



# МИР

## физики и техники

Е.Д. Вакс  
М.Н. Миленький  
Л.Г. Сапрыкин

Практика прецизионной  
лазерной обработки

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2013

УДК 621.7.075  
ББК 34.58  
В14

**В14 Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г.  
Практика прецизионной лазерной обработки  
Москва: Техносфера, 2013. — 696 с. + 12 с.цв.вклейки  
ISBN 978-5-94836-339-4**

Книга посвящена рассмотрению практики прецизионной лазерной обработки и основана на результатах авторских работ, полученных в ЭНИМС в период 1963—1993 гг. и в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» в период 1998—2012 гг., а также на анализе многочисленных работ отечественных и зарубежных исследователей, опубликованных в открытых источниках. В книге дано определение понятия лазерной прецизионной обработки и представлен обзор основных областей ее применений. Изучены закономерности лазерного сверления, резания, фрезерования и разделения материала импульсами лазерного излучения с длительностью от единиц миллисекунд до сотен фемтосекунд. Рассмотрены процессы формирования отверстия при лазерном сверлении во времени, влияние на форму отверстия частоты следования импульсов, экранирование излучения на продуктах абляции, образование полей термонапряжений в зоне обработки, приводящих к трещинообразованию. Проведена классификация процесса лазерного резания материалов, сформулированы и объяснены основные закономерности этого процесса. Приведены экспериментально установленные режимы оптимального резания различных материалов с использованием различных типов импульсных и непрерывных лазеров, позволяющие обеспечить требования, предъявляемые к прецизионной и высококачественной обработке. Рассмотрена и объяснена методика подбора таких режимов. Проанализировано, в каких случаях целесообразно использовать лазерное фрезерование и каким образом оно должно проводиться. Приведены практические примеры лазерного фрезерования.

Рассмотрены перспективы и возможности технологии разделения полупроводниковых и диэлектрических материалов за счет использования механизмов лазерного термораскалывания и формирования в материале внутренних зон разрушения.

В заключительном разделе книги приведены технические данные и особенности конструкции различных типов отечественных технологических установок для прецизионной обработки, которые разработаны и производятся НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ».

Книга рассчитана на специалистов научно-исследовательских, технологических и производственных подразделений промышленных предприятий, использующих лазерные технологии. Она будет полезной также для студентов и аспирантов, изучающих процессы лазерной обработки.

**УДК 621.7.075  
ББК 34.58**

© 2013, Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин  
© 2013, ЗАО «РИЦ «Техносфера», оригинал-макет, оформление

**ISBN 978-5-94836-339-4**

# СОДЕРЖАНИЕ

Вступление . . . . .	13
Введение . . . . .	16
Основные характеристики взаимодействия излучения с веществом . . . . .	16
Почему и для кого написана эта книга . . . . .	21
Литература . . . . .	23

## Часть 1. 50 лет динамичного развития

<b>Раздел 1. История развития лазерной прецизионной размерной обработки и современные области ее применения . . . . .</b>	<b>24</b>
1.1. Лазерное прецизионное сверление . . . . .	27
1.1.1. Сверление отверстий в изделиях из кристаллических материалов . . . . .	28
1.1.2. Сверление отверстий в металлах . . . . .	30
1.1.3. Развитие технологии прецизионного лазерного сверления	31
1.2. Лазерное прецизионное резание на начальном этапе . . . . .	38
1.3. Использование лазерного резания на современном этапе . . . . .	43
1.3.1. Мощные лазеры в технологии изготовления изделий из листовых металлов . . . . .	43
1.3.2. Лазерное прецизионное резание с использованием нано-, пико- и фемтосекундных импульсов. . . . .	50
1.3.3. Лазерные технологии, применяемые в микроэлектронике	65
1.4. Процессы прецизионной лазерной обработки в технологии изготовления солнечных панелей. . . . .	66
1.5. Лазерная подгонка и функциональная настройка компонентов и изделий электронной техники . . . . .	75
1.6. Лазерное прецизионное фрезерование на современном этапе . . . . .	79
Литература . . . . .	82

