

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР А. М. ШАЛАГИН

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: Ю. Н. ЗОЛОТУХИН,
В. К. МАЛИНОВСКИЙ

Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. Л. АСЕЕВ	Сибирское отделение РАН
И. В. БЫЧКОВ	Институт динамики систем и теории управления СО РАН
С. Н. ВАСИЛЬЕВ	Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН
Ю. И. ЖУРАВЛЕВ	Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН
В. С. КИРИЧУК	Институт автоматизации и электрометрии СО РАН
Г. Н. КУЛИПАНОВ	Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Ю. Н. КУЛЬЧИН	Дальневосточное отделение РАН
Г. Г. МАТВИЕНКО	Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН
Е. С. НЕЖЕВЕНКО	Институт автоматизации и электрометрии СО РАН
О. И. ПОТАТУРКИН	Институт автоматизации и электрометрии СО РАН
В. А. СОЙФЕР	Институт систем обработки изображений РАН
А. А. СПЕКТОР	Новосибирский государственный технический университет
Ю. В. ЧУГУЙ	Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН
В. Ф. ШАБАНОВ	Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН
Ю. И. ШОКИН	Институт вычислительных технологий СО РАН

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

Сибирское отделение РАН,
Институт автоматизации и электрометрии СО РАН

Заведующая редакцией Р. П. ШВЕЦ

Сдано в набор 1.10.2014. Подписано в печать 25.11.2014. Формат (60 × 84) 1/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 13,95. Усл. кр.-отт. 11,2. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 148 экз. Свободная цена. Заказ № 276.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания
и средств массовых коммуникаций 31.05.2002.

Свидетельство ПИ № 77-12809

Адрес редакции: Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
просп. Академика Коптюга, 1, Новосибирск 630090,
тел. 8 (383) 330-79-38, E-mail: automr@iae.nsk.su
<http://sibran.ru>

Издательство СО РАН, Морской просп., 2, Новосибирск 630090.
Отпечатано на полиграфическом участке Издательства СО РАН

© Сибирское отделение РАН,
Институт автоматизации и
электрометрии СО РАН, 2014

А В Т О М Е Т Р И Я

ОСНОВАН В ЯНВАРЕ 1965 ГОДА

ВЫХОДИТ 6 РАЗ В ГОД

Том 50

2014

№ 6

НОЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д. Оптимизация режимов лазерной микрообработки (обзор).	3
Ковалев А. М. О дисплеях персонального пользования для виртуальных сред с добавленной реальностью.	22

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

Малиновский В. К. Нанонеоднородности в стёклах и релаксорах: как, когда и почему они возникают? (Обзор)	30
---	----

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Соболев В. С., Тимохин С. А. Максимально правдоподобные оценки параметров сигналов лазерных доплеровских систем (обзор)	42
Киричук В. С., Шакенов А. К. Двухпороговый алгоритм обнаружения точечных объектов по стереоизображениям	55
Резник А. Л., Ефимов В. М., Соловьев А. А., Торгов А. В. О надёжности считывания случайных точечных объектов при ограниченном числе пороговых уровней сканирующей апертуры	61
Воскобойников Ю. Е. Оптимизация алгоритмов вейвлет-фильтрации с многопараметрическими пороговыми функциями	69
Мурасев А. А., Спектор А. А. Интерполяционное оценивание помехи в системе аэроэлектро-разведки полезных ископаемых	80
Вяткин С. И. Метод бинарного поиска элементов изображения функционально заданных объектов с применением графических акселераторов	89
Чочиа П. А. Сегментация изображений на основе анализа расстояний в пространстве признаков	97

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Асанов А. З., Демьянов Д. Н. Аналитический синтез функциональных наблюдателей для систем с сигнальными возмущениями	111
Белоусова О. Н., Зеркаль С. М. Численное исследование алгоритма выбора референтного скоростного распределения в задаче кинематической сейсмотомографии	120
Указатель статей, опубликованных в журнале «Автометрия» в 2014 году	128

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.7.01; 621.7.075; 519.24

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ
(ОБЗОР)*

В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: e.d.bulushev@gmail.com*

Тенденция к миниатюризации механических, электронных и оптических компонент повысила требования к технологиям двумерного и трёхмерного формообразования, в том числе и к лазерной микрообработке. Высокая производительность при строгом соблюдении технических условий по точности и качеству обрабатываемой поверхности достигается только при определённых режимах, которые называются оптимальными. Определение таких режимов с помощью методов математического моделирования является сложной задачей, поэтому в настоящее время создаются экспериментальные методы на основе статистических алгоритмов обработки данных. Рассмотрены особенности их применения.

