

Булушев Евгений Дмитриевич

Разработка алгоритмов и программных средств для  
определения оптимальных параметров лазерной  
микрообработки по данным систем технического зрения и  
оптических профилометров

05.13.18 «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

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

Научный руководитель: **Бессмельцев Виктор Павлович**  
кандидат технических наук, заведующий  
лабораторией

Официальные оппоненты: Чесноков Владимир Владимирович,  
профессор, доктор технических наук, Сибирский  
государственный университет геосистем и  
технологий, профессор кафедры физики

Грузман Игорь Семенович  
профессор, доктор технических наук,  
Новосибирский государственный технический  
университет, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт систем обработки  
изображений Российской академии наук

Защита диссертации состоится "29" января 2016 г. в 10-00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.005.01 при Федеральном государственном  
бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии СО  
РАН, адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан " " г.

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

# Общая характеристика работы

## Актуальность

Широкое применение лазерных технологий микрообработки в промышленном производстве обуславливается 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 соотношение качество/скорость обработки материала [1]. 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 [2–5], 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 согласия экспериментальных и расчётных данных (средняя ошибка менее 10%) [6]. 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 с разрешением до десятков нанометров за время, сравнимое со временем обработки поверхности 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 объёмами (более 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. Таким образом, 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 для анализа изображений и профилограмм поверхности, обработанной лазерным излучением, получаемых с помощью систем технического зрения и оптических профилометров, и их сопоставления с САД-моделями.

### **Цель работы**

Целью работы является создание комплекса программно-алгоритмических средств для автоматизации определения режимов лазерной микрообработки, при которых выполняются технологические требования, как по производительности, так и по качеству обрабатываемых изделий, что включает разработку алгоритмов и программных средств быстрого и высокоточного контроля качества по данным измерений, получаемым с помощью систем оптической микроскопии и профилометрии. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

### **Задачи работы**

1. Исследовать эффективность методов математического моделирования и экспериментальных методов для определения оптимальных режимов лазерной микрообработки;
2. Экспериментально исследовать и установить ограничения оптических методов при измерении профиля поверхности, модифицированной лазерным излучением;
3. Разработать алгоритмические и программные средства для анализа изображений зоны векторной лазерной микрообработки, получаемых с помощью системы технического зрения, и определения размеров структур;
4. Разработать алгоритмические и программные средства для сопоставления профилограммы поверхности, модифицированной лазерным излучением, с CAD-моделью обработки;
5. Исследовать эффективность применения разработанных алгоритмов для измерения размеров и показателей качества структур на изображениях и профилограммах поверхности, обработанной лазерным излучением;
6. Применить разработанные алгоритмы для контроля качества изделий оптико-механической промышленности, обработанных фемтосекундным лазерным излучением, и по полученным данным определить технологические параметры, обеспечивающие создание объектов с минимальными дефектами при высокой производительности обработки.

### **Научная новизна**

Разработан быстрый алгоритм сопоставления изображений обработанной лазерным излучением поверхности с CAD-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 поэлементное сопоставление с CAD-моделью. Метод основан на совмещении изображений с CAD-моделью обработки и выделении контуров объектов в поперечном направлении к векторам CAD-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 BK7 по критериям качества границ, минимальной шероховатости и производительности.

Получена регрессионная модель зависимости глубины микроканалов от энергии, перекрытия импульсов и количества проходов при фемтосекундной лазерной обработке стекла BK7. По модели определены режимы лазерной микрообработки для формирования микроканалов с заданной глубиной в диапазоне 1-30 мкм со средней погрешностью, не превышающей 10%.

### **Практическая значимость**

К числу практически важных результатов работы относится создание комплексов программ «MarkInspector» и «Profilometer», предназначенных для автоматизации измерения поверхности, определения размеров и показателей качества объектов и сопоставления их с заданными в САД-модели значениями. Разработанные программно-алгоритмические средства встроены в измерительную систему «Сканирующий профилометр на основе хроматических конфокальных датчиков», в систему лазерной микрообработки «Лазерная технологическая рабочая станция на основе лазера с перестраиваемой длительностью импульсов (фемто - пико)» (разработки ИАиЭ СО РАН) и оптический профилометр с конфокальной головкой Sensofar S Neox. Созданные программно-аппаратные комплексы позволяют упростить и ускорить контроль качества изделий и автоматизировать процесс определения оптимальных режимов лазерной микрообработки как в производственных условиях (особенно при широкой номенклатуре изделий), так и при проведении исследований и разработке новых технологий лазерной обработки материалов. С их помощью автоматизирован процесс изготовления сеток и других изделий на предприятии АО «Швабе-Оборона и Защита» - г. Новосибирск, что подтверждается актом о внедрении, выполнены заказы по отработке технологии и изготовлению прецизионных сеток для ОАО «Красногорский завод им С.А. Зверева» – г. Красногорск. Результаты работы использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в интеграционных проектах СО РАН №41, №138, в исследованиях по программе РАН № П.8.2. «Фундаментальные проблемы взаимодействия излучения с веществом», в рамках проекта «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).

### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались на конференциях: 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 г.), СибОптика (Новосибирск, 2014 г.), Laser Optics (Санкт-Петербург, 2014 г.), Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Тюмень, 2014 г.), Advanced Laser Technologies (Касис, Франция, 2014 г.) и на научном симпозиуме Taiwan-Russia Bilateral Symposium on Material Processing at Micro and Nano Level (Новосибирск, 2013 г.).

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Метод измерения размеров объектов, формируемых в процессе векторной лазерной микрообработки, основанный на совмещении изображений зоны лазерной обработки с САД-моделью и поточечном выделении контуров объектов в поперечном направлении к каждому вектору САД-модели, имеет максимальную погрешность, не превышающую 10%, при ширине объектов менее 50 мкм, разрешении системы технического зрения ~1 мкм и отношении сигнал-шум изображений не менее 5.
2. Метод совмещения САД-модели с изображением поверхности, обработанной лазерным излучением, основанный на алгоритме Ciratefi и итеративном поиске максимума, при отношении сигнал-шум измерений не менее 3,3 имеет погрешности совмещения не хуже, чем у алгоритма полного перебора, при быстродействии на порядок выше.
3. По результатам применения созданных алгоритмов сопоставления и выделения границ могут быть получены математические модели зависимости показателей качества изделий от технологических режимов

микрообработки, обеспечивающие хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных (средняя ошибка аппроксимации менее 10%).

4. При проведении высокоскоростной (50 кГц) фемтосекундной лазерной (1026 нм, 232 фс) микрообработки стекла ВК7 оптимальным диапазоном технологических параметров по критериям качества границ и минимальной шероховатости дна является: 0,91-2,27 мкДж энергия импульсов, 50-62% перекрытие импульсов, количество слоёв по глубине – больше трёх.

### **Личный вклад автора**

Автором разработаны алгоритмы и программные средства для анализа изображений и профилограмм поверхности, обработанной лазерным излучением, предложены математические модели для получения искусственных изображений зон 2,5D и 3D лазерной микрообработки, на которых проведено тестирование. Исследована применимость оптических методов для измерения профиля поверхности, модифицированной лазерным излучением, реализованы программные средства для управления измерительными системами, проанализирована эффективность методов определения оптимальных режимов лазерной микрообработки, проведено тестирование комплекса программ на изделиях оптико-механической промышленности, полученных методом фемтосекундной лазерной записи, подготовлены статьи к публикации.

### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 19 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензированных изданиях (А4, А5, А14, А17), входящих в перечень ВАК, получены два свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ (А13, А19).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка цитируемой литературы, а также списка обозначений и сокращений. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, иллюстрирована 66 рисунками, содержит 19 таблиц, и список литературы из 183 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** описывается область применения технологий лазерного микро формообразования, рассмотрена проблема получения изделий с высокими показателями качества и определения оптимальных режимов лазерной микрообработки. Определены цель и задачи работы, приведены основанные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер. В **разделе 1.1.** приведены основные уравнения, описывающие поглощение и распространение лазерного излучения в веществе [7]. Рассмотрено применение метода математического моделирования для оценки размеров структур, формируемых в процессе лазерной микрообработки. В результате анализа литературы ([8][9] и др.) установлено, что методы математического моделирования эффективны только в узком диапазоне значений технологических параметров. Автором в сотрудничестве с Шоевым С.А. дополнительно исследована эффективность применения тепловой модели [10] для оценки влияния параметров обработки на глубину и ширину микроканалов, формируемых на поверхности металлов (алюминий и сталь) с помощью Nd:YAG лазера ( $\lambda = 1,064$  мкм,  $\tau = 10$  нс, размер пятна 10 мкм, частота импульсов 10 кГц) [11]. Установлено, что отклонение модельных расчётов от экспериментальных данных меньше 15% только при энергиях импульсов 50-100 мкДж и перекрытии импульсов 30-70%. Таким образом, показано, что в настоящее время методы математического моделирования не позволяют полностью решить проблему определения оптимальных режимов обработки, что объясняется зависимостью протекающих процессов более чем от двух десятков параметров лазерной системы и свойств материала, которые являются нестационарными, зависят от температуры, давления, и.т.д.