**Часть 2. Закономерности лазерного сверления и резания**

<b>Раздел 2. Поглощение лазерного излучения</b> . . . . .	86
2.1. Поглощение лазерного излучения металлами . . . . .	87
2.2. Поглощение лазерного излучения полупроводниками. . . . .	91
2.3. Взаимодействие импульсного излучения свободной генерации с диэлектриками, не имеющими собственного поглощения . . . . .	95
2.3.1. Начальный этап взаимодействия . . . . .	95
2.3.2. Образование и состав поглощающего слоя. . . . .	101
2.3.3. Пороговая плотность мощности . . . . .	108
2.3.4. Образование и состав поглощающего слоя в алмазе . . . . .	111
2.4. Поглощение излучения импульсов наносекундной длительности . . . . .	114
2.5. Поглощение излучения импульсов пико- и фемтосекундного диапазона длительности. . . . .	117
2.6. Взаимодействие лазерного излучения с полимерами . . . . .	122
Литература. . . . .	133
<b>Раздел 3. Лазерное сверление отверстий импульсным излучением свободной генерации</b> . . . . .	135
3.1. Закономерности формирования отверстий при лазерном сверлении . . . . .	136
3.1.1. Начальный этап формирования. . . . .	136
3.1.2. Средний этап формирования. . . . .	145
3.1.3. Конечный этап формирования . . . . .	157
3.2. Экранирование на факеле, образованном действием импульсного излучения . . . . .	166
3.3. О напряжениях, возникающих в зоне лазерного сверления от действия импульсов свободной генерации . . . . .	179
3.3.1. Экспериментальное исследование поля напряжений . . . . .	179
3.3.2. Теоретический анализ поля термонапряжений . . . . .	185
3.4. Влияние частоты повторения импульсов на формообразование отверстий. . . . .	200
Литература. . . . .	210

<b>Раздел 4. Сверление и резание ультракороткими импульсами . . . . .</b>	<b>212</b>
4.1. Формирование отверстий, обрабатываемых импульсами нано- и пикосекундной длительности . . . . .	212
4.2. Возможности обработки отверстий импульсами нано-, пико- и фемтосекундной длительности . . . . .	226
4.2.1. Особенности абляции, производимой импульсами наносекундной длительности . . . . .	227
4.2.2. Повышение эффективности и улучшения качества сверления импульсами наносекундной длительности . . . . .	241
4.3. Особенности абляции, производимой импульсами пико- и фемтосекундной длительности . . . . .	255
4.4. Зависимость производительности и качества сверления ультракороткими импульсами от процесса накопления тепла в зоне обработки . . . . .	260
4.5. Об области применения лазерной обработки ультракороткими импульсами . . . . .	266
4.6. Повышение эффективности и качества резания, производимого импульсами пикосекундной длительности . . . . .	275
Литература . . . . .	300
<b>Раздел 5. Лазерное резание . . . . .</b>	<b>302</b>
5.1. Модель лазерного резания . . . . .	305
5.2. Оценка эффективности продува зоны резания и возможности ее повышения . . . . .	314
5.2.1. Зависимость массы прошедшего через рез ассистирующего газа от структуры ударной волны . . . . .	318
5.2.2. Формирование ударной волны, приносимые ею изменения в поток ассистирующего газа на фронте резания . . . . .	323
5.3. Базовые закономерности процесса лазерного резания . . . . .	332
5.3.1. Резание на максимально возможную глубину . . . . .	332
5.3.2. Оптимизация ширины реза . . . . .	347
5.4. Скоростное резание металлов и кремния толщиной 0,1—0,5 мм . . . . .	370
5.5. Резание хрупких материалов толщиной 0,5—2 мм . . . . .	376
5.5.1. Заплавление реза . . . . .	376
5.5.2. Образование зон с повышенной вероятностью растрескивания . . . . .	380

5.6. Резание и скрайбирование на глубину от нескольких десятков нанометров и до 100 мкм. . . . .	387
5.7. Особенности резания алмаза . . . . .	390
Литература. . . . .	394

