучка

Специальное программное обеспечение (СПО), исполняемое на ЭВМ, предназначено для решения задач, требующих большого объема вычислительной мощности и оперативной памяти и некритичных ко времени исполнения: импорта САD-моделей и их преобразования в набор команд перемещения и обработки (модуль A₀). Также на СПО возлагаются задачи организации графического интерфейса пользователя и обмена данными с контроллером системы. Со стороны контроллера за обмен данными с ЭВМ, передачу команд на исполнительные устройства и обработку сообщений от них отвечает СПО встраиваемого процессора. Основные функции управления (модули A₁, A₄ – A₆, A₉, A₁₁) исполнительными устройствами и их синхронизации, сбор данных от датчиков системы (модули A₃, A₁₃) выполняется с помощью ПО, реализованного на ПЛИС контроллера, что позволяет обеспечить синхронизацию в реальном времени всех исполнительных устройств с гарантированными задержками, гибкость и масштабируемость ПО в зависимости от решаемой задачи.

На основе предложенной структуры разработана серия специализированных аппаратных средств – встраиваемых контроллеров. Основой наиболее современного контроллера ScanControl v5e является SoC (System-on-a-Chip, система на кристалле) 5CSXC5 компании Intel, совмещающая в себе 2-х ядерный 32-х разрядный процессор с архитектурой ARM A9 и ПЛИС. По своим техническим характеристикам разработанные контроллеры не уступают серийной продукции ведущих мировых производителей (ScanLab,

Cambridge Technology Inc.) аналогичного назначения, а по набору интерфейсов и гибкости конфигурирования превосходят их.

В параграфах 3.2 и 3.3 описаны программные средства для встраиваемого процессора и ПЛИС контроллера, реализующие предложенные алгоритмы управления, в параграфе 3.4 – аппаратная часть контроллера. Показано, что по своим техническим характеристикам разработанный программно-аппаратный комплекс средств управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования не уступает серийной продукции ведущих мировых производителей.

В четвертой главе показана эффективность применения разработанных алгоритмов и программно-аппаратных средств в системах лазерной микрообработки. В параграфе 4.1 описано использование комплементарной системы позиционирования для микроперфорации в движении тонкой (десятки микрон) полимерной ленты, используемой для защиты документов от подделки. В устройстве микроперфорации «высокоинерционным» сканером является лентопротяжный механизм, а «низкоинерционным» - гальванометрический сканирующий модуль, текущее положение ленты контролируется по датчикам положения. В процессе работы устройства координаты лазерного пучка в поле записи сканирующего модуля в режиме реального времени корректируются на величину текущего продольного Δx_b и поперечного Δy_b смещения материала относительно начальной позиции, а затем преобразуются с помощью алгоритма коррекции статических искажений оптического тракта по таблице смещений, полученной в ходе предварительной калибровки устройства. Экспериментально подтверждено, что реализация в контроллере устройства предложенных алгоритмов позволила обеспечить требуемое качество обработки непрерывно движущихся со скоростью 0,1 – 0,2 м/с лент с различным составом, толщиной и покрытиями при скорости перемещения пучка ≈ 1.5 м/с (рисунок 9).