В **разделе 1.2** описаны методы прямой лазерной микро- модификации поверхности: 2D, 2,5D и 3D растровая и векторная микрообработка – которым уделено основное внимание в работе. В **разделе 1.3** рассмотрены проблемы измерения объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки, и определения их показателей качества. На рис. 1 приведена векторная CAD-модель обработки (рис. 1 (1)) и структуры, сформированные на различных металлических подложках (2-4) наносекундным лазерным излучением. Экспериментально установлено, что при измерении типичных объектов с

разрешением ~1 мкм, объемы данных могут превышать 1 Гбайт, изображения характеризуются неоднородным фоном (различие текстуры, яркости, наличие дефектов), а объекты – внутриклассовой изменчивостью структурных элементов (различие по ширине, профилю, соединению элементов, и.т.д.).

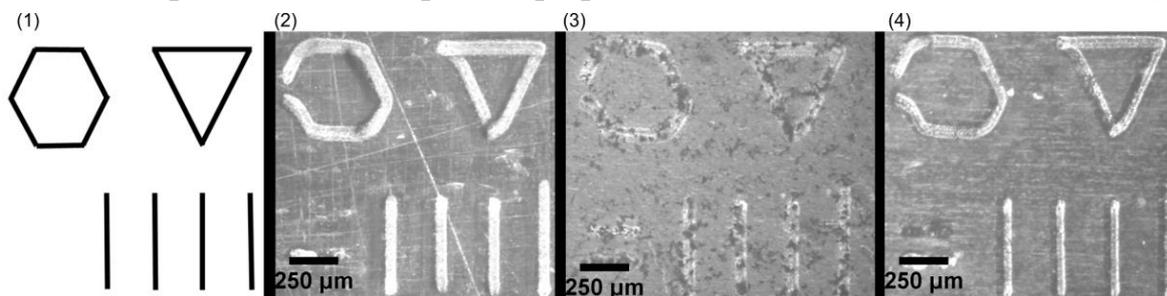


Рис. 1 Изображения микроканалов на металлических подложках, полученные в отраженном свете на Leica IM RDB. (1) – CAD-модель и изображения структур на подложках латуни (2), алюминия (3) и стали (4).

Профилограммы, обработанной лазерным излучением поверхности, также характеризуются большими объемами, наличием шумов и ошибок измерений, связанных с ограничениями динамического диапазона и чувствительности измерительного оборудования. При этом профиль объектов может отличаться от заданного в CAD-модели более чем на 30% по глубине и на 5% по ширине во всей зоне обработки и дополнительно иметь локальные дефекты, т.е. связанные области с площадью более 100 мкм<sup>2</sup> и отличием по глубине более чем на 10% от средней глубины слоя, возникновение которых связано как с ошибками обработки, так и неоднородностью обрабатываемого материала. Далее профилограммы мы называем «картами высот», т.е. изображениями, в которых яркость (цвет) точки определяет её глубину. Показано, что стандартные программные решения и методы, применяемые для контроля качества в оптическом, механическом производстве и микроэлектронике, не удовлетворяют современным требованиям по точности и быстродействию, предъявляемым к лазерным технологиям микрообработки.

В разделе 1.4 рассмотрены экспериментальные методы определения оптимальных режимов лазерной микрообработки с помощью планирования экспериментов, регрессионного анализа, искусственных нейронных сетей, эволюционного программирования и экспертных систем ([12][13] и др.). Экспериментальный подход позволяет получать модели зависимостей показателей качества обработки (размеров объектов, средней шероховатости, производительности и др.) от технологических параметров микрообработки со

средней ошибкой аппроксимации на тестовых данных, не превышающей 10%, и определять по ним оптимальные технологические режимы для микро- и наносекундной лазерной микрообработки металлов, сплавов и диэлектриков. Однако, подход характеризуется высокой трудоёмкостью, вследствие необходимости измерения и анализа данных большой серии тестовых объектов, поэтому в публикациях обычно исследуется зависимость только 1–2 показателей качества изделий от небольшого числа технологических параметров (3–4).

Таким образом, несмотря на большой опыт, накопленный за время применения лазерных технологий для обработки материалов, и обширные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, математическое моделирование не всегда позволяет точно оценить влияние технологических параметров обработки на размеры и показатели качества изделий. Проведенное исследование показало, что в настоящий момент наиболее подходящим методом определения оптимальных режимов лазерной микрообработки является экспериментальный подход на основе статистических методов анализа экспериментальных данных. Данный подход позволяет получать модели со средней ошибкой на тестовых данных, не превышающей 10%, и определять по ним оптимальные режимы обработки, однако в настоящее время неизвестно, возможно ли его использовать для определения оптимальных параметров при их большом числе и большом числе показателей качества изделия (больше четырех).

**Во второй главе** показано, что известные методы цифровой обработки изображений не позволяют получить достоверные данные о размерах объектов, формируемых в процессе 2D и 2,5D лазерной микрообработки, по изображениям зоны обработки, получаемым с помощью системы технического зрения. Представлен новый алгоритм, позволяющий выделять границы объектов и определять показатели качества обработки.

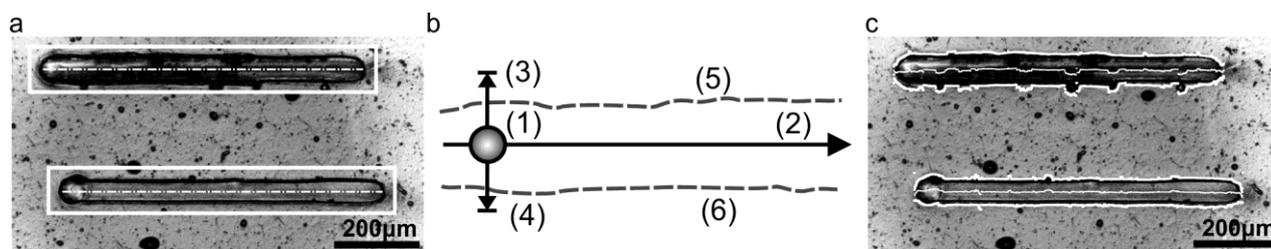


Рис. 2 Принцип работы алгоритма. Для изображений структур производится совмещение с CAD-моделью (а). После чего (b) для каждого вектора CAD-модели (2) последовательно и поточечно проводится поиск точек границ в направлениях (3)-(4); (c) показывает результат работы алгоритма.

На первом этапе производится совмещение изображения с CAD-моделью обработки, что может быть проведено посредством калибровки СТЗ при встраивании её в систему лазерной микрообработки (т.е. задание относительного поворота и смещения систем координат двух устройств посредством измерения тестового объекта, сформированного на установке), либо при использовании алгоритмов совмещения. Далее, зная характерную ширину структурного элемента, каждому вектору CAD-модели можно поставить в соответствие прямоугольную область на изображении, которую мы называем «зоной интереса» структурного элемента (рис. 2а). Поиск точек границ проводится в зоне интереса структурного элемента поточечно в поперечном направлении к соответствующему вектору CAD-модели. Схема работы алгоритма приведена на рис. 2b: при поиске границ (5)-(6) структурного элемента точка (1) перемещается по направлению вектора CAD-модели (2) в пределах зоны интереса структурного элемента, её положение задаётся индексом  $i$ . Детектирование границ проводится в поперечном направлении структурного элемента (3)-(4). Экспериментально установлено, что для характерных изображений наиболее подходящим критерием является максимальный градиент яркости в направлении (3)-(4). Для определения точек границ (5)(6) вычисляется взаимная корреляция поперечного профиля яркости структурного элемента (в направлениях (3)-(4)) с одномерным детектором границ с маской:  $(1;1;0;-1;-1)$ . Границами называются точки  $(x_i^1, y_i^1)$  и  $(x_i^2, y_i^2)$ , в которых значение корреляции максимально (рис. 2c). Размеры структуры: ширина ( $w$ ) и отклонение ширины от прямолинейности ( $\sigma_w$ ) вычисляются по формуле (1).

$$w_i = \sqrt{(x_i^1 - x_i^2)^2 + (y_i^1 - y_i^2)^2}, w = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N}, \sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - w)^2}{N}}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество точек  $i$ , для которых производился поиск границ,  $w_i$  – расстояние между точками с индексом  $i$ . Далее в главе приведено тестирование разработанного алгоритма на модельных и экспериментальных данных. Разработан метод получения искусственных изображений структурных элементов с границами сложной формы при различном отношении сигнал-шум. На модельных данных, показано, что максимальная погрешность определения ширины не превышает 1% при отношении сигнал-шум изображений не хуже 5 и ширине объектов менее 100 пикселей. На экспериментальных данных, полученных с помощью системы аналогичной [14], показано, что при разрешении системы технического зрения  $\sim 1$  мкм, ширине объектов менее 50 мкм средняя погрешность измерений не превышает 10%, а время обработки данных – 1 минуты для площади 10 мм<sup>2</sup>.

**Третья глава** посвящена исследованию и разработке алгоритмов для контроля качества 3D лазерной микрообработки по данным измерений обработанной поверхности на оптическом профилометре. В **разделе 3.1** в результате экспериментального тестирования оптических методов измерения на объектах, формируемых в процессе 3D лазерного формообразования, установлено, что сканирующая лазерная конфокальная микроскопия является наиболее подходящим методом измерения трехмерных объектов с размерами до сотен миллиметров и структурными элементами в диапазоне от десятых 0,1 до 10 микрометров, т.к. обеспечивает высокое разрешение (до 100 нм), быстродействие (до 10<sup>6</sup> точек в секунду) и позволяет измерять объекты с углом наклона стенок выше 70°. В **разделах 3.2 и 3.3** исследована проблема совмещения карт высот САД-модели и обработанной поверхности. При этом считается, что задача совмещения имеет три степени свободы: смещение XY и угол поворота в плоскости XY. Совмещение необходимо осуществлять посредством поиска соответствия либо между фрагментами, либо между характерными точками изображений, т.к. специальные метки не всегда могут быть добавлены на поверхность материала. Вследствие рассмотренных в разделе 1.3 проблем при контроле качества лазерной обработки алгоритм совмещения должен быть устойчив к следующим особенностям: различию по

