

**УТВЕРЖДАЮ**

Директор Института автоматики  
и электрометрии СО РАН  
чл.-корр. РАН



С.А. Бабин

“ 20 ” сентября 2020 г.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

о диссертации Голошевского Николая Владимировича «Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования», представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

(выписка из протокола семинара «Информационные технологии и системы» от 10 сентября 2020 г.)

Присутствовали:

д.т.н.	Потатуркин О.И. (председатель семинара)
д.т.н.	Лихачев А.В. (секретарь семинара)
д.т.н.	Двойнишников С.В.
д.т.н.	Золотухин Ю.Н.
д.т.н.	Корольков В.П.
к.т.н.	Белоконь С.А.
к.т.н.	Бессмельцев В.П.
к.т.н.	Борзов С.М.
к.т.н.	Катасонов Д.Н.
к.т.н.	Козик В.И.
к.т.н.	Косых В.П.
к.т.н.	Котов К.Ю.
к.т.н.	Насыров Р.К.
к.т.н.	Слуев В.А.

и другие сотрудники ИАиЭ СО РАН – всего 26 человек.

**Слушали:** Доклад Голошевского Н.В. по диссертации «Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

В обсуждении работы приняли участие д.т.н. Потатуркин О.И., д.т.н. Корольков В.П., д.т.н. Лихачев А.В. и другие. Научный руководитель к.т.н. Бессмельцев В.П. отметил существенный личный вклад Голошевского Н.В. в получении изложенных в диссертационной работе результатов, самостоятельность и инициативу при постановке и решении научных задач, его высокую квалификацию.

### **Постановили:**

Принять следующее заключение по диссертации Голошевского Н.В. «Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования».

1. Актуальность работы обусловлена следующим образом.

Одной из наиболее динамично развивающихся областей применения лазерного излучения является микрообработка материалов, основные требования к которой – это микронная точность, субмикронное разрешение, высокое качество и производительность. Точность и разрешение зависят в основном от применяемой системы позиционирования лазерного пучка и фокусирующей оптики, требуемое качество возможно получить при соответствии типа лазерного источника и технологических параметров обработки используемому материалу и характеру желаемой модификации. Использование современных лазеров с частотой модуляции в сотни килогерц и выше позволяет выполнять обработку со скоростями порядка метра в секунду по сложной траектории.

Для развёртки пучка со скоростью до нескольких метров в секунду и микронной точностью могут использоваться «высокоинерционные» электромеханические системы позиционирования на основе шаговых или сервоприводов, позволяющие обрабатывать изделия размером до нескольких квадратных метров. Однако из-за большой массы подвижных элементов типичное время единичного микроперемещения пучка составляет не менее нескольких миллисекунд. При этом в реальных задачах микрообработки необходимо выполнять  $10^6$  и более микроперемещений. Как минимум на порядок более высокого быстродействия при перемещении пучка по сложным траекториям можно достичь при использовании «низкоинерционных» сканирующих модулей на основе гальванометрических дефлекторов и объективов «плоского поля». Однако получить в этом случае микронный размер сфокусированного пучка можно лишь при использовании объективов с зоной обработки не больше нескольких квадратных сантиметров.

Для задач микрообработки объектов больших форматов при обеспечении точности, быстродействия и скорости перемещения пучка и сохранении микронного размера пятна в плоскости обработки возможно



применение комплементарных систем позиционирования, объединяющих два различных по типу сканера с взаимодополняющими характеристиками.

Один из вариантов реализации комплементарной системы предполагает использование «низкоинерционного» сканирующего модуля на основе гальванометрических дефлекторов и объектива «плоского поля» для скоростной развертки лазерного пучка по сложной траектории в малом поле обработки. Обработка всей поверхности изделия достигается перемещением обрабатываемого материала или сканирующего модуля друг относительно друга посредством «высокоинерционного» сканера на основе шаговых или сервоприводов.