Ключевые слова: лазерная микрообработка, планирование экспериментов, математическое моделирование, контроль качества, искусственные нейронные сети.

Введение. Лазерные технологии двумерного и трёхмерного микроформообразования нашли широкое применение в электронике, медицине, биологии и других областях для создания элементов микрооптики, микромеханики, прототипов печатных плат, биочипов, имплантатов, пресс-форм, при нанесении текстовых и графических изображений. Обработка заготовок осуществляется лазерным пучком, сфокусированным в пятно размером 0,5–10 мкм, по двумерным и трёхмерным CAD-моделям. Вычисление по CAD-модели 2D-траекторий движения лазерного пучка осуществляется с помощью автоматизированных систем технологической подготовки производства. В настоящее время значительно возросли требования к пространственному разрешению, точности, физико-химическим свойствам поверхности после обработки и производительности лазерного микроформообразования. Высокие показатели качества изделия достигаются только при определённых режимах обработки, называемых оптимальными.

Задание оптимальных режимов (оптимизация) на практике может занимать длительное время (вплоть до нескольких недель) вследствие зависимости показателей качества обработки от большого числа технологических параметров и отсутствия универсальных алгоритмических решений. Методы оптимизации базируются как на математическом моделировании процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом [1, 2], так и на построении статистических зависимостей показателей качества изделия от параметров обработки по результатам записи серии тестовых объектов. В представленной работе рассмотрены второй подход и его основные составляющие: проведение тестовых экспериментов, построение статистических зависимостей, измерение показателей качества изделий — и анализ полученных данных.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

Целью предлагаемого исследования являются анализ методов, используемых при оптимизации режимов двумерной и трёхмерной лазерной микрообработки, определение особенностей и ограничений их применения.

1. Моделирование взаимодействия лазерного излучения с веществом.

За 50 лет применения лазерного излучения для формообразования накоплен большой объём фактического материала, позволяющий во многих случаях получить информацию о влиянии технологических параметров обработки на показатели качества изделия. Приведём основные параметры, оказывающие влияние на процесс обработки [3]:

1) параметры лазера: выходная мощность, длина волны, поляризация излучения, режим непрерывный или импульсный, энергия импульса, длительность и форма импульсов, частота импульсов, расходимость и профиль интенсивности лазерного пучка;

2) технологические параметры: размер и форма сфокусированного пятна излучения, перекрытие световых пятен, сопутствующий газ, стратегия обхода областей сканирования, положение фокальной плоскости при обработке и глубина фокуса, скорость перемещения лазерного пучка, точность фокусировки, точность перемещения лазерного пучка и управления его выходной мощностью;

3) свойства материала:

а) оптические (коэффициенты отражения, поглощения и преломления);

б) термодинамические (теплоёмкость, теплопроводность, температура плавления и кипения, удельная теплота плавления и испарения, коэффициент термического расширения);

в) механические (размеры подложки, шероховатость поверхности, плотность, твёрдость, хрупкость, упругость).

В литературе подробно описаны процессы, протекающие при взаимодействии лазерного излучения с веществом, и модели для их расчётов [4–12]. В основном в моделях при расчётах распространения и локализации энергии лазерного излучения в материале применяются закон Бугера — Ламберта — Бера, описывающий поглощение лазерного излучения в веществе, и уравнение теплопроводности, задающее изменение температуры в веществе под воздействием лазерного излучения:

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \alpha \Delta T(r, t) + \frac{q(r, t)}{pc_p}, \quad (1)$$

где $T(r, t)$ — температура; $q(r, t)$ — плотность мощности объёмного теплового источника в точке $r(x, y, z)$ в момент времени t , зависящая от поглощательной способности материала и интенсивности лазерного пучка; $\Delta T(r, t)$ — лапласиан температуры; p — плотность; α — коэффициент температуропроводности; c_p — удельная теплоёмкость. Зная температуру, можно определить зону плавления и испарения вещества, а также форму образовавшегося кратера. Аналитически решить уравнение (1) возможно в редких случаях, например для непрерывного лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности при перемещении лазерного пучка с постоянной скоростью [13]. Сложность модели значительно возрастает при учёте фазовых переходов, химических реакций, давления насыщенных паров, образования плазмы. В большинстве случаев для решения уравнения теплопроводности применяются численные методы, а для расчётов используются специальные программные средства (например, ANSYS, FLUENT), кластеры и системы распределённых вычислений [14]. Кроме того, при взаимодействии лазерных импульсов с веществом необходимо учитывать, что изменение коэффициента поглощения в зависимости от температуры не всегда известно.

