

## ОТЗЫВ

официального оппонента, д.т.н. В.А. Жмудя на диссертацию Голошевского Николая Владимировича «Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования»

**Актуальность темы диссертации.** Работа написана на актуальную тему создания методов и средств управления комплементарными системами позиционирования лазерного пучка в высокопроизводительных лазерных комплексах микрообработки. Данное направление исследований является весьма актуальным с точки зрения практического применения, поскольку позволяет значительно расширить возможности современных лазерных устройств, предназначенных для микрообработки. Решаемые в работе задачи повышения производительности, достижения субмикронного разрешения и микронной точности позиционирования лазерного пучка для обработки объектов больших форматов весьма востребованы при создании элементов микромеханики, фотоники, защиты документов.

**Структура и содержание диссертации.** Структура диссертационной работы адекватна ее содержанию. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложения.

В первой главе проведен анализ существующих вариантов применения комплементарных систем позиционирования лазерного пучка в лазерных комплексах, их достоинства и недостатки. Рассмотрены проблемы позиционирования лазерного пучка гальванометрическими сканирующими системами и координатными электромеханическими системами при их совместной работе, определены ограничения их точности и быстродействия, связанные со статическими искажениями, вносимыми компонентами оптической системы и динамическими ошибками позиционирования электромеханических приводов.

Во второй главе предложены методы и алгоритмы повышения точности и производительности устройств микрообработки с комплементарной системой позиционирования. Для прецизионной калибровки оптического тракта таких устройств представлен метод, основанный на двухшаговом итерационном алгоритме обработки профилометрической карты калибровочного объекта. Для компенсации переходных процессов электромеханических приводов комплементарной системы позиционирования предложен алгоритм динамической компенсации отклонений лазерного пучка от заданной траектории. Рассматриваются результаты настройки параметров алгоритма, выполненной с использованием математической модели гальванометрического дефлектора.

В третьей главе рассматривается реализация предложенных методов калибровки и коррекции как статических, так и динамических ошибок в составе разработанного Голошевским Н.В. программно-аппаратного комплекса. Предложены структура управления и вариант разделения функций между его вычислительными элементами.

Функции управления устройством с комплементарной системой позиционирования разделены между внешней ЭВМ и встроенным контроллером, содержащим процессор и программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС). Реализация основных функций управления исполнительными устройствами комплементарной системы с помощью ПО ПЛИС позволило обеспечить синхронизацию в реальном времени всех устройств системы с гарантированными задержками, гибкость и масштабируемость решения в зависимости от решаемой задачи.

В четвертой главе описаны некоторые из устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования, в которых были применены разработанные автором методы и программно-аппаратные средства управления.

Выполненная диссертантом работа представляет собой целостную работу, содержащую решение новой задачи новыми средствами с получением новых результатов, имеющих научную ценность и практическую новизну.

#### **Научная новизна работы.**

- 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.** Разработанный комплекс модульных программно-аппаратных средств успешно применен для настройки и управления устройств лазерной микрообработки с комплементарной системой различного назначения. За разработку прецизионной лазерной рабочей станции «ФПЛ» на основе комплементарной системы сканирования пучка фемтосекундного лазера для микрообработки заготовок из оптического стекла, созданной по договору с АО "Новосибирский приборостроительный завод" Голошевскому Н.В. в составе коллектива авторов за разработку присуждена Государственная премия Новосибирской области.

**Достоверность и обоснованность результатов.** Достоверность полученных результатов подтверждается апробацией работы в виде публикаций в научных журналах, рекомендованных ВАК, докладов и выступлений на конференциях.

**Публикации, отражающие основное содержание диссертации.** Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, Scopus, получено 2 патента на изобретение и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

К автореферату замечаний нет, он полностью соответствует диссертации

В работе имеются следующие недостатки:

**Замечания по диссертации.**

1. При обзоре достижений в мире на начало исследования, на стр. 7 сказано: что другими авторами достигнуто «разрешение до  $2^{18} - 2^{24}$  угловых позиций», однако в источнике [20] при диапазоне  $\pm 0.35$  rad, погрешность задана сдвигом нуля  $< 20$   $\mu$ rad и температурным дрейфом  $< 15$   $\mu$ rad/K, что даёт оценку  $10^4$  (при  $\Delta t = 1^\circ\text{K}$ ). В работе [19] диапазон  $\pm 22^\circ$  т.е.  $\pm 0,38$  rad, погрешность задана дрейфом  $10$   $\mu$ rad (за 8 часов) и температурным дрейфом  $2$   $\mu$ rad/ $^\circ\text{C}$ . Это даёт  $10^6$ , т.е.  $2^{20}$ , но никак не  $2^{24}$ . Т.е. источник [20] сообщает в 1000 раз худшие параметры, а источник [19], как минимум, в 10 раз хуже, чем в этой фразе в диссертации.

2. На стр. 7 странно выглядит фраза «стабильность до  $1,5 \times 10^{-5}$ », показателем меньше единицы можно описывать «нестабильность».

3. В диссертации в основных положениях потерялось форматирование, из-за чего «десять в минус пятой степени» превратилось в «десять тире пять»; в автореферате всё правильно.

4. По-видимому, вместо термина «фемтосекундная лазерная микрообработка» корректнее было бы использовать термин «микрообработка фемтосекундным лазером», так как фемтосекундный характеризует не время микрообработки, и длительность формируемых импульсов лазера.

5. Рис. 1.3 является не обобщенной структурой управления двумя сканерами, а одним из вариантов, для управления двумя сканерами можно применять и другие структуры. В предложенной структуре «низкоинерционный сканер» не охвачен обратной связью. Поэтому точно утверждение: «Внешние возмущающие воздействия  $f_1(t)$  и  $f_2(t)$ , ... могут компенсироваться контурами обратной связи», поскольку возмущение  $f_2(t)$  не компенсируется никаким контуром.

6. Имеются замечания к форматированию текста диссертации: в нескольких местах подписи к рисункам переместились на следующую страницу.

Данные замечания относятся к редактированию и оформлению, они никак не умаляют научной и практической ценности диссертационной работы Н. В. Голошевского и не влияют на общую положительную оценку представляемой работы

**Заключение.** Диссертационная работа Голошевского Николая Владимировича является завершённой научной работой, содержащей решение актуальной задачи, выполнена на высоком научном уровне и представляет собой цельное научное исследование. Текст оформлен в соответствии с требованиями ВАК. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, а также имеет большую практическую ценность, что подтверждается сведениями об использовании полученных автором научных результатов.

Сформулированные автором выводы можно охарактеризовать как обоснованные и достоверные. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Диссертационная работа «Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования» удовлетворяет критериям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, установленным для кандидатских диссертаций, а ее автор, Голошевский Николай Владимирович, заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой автоматике  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет»

доктор технических наук, доцент

29.04.2021

Жмудь Вадим Аркадьевич

Подпись заведующего кафедрой автоматике НГТУ д.т.н., доцента В.А. Жмудя удостоверяю.

Ученый секретарь НГТУ

доктор технических наук, профессор

Г.М. Шумский