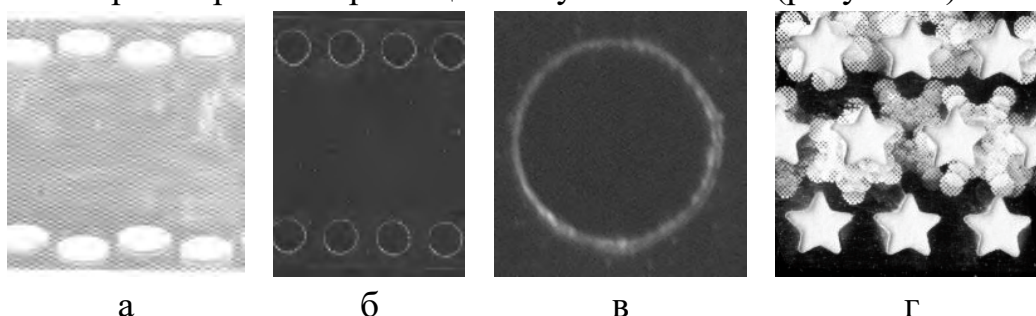


Рисунок 9 Образцы микроперфорации при скорости перемещения пучка ≈ 1.5 м/с, материала $\approx 0,2$ м/с: (а) эллиптическая перфорация 2×1 мм²; (б) перфорация в виде окружностей диаметром 1 мм; (в) его увеличенный фрагмент; (в) перфорация с контурами сложной формы

С помощью созданного устройства микроперфорации для НИИ Гознака было изготовлено несколько опытных партий ленты общей длиной более 100 км, использованной впоследствии при изготовлении экспериментальной полиграфической продукции.

В **параграфе 4.2** рассмотрена система управления устройства лазерной маркировки, предназначенного для нанесения на поверхность гильз детонаторов штрих-кода и символьной информации. Использование алгоритма коррекции статических искажений, вносимых компонентами оптической системы, позволило обеспечить точность позиционирования элементов маркировки не хуже 10 мкм. Благодаря реализации алгоритма динамической компенсации ошибки позиционирования обрабатываемого изделия, определяемой по сигналу обратной связи с датчика положения, производительность устройства составила не менее 3000 изделий в час. На момент написания диссертации на АО «Новосибирский механический завод «Искра» поставлено три устройства лазерной маркировки, с помощью которых обработано десятки миллионов гильз.

В **параграфе 4.3** показаны особенности применения разработанных программно-аппаратных средств для управления прецизионной трехканальной (1030, 515 и 343 нм) фемтосекундной лазерной рабочей станцией «ФПЛ», предназначенной для формирования микроканалов на заготовках из оптического стекла и кристаллов. Управление всеми узлами системы и их синхронизация осуществляется с помощью встроенного контроллера (глава 3).

Импорт и визуализация САD-модели, подготовка данных для реализации метода растрового заполнения контуров формируемых микроканалов, установка режимов микрообработки – частоты лазерного излучения, скорости перемещения лазерного пучка, стратегии обработки и других параметров реализованы в СПО «ФПЛ», исполняемом на управляющей ЭВМ. СПО также позволяет осуществлять точное совмещение САD-модели формируемого объекта и обрабатываемой заготовки по положению с помощью модуля технического зрения и выполнение автоматической фокусировки по данным встроенного датчика фокуса.

Для обеспечения требуемых скоростных характеристик при сохранении качества обработки предложены и реализованы новые способы управления положением лазерного пучка, основанные на растровой развертке пучка. Схематичное изображение структуры растрового заполнения при записи микроканала показано на рисунке 10а, а фотография элемента записи слоя микроканала с таким заполнением без перекрытия – на рисунке 10б.

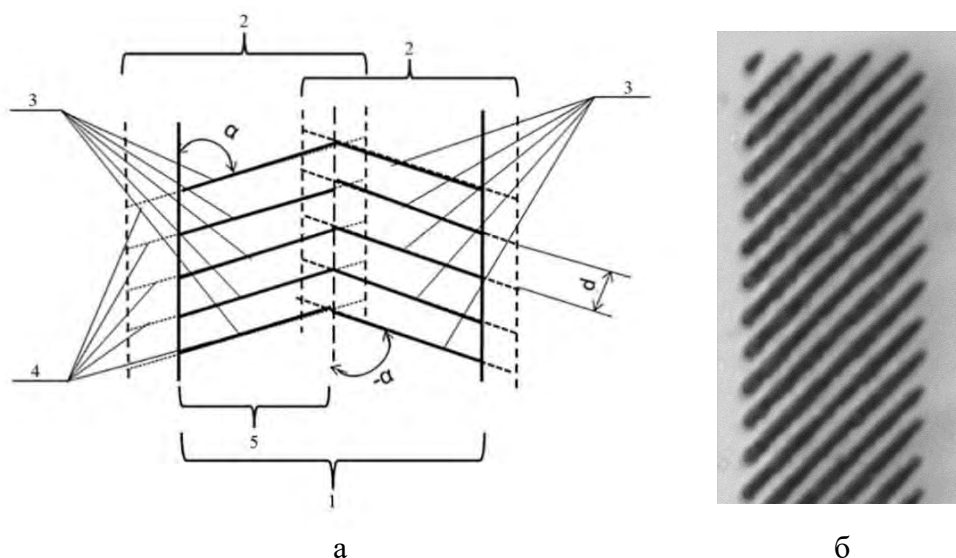


Рисунок 10 Растровый метод формирования микроканалов: (а) схема, (б) фотография микроканала с растровым заполнением

Микроканал 1 формируется путем однократного или многократного сканирования пучка растровым способом в пределах строки 2, которая состоит из участков микрообработки 3, обрамленных с двух концов зонами холостого хода 4. При этом длина участка микрообработки в каждой строке устанавливается меньше предельной длины, при превышении которой могут возникать микросколы и микротрещины. Зоны холостого хода, длина которых составляет 5-25% от длины участка микрообработки, необходимы для выхода зеркал дефлекторов на рабочую угловую скорость, что позволяет обеспечить равномерное распределение лазерных импульсов на всех участках строки микрообработки, избежать образования дефектов в его начале и конце. Сканирующий модуль осуществляет развертку лазерного пучка по одной или более растровым зонам микрообработки 5 под углом раstra α относительно образующей в каждой точке одного из контуров растровой зоны микрообработки. При этом расстояние d между строками не превышает их ширину, а угол раstra α лежит в пределах от 35° до 90° .

Показано, что совокупность примененных методов калибровки, алгоритмов коррекции статических и динамических искажений, программных и аппаратных решений позволила обеспечить формирования микроканалов шириной от 2 мкм с абсолютной точностью ± 1 мкм на подложках размером до 200×200 мм². Благодаря реализации в СПО для ЭВМ и ПЛИС контроллера предложенных алгоритмов растровой развертки лазерного пучка для формирования микроканалов удалось увеличить производительность микрообработки с 0,005 мм³/мин до 0,02-0,025 мм³/мин при отсутствии микродефектов подложки. Технические характеристики системы подтверждены в процессе изготовления нескольких сотен образцов различных изделий, изображения некоторых из них представлены на рисунке 11.

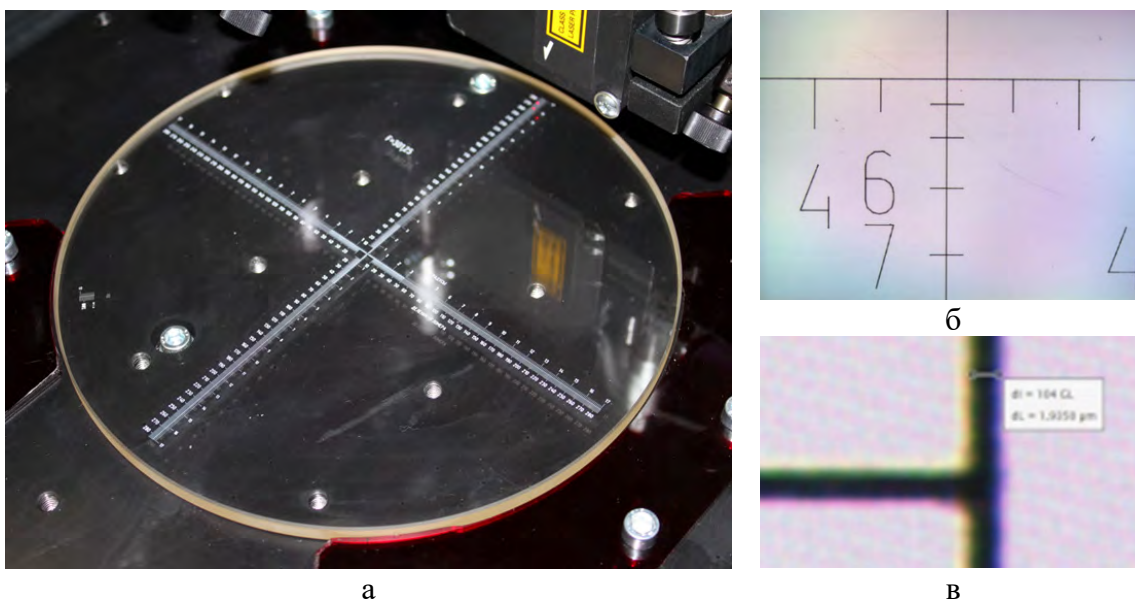


Рисунок 11 Обработанные оптические изделия: (а) шкала диаметром 200 мм, ширина штрихов 30 ± 8 мкм, точность расположения штрихов ± 1 мкм. (б) фрагмент сетки диаметром 20 мм, ширина штриха 2 мкм, точность расположения $\pm 0,5$ мкм, (в) ее увеличенный элемент

Система «ФПЛ» успешно используется на АО «Новосибирский приборостроительный завод», подобная ей одноканальная система – на АО «Вологодский оптико-механический завод». За разработку системы коллективу авторов ИАиЭ СО РАН и АО «НПЗ» присуждена Государственная премия Новосибирской области.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Предложен метод коррекции статических искажений, вносимых компонентами оптической схемы устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования, основанный на использовании робастного двухшагового алгоритма обработки растровой профилометрической карты, полученной при тестовой записи с помощью их сканирующего модуля. На первом шаге координаты реперных точек полагаются соответствующими координатам максимумов суммарной глубины по строкам и по столбцам карты. На втором шаге выделяются фрагменты с центром в найденных точках и корреляционным методом определяются точные значения их координат, по которым формируется калибровочная таблица. Использование итерационной коррекции управляющих воздействий гальванометрического сканирующего модуля методом кусочно-планарной интерполяции по полученной калибровочной таблице обеспечивает позиционирование лазерного пучка с относительной погрешностью до $\delta \sim 10^{-5}$.

2. Предложен метод компенсации динамических ошибок позиционирования электромеханических приводов «высокоинерционного сканера» по сигналам от

датчиков положения и данным калибровки «низкоинерционного» сканера, позволяющий для устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования увеличить производительность без потери точности, а также осуществлять обработку при непрерывном перемещении «низкоинерционного» сканера относительно обрабатываемого материала. Использование математического моделирования системы управления гальванометрическим дефлектором для определения коэффициентов корректирующего блока позволяет обеспечить эффективную настройку устройства микрообработки и избежать проведения большого числа физических экспериментов и измерений.

3. Разработан комплекс программно-аппаратных средств, реализующий предложенные методы и алгоритмы управления устройствами с комплементарной системой позиционирования лазерного пучка, не уступающий по своим функциональным возможностям и техническим характеристикам продукции аналогичного назначения ведущих мировых производителей. Модульный принцип построения программного обеспечения для ПЛИС и микроконтроллеров позволяет легко адаптировать созданные решения для управления системами лазерной микрообработки различного назначения.

4. Впервые предложены и реализованы на практике способы управления формированием микроканалов на подложках из оптического стекла, оптических кристаллов и полупроводниковых материалов фемтосекундными импульсами лазерного излучения, обеспечивающие отсутствие микродефектов в виде микросколов и микротрещин на поверхности подложек и микроканалов, а также внутри подложек при более высокой производительности по сравнению с достижимой ранее.