В работе [2] проведено моделирование влияния мощности лазерного излучения на форму микроканалов с помощью уравнения теплопроводности (1) и с учётом нагревания, плав-

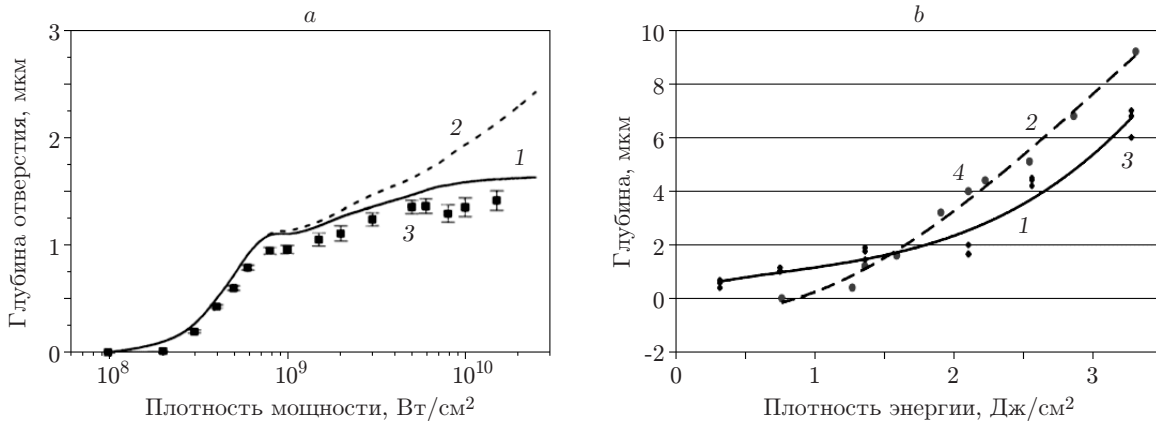


Рис. 1. Моделирование режимов обработки Nd:YAG-лазером: *a* — меди (кривая 1 — с коррекцией, 2 — без коррекции, 3 — экспериментальные результаты) [15]; *b* — нержавеющей стали (кривые 1, 2 — полиномиальные аппроксимации данных эксперимента и моделирования, 3 — глубина кратера, 4 — теоретическая глубина) [16]

ления и охлаждения вещества сопутствующим газом. Экспериментально показано, что модель применима только при средних мощностях лазерного излучения (10^4 – 10^7 Вт/см²), так как при высоких мощностях происходит испарение вещества и образование плазмы, что не рассматривается в модели. В [15] исследовалась обработка металлов лазерными импульсами большой интенсивности (10^7 – 10^{10} Вт/см²). Расчёт плавления, испарения вещества и образования плазмы производился численными методами с помощью уравнения (1). Модель адекватна только в узком диапазоне интенсивностей ($1,06$ – $1,8 \cdot 10^8$ Вт/см²), при значениях выше $5 \cdot 10^9$ Вт/см² происходит образование плазмы и экранирование излучения, что учитывается посредством добавления поправки, однако не указано, как устанавливается её величина (рис. 1, *a*). На основе уравнения (1) в [16] получена модель для расчёта формы кратера, образующегося в веществе под воздействием импульсного лазерного излучения. Рассматриваются следующие процессы: теплопроводность, нагревание, плавление, испарение. Утверждается, что модель применима при плотностях энергий выше $2,5$ Дж/см² (рис. 1, *b*). Однако, на наш взгляд, модель недостаточно описывает экспериментальные данные.

В приведённых работах экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными математического моделирования только в узком диапазоне значений параметров. Это объясняется тем, что основные термодинамические, термохимические и фотохимические процессы являются нелинейными и нестационарными, а свойства вещества (коэффициент поглощения, теплопроводность и др.) могут изменяться в процессе обработки, для получения их значений необходимо проводить дополнительные исследования (например, [8, 17]). Кроме того, некоторые эффекты сложно учесть при моделировании (в частности, образование микротрещин и сколов), так как соответствующий математический аппарат недостаточно разработан. Отклонение экспериментальных результатов от модели в некоторых случаях объясняется неоптимальным управлением компонентами системы лазерной микрообработки [18] (рис. 2), aberrациями оптической системы и т. д.

Учёт всех приведённых особенностей является сложной задачей. В [19] отмечается, что при обработке керамики Nd:YVO₄-лазером оптимальная производительность достигается не при минимальных, а при средних скоростях перемещения лазерного пучка. В [20] показано, что при обработке материалов большой твёрдости Nd:YAG-лазером (20–200 нс) при высоких частотах импульсов возможна обработка поликристаллического алмаза, но