яркости и контрасту карт высот, наличие ошибок измерений и локальных дефектов – связанных областей и контуров на карте высот обработанной поверхности. Разрабатываемые программно-алгоритмические средства должны обеспечивать совмещение карт высот САД-модели и обработанной поверхности с разрешениями 1-10 МПксл с погрешностью не более 1 пикселя за время 1 мин., что позволит измерять объекты за время сравнимое со временем их формирования.

В качестве меры близости изображений использована нормализованная взаимная корреляционная функция (2), так как она устойчива к рассогласованию изображений по яркости и контрасту.

$$R(v, w) = \frac{v'w'}{\|v'\| \|w'\|}, \quad (2)$$

где  $v, w$  – векторы данных,  $v' = v - \mu_v$ ,  $w' = w - \mu_w$ ,  $\mu_v$  и  $\mu_w$  – соответственно средние значения  $v$  и  $w$ ;  $\|\cdot\|$  – модули (длины) векторов.

В результате создан алгоритм на основе алгоритма *Ciratefi* (Circular, Radial and Template Matching Filter) [15] и итеративного поиска максимума. В оригинальной публикации алгоритм *Ciratefi* использован для поиска шаблона на изображении. В алгоритме *Ciratefi* для каждой точки возможного совмещения определяется угол «наиболее вероятного поворота»  $\alpha(x, y)$  с помощью вычисления нормализованной корреляции по радиальным линиям (формула (2)), построенным для модели и для каждой точки изображения высокого разрешения. Далее для всех точек  $(x, y)$  вычисляется нормализованная взаимная корреляция карты высот САД-модели и обработанной поверхности по формуле (2) только при  $\alpha(x, y)$ . Таким образом, ускорение алгоритма *Ciratefi* по сравнению с алгоритмом полного перебора достигается за счёт того, что корреляция в каждой точке  $(x, y)$  вычисляется только для угла  $\alpha(x, y)$ , а не для всего диапазона возможных поворотов.

Предложено использовать алгоритм *Ciratefi* для совмещения изображений высокого разрешения, при этом мы улучшили его быстродействие с помощью итеративного поиска максимума на основе пирамиды изображений. Пирамидой изображений называется последовательность изображений, в которой каждое последующее изображение получается из предыдущего путем его фильтрации и удаления

каждого второго отчёта. В разработанном алгоритме для карт высот CAD-модели и поверхности строится пирамида изображений, затем, последовательно начиная с изображения самого низкого разрешения, осуществляется поиск параметров рассогласования по алгоритму *Ciratefi*. На каждом шаге вокруг максимума определяется зона интереса  $\{H\}$  (например,  $20 \times 20$  пикселей), в которой проводится поиск параметров для следующего изображения в пирамиде, и.т.д. Параметры рассогласования, найденные для изображений наивысшего разрешения, являются искомыми. Использование пирамиды изображений при обработке и совмещении изображений является известным подходом, однако ранее он не применялся в комбинации с алгоритмом *Ciratefi* для совмещения зашумленных изображений при наличии искажений. Показано, что для изображений с разрешениями выше 1 МПксл вычислительная сложность разработанного алгоритма по крайней мере на порядок ниже, чем у алгоритма *Ciratefi* и алгоритма полного перебора.

Проведено тестирование алгоритма, как с помощью вычислительного эксперимента, так и на данных тестовых экспериментов. Разработан метод математического моделирования, позволяющий получать искусственные изображения поверхности, обработанной лазерным излучением, по CAD-модели обработки, учитывающий особенности лазерного формообразования: дефокусировку излучения, отклонение толщины слоя, заданной в CAD-модели, от удаляемой лазерным пучком, образование локальных дефектов. В результате анализа большого количества статистических данных (более 1000 изображений) установлено, что при отношении сигнал-шум не ниже 3,3, при размытии изображения не более 10, а также при наличии локальных дефектов различной формы, количество которых не превышает 100, а размеры  $64 \times 64$  точек, разработанный алгоритм обеспечивает совмещение с максимальной погрешностью, не превышающей 1 градус и 1 пиксел. На экспериментальных данных получено, что алгоритм обеспечивает ту же точность совмещения, что и алгоритмы полного перебора и *Ciratefi*, при этом его быстродействие на порядок выше. Реализованы программно-алгоритмические средства для определения зависимости средней глубины и средней шероховатости обработанной поверхности от заданной в CAD-модели глубины ( $h_{set}$ ). Созданные средства также позволяют находить дефекты обработки –

связанные области с площадью более  $100 \text{ мкм}^2$  и отклонением по высоте от  $h_{set}$  больше 10%.