5. Разработанные программные-аппаратные средства использованы в системах лазерной микрообработки для изучения особенностей обработки диэлектрических материалов, микроперфорации органических материалов (НИИ Гознака), промышленной маркировки средств взрывания (ОАО НМЗ «Искра»), микрообработки заготовок из оптического стекла и кристаллов на основе лазера с фемтосекундной длительностью импульсов (АО «НПЗ», АО «ВОМЗ»), а также в ряде других систем научного и производственного назначения.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в журналах:

1. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканаторами // Автометрия. 2007. №1. С. 116-126

2. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Смирнов К.К. Аппаратно - программные средства динамической коррекции для управления лазерными системами микрообработки на основе комплементарных сканеров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. №3. С. 48-52.
3. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Смирнов К.К. Особенности управления лазерными системами микрообработки движущихся носителей // Автометрия. 2010. №1. С. 98-106.
4. Полещук А.Г., Кутанов А.А., Бессмельцев В.П., Корольков В.П., Шиманский А.И., Маточкин А.Е., Голошевский Н.В., Макаров К.В., Макаров В.П., Снимщиков И.А., Сыдык уулу Н. Микроструктурирование оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур // Автометрия. 2010. №2. С. 86-96.
5. Bessmeltsev V., Bulushev E., Goloshevsky N., Dostovalov A., Wolf A. High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser // Optics and Lasers in Engineering. 2016. Т. 79. С. 39–47.
6. Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Кастеров В.В., Киприянов Я.А., Смирнов К.К. Метод калибровки лазерной гальванометрической сканирующей системы субмикронного разрешения // Автометрия. 2018. №4. С. 84-91.

Патенты:

7. Способ и устройство формирования микроканалов на подложках из оптического стекла, оптических кристаллов и полупроводниковых материалов фемтосекундными импульсами лазерного излучения: пат. 2661165 Рос. Федерация: МПК В23 К26/36 (2014.01), В23 К26/062 (2014.01) В23 К26/082 (2014.01). / Баев С.Г., Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. и др. № 2017137458; заявл. 25.10.2017; опубл. 12.07.2018. Бюл. № 20. 16 с.
8. Способ формирования микроканалов на подложках и устройство для его реализации: пат. 2709888 Рос. Федерация: МПК В23 К26/36 (2014.01). / Баев С.Г., Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Катасонов Д. Н., Киприянов Я.А. № 2019108823; заявл. 26.03.2019; опубл. 23.12.2019. Бюл. № 36. 3 с.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

9. №2017610940. Программа для прецизионной обработки оптических элементов (для лазерного формирования сеток, масок, шкал, лимбов) ФПЛ / Голошевский Н.В., Смирнов К.К. №2016662814; Заявл.24.11.2016; Рег. 19.01.2017
10. №2017612639. Программа для нанесения графической информации в виде одномерного, двумерного штрих-кода и буквенно-цифрового кода на поверхности изделий методом лазерного гравирования Марк И-14 / Голошевский Н.В., Смирнов К.К. № 2016662844; Заявл. 24.11.2016; Рег. 02.03.2017

11. №2017613341. Программа для поиска таблицы корректирующих значений для сканирующей лазерной системы по файлу изображения тестовой сетки ScanCorrection / Голошевский Н.В., Смирнов К.К. № 2016662830; Заявл. 24.11.2016; Рег. 15.03.2017
12. №2017619142. Программа для контроллера систем лазерной прецизионной обработки оптических элементов ФПЛ_ARM / Голошевский Н.В., Кастеров В.В. № 2017616491; Заявл. 05.07.2017; Рег. 15.08.2017

Подписано в печать «31» марта 2021 г. Печать офсетная.
Бумага офсетная. Формат бумаги 60x84 1/16. Усл. печ. 1,2 л
Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии «АЛЕКСПРЕСС»
ИП Малыгин Алексей Михайлович
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 6/1, оф.104
тел.: (383) 217-43-46, 8-913-922-19-07