### **Часть 3. Практика лазерной прецизионной обработки**

<b>Раздел 6. Повышение точности и качества лазерной обработки отверстий . . . . .</b>	<b>397</b>
6.1. Модуляция на АОЗ — эффективный способ улучшения точности и качества лазерного сверления импульсами свободной генерации. . . . .	397
6.1.1. Выбор частоты модуляции. . . . .	399
6.1.2. Изменения пространственного распределения илучения. . . . .	403
6.2. Проекционный способ локализации излучения. . . . .	405
6.2.1. Принцип работы проекционной оптической схемы . . . . .	405
6.2.2. Изменения формообразования отверстий при использовании проекционной схемы . . . . .	409
6.2.3. Световая трубка . . . . .	411
6.3. Оптические методы повышения точности и качества лазерной обработки . . . . .	412
6.3.1. Оптический модуль трансформации гауссового пространственного распределения интенсивности излучения в равномерное. . . . .	412
6.3.2. Оптические методы перемещения излучения в зоне обработки. . . . .	415
6.4. Модуль «Струя воды — оптическая трубка» . . . . .	424
6.5. Защитные покрытия . . . . .	428
6.6. Механическая калибровка и химическое травление. . . . .	432
Литература. . . . .	440
<b>Раздел 7. Лазерное фрезерование, термораскалывание и технология STEALTH DICING . . . . .</b>	<b>441</b>
7.1. Лазерное трепанирование отверстий большого диаметра. . . . .	441
7.2. Лазерное фрезерование поверхностей сложной формы . . . . .	451
7.2.1. Принцип проведения лазерного фрезерования. . . . .	451
7.2.2. Современные области применения лазерного фрезерования . . . . .	456

7.3. Комбинированный метод направленного термораскалывания полупроводников. . . . .	466
7.4. Технология STEALTH DICING в производстве изделий микроэлектроники. . . . .	473
7.4.1. Принцип технологии и ее преимущества . . . . .	473
7.4.2. Физические основы технологии. . . . .	474
7.4.3. Экспериментальные подтверждения преимуществ технологии . . . . .	482
7.4.4. Область применения технологии STEALTH DICING . . . .	489
Литература. . . . .	492
<b>Раздел 8. Некоторые аспекты практики лазерного резания в среде воздуха и нейтральных газов . . . . .</b>	<b>495</b>
8.1. Режимы и предельные толщины резания металлов в среде воздуха и нейтрального газа излучением многомодового волоконного лазера мощностью 1 кВт . . . . .	495
8.2. Режимы и предельные толщины резания металлов в среде воздуха и нейтрального газа излучением многомодового волоконного лазера мощностью 1,5 кВт . . . . .	514
8.3. Режимы и предельные толщины резания металлов в среде воздуха и нейтрального газа излучением многомодового волоконного лазера мощностью 2 кВт . . . . .	524
8.4. Осложнения, характерные для резания лазером, работающим в режиме непрерывного излучения. . . . .	537
8.4.1. Выплеск жидкой фазы на поверхность реза . . . . .	537
8.4.2. Влияние вибраций на качество боковой поверхности и метод его устранения . . . . .	540
8.5. Сравнение эффективности резания металлов волоконными и CO <sub>2</sub> -лазерами. . . . .	545
8.6. Резание материалов с использованием импульсного лазера на гранате . . . . .	555
8.7. Технологии разделения подложек из полупроводниковых и диэлектрических материалов. . . . .	564
Литература. . . . .	573

<b>Раздел 9. Особенности лазерного резания в среде кислорода</b> . . . . .	574
9.1. Преимущества, базовые понятия резания в среде кислорода и его основная проблема . . . . .	575
9.2. Возможно ли лазерно-кислородное резание без образования «ребер» на боковой поверхности реза? . . . . .	587
9.3. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением многомодового волоконного лазера мощностью 1 кВт . . . . .	596
9.4. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением многомодового волоконного лазера мощностью 1,5 кВт . . . . .	623
9.5. Резание конструкционной стали в среде кислорода излучением многомодового волоконного лазера мощностью 2 кВт . . . . .	632
Литература. . . . .	637

**Часть 4. Лазерные технологические установки для прецизионной обработки, производимые НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»**

<b>Раздел 10. Основные характеристики ЛТУ</b> . . . . .	640
10.1. ЛТУ с перемещением детали относительно сфокусированного лазерного пятна (серии МЛ1 и МЛП1). . . . .	642
10.2. ЛТУ со сканированием сфокусированного лазерного пятна (серия МЛ2 и МЛП2). . . . .	651
10.3. ЛТУ с порталными кинематическими системами (серия МЛ35 и МЛП35) . . . . .	656
10.4. Лазерные установки, предназначенные для подгонки резисторов (серия МЛ5) . . . . .	664
Литература. . . . .	672

**Приложения**

1. Символы, используемые в книге. . . . .	673
2. Таблица теплофизических констант . . . . .	676
3. Параметры лазерного излучения и его фокусировка . . . . .	677

## ВСТУПЛЕНИЕ

В 2012 г. исполнилось 50 лет с начала исследований по практическому применению лазеров для обработки материалов. За этот короткий в историческом масштабе период времени во всем мире лазерная техника шагнула от первых макетных и лабораторных изделий к массовому промышленному выпуску лазерных установок для многочисленных технологических применений во всех областях материального производства.