Известные на момент начала работы методы и программно-аппаратные средства управления не позволяли полностью реализовать потенциальные преимущества комплементарной системы. Таким образом актуальной является разработка новых методов и создание комплекса программно-аппаратных средств управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой сканирования лазерного луча, позволяющих обеспечить высокую производительность микрообработки при микронной точности и субмикронном разрешении.

2. Диссертационная работа выполнялась в лаборатории лазерной графики Института автоматики и электрометрии СО РАН при проведении исследований по следующим программам:

- Проект П.10.2.3 Разработка методов лазерной модификации и синтеза объектов с неоднородной структурой, в том числе многослойной, для создания элементов дифракционной оптики, микроэлектроники, микромеханики и биохимических анализаторов. (2013-2016 гг.)
- Разработка и исследование технологий прецизионного лазерного формообразования с использованием методов физического и статистического моделирования, а также оптических средств контроля качества. Регистрационный номер: АААА-А17-117060810013-2 (2016-2017 гг.)
- 0319-2018-0007 П.10.2.7. Разработка и исследование технологий прецизионного лазерного формообразования с использованием методов физического и статистического моделирования, а также оптических средств контроля качества. Регистрационный номер: АААА-А17-117060810013-2 (2018 г.)

3. Основные научные результаты, полученные Голошевским Н.В.

- 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 ПЭВМ и встроенных контроллеров, содержащих процессор и ПЛИС.
- 

4. Результаты, сформулированные в диссертации, использованы при разработке устройств: скоростной лазерной микроперфорации; 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); прецизионной лазерной микрообработки заготовок из оптического стекла, созданных для АО "Новосибирский приборостроительный завод" (за разработку присуждена Государственная премия Новосибирской области) и АО «Вологодский оптико-механический завод», а также в лабораторных исследовательских системах конусного сверления, микрообработки, записи синтезированных цифровых голограмм.

--

5. Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах: 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.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 печатных работах в рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

- Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканаторами // Автометрия. 2007. №1. С. 116-126
- 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.
- Бессмельцев В.П., Голошевский Н.В., Смирнов К.К. Особенности управления лазерными системами микрообработки движущихся носителей // Автометрия. 2010. №1. С. 98-106.
- 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.
- 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. V. 79. P. 39–47.
- 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.

Получены 2 патента на изобретение и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

6. Личный вклад автора включает разработку методов калибровки и управления для лазерных систем микрообработки с комплементарной системой позиционирования, обеспечивающих их работу с микронной точностью и высокой производительностью. Автором предложены архитектура комплекса модульных программно-аппаратных средств устройств микрообработки, вариант распределения его функций между внешней ЭВМ и встроенным контроллером, содержащим процессор и ПЛИС, разработана линейка специализированных контроллеров и программных средства для встраиваемых процессора и ПЛИС, реализующих предложенные методы управления. Также автор внес основной вклад в разработку наладку и запуск программно-аппаратных систем управления лазерными комплексами с комплементарными

сканирующими модулями для промышленной лазерной маркировки средств инициирования взрывчатых веществ (ОАО «НМЗ Искра», прецизионной лазерной микрообработки заготовок из оптического стекла, для АО "Новосибирский приборостроительный завод" и АО «Вологодский оптико-механический завод».

7. Все выносимые на защиту результаты получены либо самим соискателем, либо при его непосредственном участии. В опубликованных работах участие автора диссертации заключалось в самостоятельном проведении исследований, непосредственном участии в подготовке текста публикаций. В ходе выполнения диссертационной работы Голошевский Н.В. проявил себя сформировавшимся научным работником, способным ставить и решать сложные задачи и проводить исследования на высоком научном уровне.

8. На основе вышеизложенного, семинар постановил считать диссертационную работу Голошевского Н.В. «Методы и программно-аппаратные средства управления устройствами лазерной микрообработки с комплементарной системой позиционирования» удовлетворяющей всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, и рекомендовать ее к защите по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Председатель семинара  
д.т.н.



О.И. Потатуркин

Секретарь семинара  
д.т.н.



А.В. Лихачев