В четвертой главе описан разработанный комплекс программ «MarkInspector» и «Profilometer», показано его применение для контроля качества сеток и микроканалов, формируемых методом прямой лазерной записи фемтосекундным лазерным излучением, на поверхности стекла. В разделе 4.1 описано программное обеспечение (ПО) MarkInspector, которое обеспечивает анализ данных с помощью алгоритмов, рассмотренных в главах 2, 3, и ПО Profilometer, которое осуществляет управление измерительными системами и включает MarkInspector.

В разделе 4.2 на примере контроля качества микроканалов и биочипов (см. рис. 3), формируемых на поверхности стекла фемтосекундным лазерным излучением, показана эффективность разработанных программно-алгоритмических средств. По САД-модели обработки генерируется изображение карты высот, которая совмещается с картой высот обработанной поверхности (рис. 3а) с помощью алгоритма, предложенного в главе 3, далее с помощью алгоритма, рассмотренного в главе 2, производится выделение границ структурных элементов (рис. 3б,с,д) и определение показателей качества изделия. В главе рассмотрено также применение созданных средств для контроля качества прецизионных сеток, изготовленных по заказам АО «Швабе-Оборона и Защита» и ОАО «Красногорский завод им С.А. Зверева».

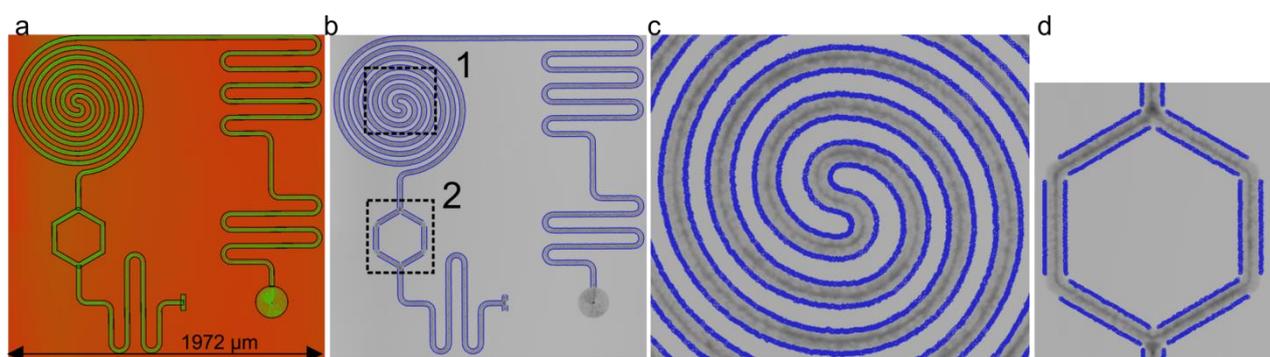


Рис. 3 Автоматический контроль качества фс лазерной записи микроканалов с помощью последовательного применения разработанных алгоритмов. а) – совмещение карты высот обработанной поверхности с САД-моделью; б) – выделение границ структуры; с), д) – увеличенные области.

Применение разработанных алгоритмов для определения оптимальных режимов фемтосекундной (фс) лазерной микрообработки рассмотрено в

**разделе 4.3.** В настоящее время математическое моделирование процессов, протекающих при фс лазерной записи, не позволяет рассчитать оптимальные параметры при обработке хрупких материалов, например, стекла, поэтому для определения оптимальных режимов использован экспериментальный подход (см. раздел 1.4). Согласно нашим данным, он до сих пор не применялся для определения оптимальных параметров высокоскоростной (частота импульсов  $f > 10$  кГц) фемтосекундной лазерной микрообработки стекла. Проведено исследование влияния энергии импульсов, перекрытия импульсов и количества проходов на показатели качества и размеры микроканалов, формируемых на поверхности стекла ВК7 фемтосекундными лазерными импульсами ( $\lambda = 1026$  нм,  $\tau = 232$  фс, размер пятна фокусировки 5 мкм,  $f = 50$  кГц). Сформировано 390 тестовых объектов прямоугольной формы при энергии импульсов в диапазоне (0,23 – 3,64 мкДж), перекрытии импульсов (50-68%) и количестве слоёв по глубине (1-4). По профилограммам поверхности с помощью ПО «Profilometer» определены ширина, глубина, прямолинейность границ и объем удаленного вещества. По результатам измерений объектов в 126 экспериментах установлены коэффициенты для регрессионных моделей (M1, M2):

$$M_1 : \begin{cases} d = a_{00} + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j, \\ i, j \in [0 - 2] \end{cases} \quad M_2 : \begin{cases} d = \sum b_{ijk} O^i E^j N^k, \\ i, j, k \in [0 - 2] \end{cases} \quad (3)$$