Значительный, а зачастую и решающий вклад в это развитие внесли работы отечественных ученых. У истоков многих направлений развития лазерной техники и ее применений находились основоположники квантовой электроники академики Н.Г. Басов и А.М. Прохоров, создавшие теорию усиления и генерации электромагнитного излучения квантовыми системами и уже в 60-х годах обосновавшие возможность разработки большинства типов современных лазеров и базовые принципы взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Всего за несколько лет с момента появления первых лазеров в стране была создана мощная научная школа, развившая теоретические основы квантовой электроники и обосновавшая многие стратегические направления разработки и использования лазеров в военной области и в народном хозяйстве.

Уже в 1962 г. были начаты первые исследования возможности использования лазеров для обработки различных материалов. Быстрое и успешное развитие данного направления во многом определялось трудами известных советских ученых.

Академиком Н.Н. Рыкалиным и д.ф.-м.н., профессором А.А. Угловым были разработаны основы теории тепловых процессов, протекающих в зоне лазерной обработки [1]. Д.ф.-м.н., профессор С.И. Анисимов уже к 1970 г. создал модель квазистационарной лазерной абляции металлов и базовые положения теории взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом [2]. Им разработана теория оптического пробоя диэлектриков, инициированного поглощением на микровключениях. А его двухтемпературная модель взаимодействия ультракоротких лазерных импульсов с металлами получила в последнее время широкую известность в связи с появлением фемтосекундных лазеров.

Д.ф.-м.н. М.Н. Либенсон первым исследовал процессы и описал физику взаимодействия лазерного излучения с веществом применительно к сверлению и резанию [3]. Д.т.н., профессор, директор НПО «Полюс» М.Ф. Стельмах был организатором как масштабных исследований в области различных направлений лазерной обработки, так и серийного производства лазерного технологического оборудования [4]. Сотрудники НПО «Полюс» А.А. Чельный и В.М. Вакуленко были одними из ведущих в стране разработчиков технологий и оборудования для различных применений лазерной обработки. Д.т.н, профессор В.П. Вейко один из первых начал разрабатывать теоретические аспекты лазерной микрообработки и в настоящее время продолжает исследовательскую и преподавательскую деятельность и является руководителем научной школы РФ «Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий» [5].

Широкую известность и мировое признание получили работы д.т.н., профессора В.С. Кондратенко в области разработки теории и практики лазерного термораскалывания хрупких материалов, диэлектриков и полупроводников [6].

В последнее десятилетие для прецизионной лазерной обработки широко используются волоконные лазеры, микрооптические формователи пучка («shapers») и диодные лазерные системы. Мировыми лидерами в разработке и производстве этих компонентов являются корпорация IPG с филиалами в США, Германии и России и фирма LIMO, основанные и возглавляемые нашими соотечественниками В.П. Гапонцевым и В.Н. Лисоченко.

Большой удачей авторов настоящей книги является то, что они много лет, участвуя в создании различных лазерных систем, имели возможность встречаться и обсуждать научные и инженерные проблемы лазерной обработки материалов и развития квантовой электроники с упомянутыми выше и другими выдающимися учеными — нашими соотечественниками, и могли по достоинству оценить их значительный вклад в развитие лазерной индустрии.

В настоящей книге авторами сделана попытка в систематизированном виде донести до современного читателя часть информации, накопленной несколькими поколениями исследователей и разработчиков только по одному из направлений практического применения лазеров, связанного с прецизионной лазерной обработкой. Книга основана на результатах авторских работ, полученных в ЭНИМС и в НПЦ «Лазеры

и аппаратура ТМ», и анализе результатов многочисленных работ, опубликованных в открытых источниках.

### **Сведения об авторах**

К.т.н. