

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института автоматики
и электрометрии СО РАН
академик РАН



А.М. Шалагин

“ 24 ” июня 2015 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о диссертации Булушева Евгения Дмитриевича «Разработка алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров», 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 22 июня 2015 г.)

Присутствовали:

д.т.н.	Потатуркин О.И. (председатель семинара)
д.т.н.	Зюбин В.Е.
д.т.н.	Кирьянов В.П.
д.т.н.	Лихачев А.В.
д.т.н.	Нежевенко Е.С.
д.ф.-м.н.	Плеханов А.И.
к.т.н.	Бессмельцев В.П.
к.т.н.	Борзов С.М.
к.т.н.	Иванов В.А.
к.т.н.	Лубков А.А.
к.т.н.	Козик В.И.
к.т.н.	Косых В.П.
к.т.н.	Соловьёв А.А.
к.т.н.	Слуев В.А.
к.т.н.	Шакенов А.К.

и другие сотрудники ИАиЭ СО РАН – всего 23 человека.

Слушали: Доклад Булушева Е.Д. по материалам диссертации «Разработка алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров», 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. Зюбин В.Е., д.т.н. Потатуркин О.И., д.т.н. Нежевенко Е.С., д.т.н. Лихачёв А.В., к.т.н. Борзов С.М и другие. Научный руководитель к.т.н. Бессмельцев В.П. отметил существенный личный вклад Булушева Е.Д. 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 Булушева Е.Д. «Разработка алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров»:

1. Актуальность работы обусловлена следующими факторами. Широкое применение лазерных технологий микрообработки в промышленном производстве определяется возможностью проведения прецизионной обработки различных материалов, в том числе сверхтвердых, высокотемпературных и тугоплавких по произвольным трехмерным моделям (CAD-моделям) с высокой скоростью, недостижимой другими методами. В настоящее время существенно возросли требования как к показателям качества обрабатываемого изделия (разрешению, точности размеров, и др.), так и к производительности лазерной микрообработки. При разработке новых и усовершенствовании существующих технологических процессов лазерного формообразования возникает задача определения диапазона параметров (энергии импульсов, частоты импульсов и др.), оптимизирующей отношение качество/скорость обработки материала. Эта задача может быть решена как на математическом (модельном)

уровне, так и на техническом (экспериментальном). Вследствие многообразия и нелинейности физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, и недостаточности знаний об изменении свойств материалов в процессе обработки, использование методов математического моделирования для решения данной задачи не всегда эффективно.

Ранее показано, что для определения оптимальных режимов микросекундной и наносекундной лазерной микрообработки может быть использован экспериментальный подход, состоящий из следующей последовательности этапов: проведение тестовых экспериментов (от двадцати до нескольких сотен) при различных режимах обработки; измерение объектов: определение их размеров и показателей качества; построение математической модели зависимости показателей качества изделия от технологических параметров обработки; определение области оптимальных значений параметров на основе модели. На этапе построения модели используются регрессионный анализ и искусственные нейронные сети, что позволяет достичь хорошего совпадения экспериментальных и расчётных данных (средняя ошибка менее 10%). Необходимым условием для получения адекватной модели с минимальными ошибками аппроксимации является наличие точных и надежных средств измерения формируемых объектов и сравнения геометрических и физических параметров изделий с требуемыми значениями.

Для измерения размеров объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки, целесообразно использовать оптические методы измерения, т.к. они позволяют получать изображения и профили поверхности с разрешением до десятков нанометров за время, сравнимое со временем её обработки лазерным пучком. Однако при измерении возникают ошибки и погрешности, связанные с ограничениями динамического диапазона и чувствительности измерительной системы, при этом данные характеризуются пропущенными значениями, геометрическими искажениями, высоким уровнем шума, а также большими объемами (больше 1 Гбайт). Всё это ужесточает требование к помехоустойчивости и быстродействию программно-аппаратных средств контроля качества изделий и затрудняет использование существующих методов, применяемых в механическом и оптико-электронном производстве для определения геометрических характеристик объектов.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что актуальной является задача создания алгоритмов и программного комплекса для получения и исследования математических моделей зависимостей показателей

качества изделий, формируемых в процессе лазерной микрообработки, от технологических параметров обработки. Для решения поставленной задачи необходимым является создание методов и средств анализа изображений и профилограмм поверхности, обработанной лазерным излучением, получаемых с помощью систем технического зрения и оптических профилометров.

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

- Интеграционные проекты СО РАН №41, №138
- Исследования по программе РАН П.8.2. «Фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с веществом»
- Проект «Разработка технологии точной лазерной микрообработки стеклянных, кристаллических, полимерных и композитных заготовок изделий оптико-механической промышленности для изготовления методами прямой лазерной записи оптических шкал, лимбов, сеток» (проект Минобрнауки № 2012-218-03-004).

3. Основные научные результаты, полученные Булушевым Е.Д.:

- Разработан алгоритм сопоставления изображений обработанной лазерным излучением поверхности с САД-моделью обработки на основе алгоритма Ciratefi и итеративного поиска максимума.
- Предложен метод анализа изображений зоны векторной лазерной микрообработки, позволяющий определять геометрические параметры объектов и проводить сравнение с САД-моделью. Метод основан на совмещении изображений с САД-моделью обработки и выделении контуров объектов в поперечном направлении к каждому вектору САД-модели.
- С использованием разработанного метода анализа изображений зоны векторной лазерной микрообработки впервые показана возможность автоматического определения оптимальных режимов высокоскоростной лазерной микрообработки хрупких материалов на примере фемтосекундной лазерной (1026 нм, 232 фс) микрообработки стекла ВК7 на частоте 50кГц.
- Получена регрессионная модель зависимости глубины микроканалов от энергии, перекрытия импульсов и количества проходов при фемтосекундной лазерной обработке стекла ВК7 на частоте 50 кГц. По модели могут быть определены режимы лазерной микрообработки

для формирования микроканалов с заданной глубиной в диапазоне 1-30 мкм со средней погрешностью, не превышающей 10%.

4. Научные положения, выводы и результаты, сформулированные в диссертации, подтверждены тестированием, как на модельных данных, так и на данных экспериментов, проведенных с использованием систем лазерной микрообработки, разработанных в ИАиЭ СО РАН. Показана практическая польза разработанного комплекса программ, при проведении исследований фемтосекундной лазерной микрообработки стеклянных подложек. На разработанное программное обеспечение получено 2 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ (№2014611773 от 14 апреля 2014 г., №2015616114 от 29 мая 2015 г.).

5. Результаты диссертации докладывались на 13 международных и всероссийских конференциях в том числе: Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA, Санкт-Петербург 2010 г.), Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN, Санкт-Петербург, 2010 и 2013 гг.), Лазеры. Измерения. Информация (Санкт-Петербург, 2012 г.), Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине (Новосибирск, 2013), СибОптика (Новосибирск, 2014), Laser Optics (Санкт-Петербург, 2014), Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Тюмень, 2014), Advanced Laser Technologies (Касис, Франция, 2014), на научном симпозиуме Taiwan-Russia Bilateral Symposium on Material Processing at Micro and Nano Level (Новосибирск, 2013 г.).

Основные результаты опубликованы в следующих журналах, рекомендуемых высшей аттестационной комиссией:

- Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д., Голошевский Н.В. Экспертная система для оптимизации режима лазерной микрообработки // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 2. С. 17–22.
- Bessmeltsev V.S., Bulushev E.D., Goloshevsky N. V. Method for Localizing and Measuring Structures Formed under Laser Microprocessing // Pattern Recognit. Image Anal. Adv. Math. Theory Appl. 2011. Т. 21, № 3. С. 373–376.
- Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 2. С. 343–350.

- Бессмельцев, В. П., Булушев Е.Д. Оптимизация режимов лазерной микрообработки // Автометрия. 2014. Т. 50, № 6. С. 3–21.

6. Личный вклад автора включает разработку алгоритмов и программных средств для анализа изображений и профилограмм обработанной лазерным излучением поверхности. Булушевым Е.Д. также проведено их тестирование, как с помощью вычислительного эксперимента, так и с помощью тестовых объектов. Автором исследована применимость оптических методов для измерения профиля поверхности, модифицированной лазерным излучением, реализованы программные средства для управления измерительной системой «Сканирующий профилометр на основе хроматических конфокальных датчиков», исследована эффективность экспериментальных методов определения оптимальных режимов лазерной микрообработки.

При выполнении диссертационной работы Е.Д. Булушев проявил себя сложившимся научным работником, способным ставить и решать сложные задачи и проводить исследования на высоком научном уровне.

7. На основе вышеизложенного, семинар постановил считать диссертационную работу Е.Д. Булушева «Разработка алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров» удовлетворяющей требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, и рекомендовать 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