где  $a, b$  – коэффициенты,  $x_i$  – технологические параметры: перекрытие импульсов ( $O$ ), энергия импульсов ( $E$ ) и количество проходов ( $N$ ),  $d$  – глубина микроканалов. По данным оставшихся 264 экспериментов и дополнительных экспериментов, записанных по сложным CAD-моделям, показано, что средняя ошибка аппроксимации моделей M1, M2 для объектов с шириной более 30 мкм и с глубиной 1-30 мкм не превышает 10%. Установлены оптимальные режимы микрообработки по критериям качества границ, шероховатости дна и производительности. Показано применение полученных результатов для получения микроканалов и биочипов с высокими показателями качества: минимальными размерами сколов, шероховатостью дна менее 0,3 мкм – при производительности более 0,3 мм<sup>3</sup>/мин.

**Заключение** содержит формулировку результатов данной работы.

## Основные результаты

1. Разработан метод анализа изображений зоны 2D, 2,5D векторной лазерной микрообработки, позволяющий по завершению лазерной обработки определить и сравнить геометрические параметры объектов с заданными значениями, посредством совмещения с CAD-моделью и выделения контуров объектов в поперечном направлении к каждому вектору CAD-модели. Максимальная погрешность не превышает 10% при ширине объектов менее 50 мкм, разрешении системы технического зрения ~1 мкм и отношении сигнал-шум изображений не менее 5.
2. Создан алгоритм для сопоставления карт высот CAD-модели и профилограммы поверхности, обработанной лазерным излучением, в условиях наличия шума и технологических дефектов микрообработки. Алгоритм основан на алгоритме Ciratefi и итеративном поиске максимума. Установлено, что при отношении сигнал-шум измерений не менее 3,3 погрешности совмещения карт высот не хуже, чем у алгоритма полного перебора, при этом быстродействие на порядок выше. Применение алгоритма позволяет определить показатели качества изделий (отклонения размеров, шероховатость дна, наличие локальных дефектов), формируемых в процессе 3D лазерной микрообработки.
3. Показана возможность оптимизации режимов высокоскоростной фемтосекундной лазерной микрообработки стекла с помощью разработанных алгоритмов и регрессионного анализа данных. Полученная по тестовым данным регрессионная модель позволила существенно ускорить процесс определения режимов лазерной микрообработки стекла BK7 для получения микроканалов с глубиной в диапазоне 1-30 мкм и имеет среднюю погрешность, не превышающую 10%. Установлены режимы обработки стекла BK7, обеспечивающие высокие показатели качества изделий (шероховатость дна менее 0,5 мкм, минимальные сколы) при высокой производительности обработки (более 0,3 мм<sup>3</sup>/мин).
4. Разработанные программно-алгоритмические средства «MarkInspector» и «Profilometer» успешно использованы для контроля качества и определения оптимальных режимов прецизионной фемтосекундной лазерной микро-

модификации стекла при выполнении работ по заказам АО «Швабе-Оборона и Защита» и ОАО «Красногорского завода им С.А. Зверева».

## **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

- A1. Bessmeltsev V., Bulushev E., Goloshevsky N. Adaptive control system for laser micromachining devices // Proc. SPIE / ed. Veiko V.C., Vartanyan T.A. Спб., 2010. Т. 7996. С. 79960С – 79960С – 9.
- A2. Bessmeltsev V.C., Bulushev E.D., Goloshevsky N.V. Methods for Localization of Structures on Substrates Micromachined by a Laser Beam // Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA). Спб., 2010. Т. 2. С. 75–79.
- A3. Goloshevsky N., Bessmeltsev V., Bulushev E. Adaptive control system for laser micromachining devices // Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN). Спб., 2010. С. 85.
- A4. 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.
- A5. Bessmeltsev V.C., 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.
- A6. Булушев Е.Д. Использование структурного освещения для автоматической фокусировки и восстановления 3д изображений объектов с различными оптическими свойствами поверхности. // Фотоника и Оптические технологии 2012. Новосибирск, 2012. С. 6–7.
- A7. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Применение структурного освещения для восстановления топографии объектов с различными оптическими свойствами поверхности // Лазеры. Измерения. Информация. Спб., 2012. С. 70.
- A8. Булушев Е.Д., Бессмельцев В.П. Метод контроля геометрии 3D структур, сформированных в процессе лазерной микрообработки // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине. Новосибирск, 2013. С. 30–34.
- A9. Bessmeltsev V., Bulushev E. Optimization of 3D micro laser processing parameters based on automated inspections of structures // Taiwan-Russia Bilateral Symposium on Material Processing at Micro and Nano Level. Новосибирск, 2013. С. 105–110.
- A10. Bessmeltsev V.C., Bulushev E.D. Investigation of efficiency of optical inspection techniques for measurement of structures formed by laser micromachining // Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN). Спб., 2013. С. 73.
- A11. Шоев С.А., Булушев Е.Д. Разработка программно-алгоритмических средств для технологической подготовки лазерной микрообработки ультракороткими импульсами // Фотоника и оптические технологии. Новосибирск, 2014. С. 44.

- A12. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Метод измерения микроканалов, сформированных фемтосекундным лазером на оптически прозрачных материалах // Сибоптика. Новосибирск, 2014. С. 135–139.
- A13. Булушев Е.Д. Программа для контроля качества лазерной микрообработки MarkInspector // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2014611773 от 14 апреля 2014 г. 2014.
- A14. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, № 2. С. 343–350.
- A15. Bessmelsev V.C., Bulushev E.D., Dostovalov A.V. Optical inspection of microchannels formed by femtosecond laser on glass // Laser Optics. Спб., 2014. С. 1.
- A16. Bessmeltsev V., Bulushev E., Dostovalov A. Crack-free fabrication of microchannels by femtosecond laser on a glass surface // Advanced laser technologies. Casis, France, 2014. С. 18.
- A17. Бессмельцев В. П., Булушев Е.Д. Оптимизация режимов лазерной микрообработки // Автометрия. 2014. Т. 50, № 6. С. 3–21.
- A18. Шоев С.А., Булушев Е.Д. Разработка программных средств для моделирования процесса лазерной 3D микрообработки // XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Тюмень, 2014. С. 56.
- A19. Булушев Е.Д., Шоев С.А. Программа для контроля качества прецизионной лазерной микрообработки оптических элементов (формирования сеток, масок, шкал) Profilometer // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2015616114 от 29 мая 2015 г.

## **Список цитируемых работ**

1. Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
2. Orazi L. и др. An automated procedure for material removal rate prediction in laser surface micromanufacturing // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2009. Т. 46, № 1. С. 163–171.
3. Soveja A. и др. Optimization of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach // Opt. Lasers Eng. 2008. Т. 46, № 9. С. 671–678.
4. Desai C.K., Shaikh A. Prediction of depth of cut for single-pass laser micro-milling process using semi-analytical, ANN and GP approaches // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2011. Т. 60, № 9-12. С. 865–882.
5. Ciurana J., Arias G., Ozel T. Neural Network Modeling and Particle Swarm Optimization (PSO) of Process Parameters in Pulsed Laser Micromachining of Hardened AISI H13 Steel // Mater. Manuf. Process. 2009. Т. 24, № 3. С. 358–368.
6. Dhara S.K., Kuar a. S., Mitra S. An artificial neural network approach on parametric optimization of laser micro-machining of die-steel // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2007. Т.

- 39, № 1-2. С. 39–46.
7. Вейко В.П. и др. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / под ред. В.И. Конова. М.: Физматлит, 2008. 312 с.
  8. Ren D., Narayan R.J., Lee Y. Machined Surface Error Analysis for Laser Micromachining of Biocompatible Polymers // *Comput. Aided. Des. Appl.* 2009. Т. 6, № 6. С. 781–793.
  9. Stournaras A. и др. Theoretical and experimental investigation of pulsed laser grooving process // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2009. Т. 44, № 1-2. С. 114–124.
  10. Dobrev T., Dimov S.S., Thomas A.J. Laser milling: modelling crater and surface formation // *J. Mech. Eng. Sci.* 2006. Т. 220. С. 1685–1696.
  11. Шоев С.А., Булушев Е.Д. Разработка программных средств для моделирования процесса лазерной 3D микрообработки // XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Тюмень, 2014. С. 56.
  12. Teixidor D. и др. Optimization of process parameters for pulsed laser milling of micro-channels on AISI H13 tool steel // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2013. Т. 29, № 1. С. 209–218.
  13. Campanelli S.L., Casalino G., Contuzzi N. Multi-objective optimization of laser milling of 5754 aluminum alloy // *Opt. Laser Technol.* Elsevier, 2013. Т. 52. С. 48–56.
  14. Бессмельцев В.П., Голошевский Н., Смирнов К.. Аппаратно-программные средства динамической коррекции для управления лазерными системами микрообработки на основе комплементарных сканеров // *Вестник компьютерных и информационных технологий.* 2009. Т. 3. С. 48.
  15. Araújo S.A., Kim H.Y. Grayscale template-matching invariant to rotation, scale, translation, brightness and contrast // *Advances in Image and Video Technology.* 2007. Т. 4872. С. 100–113.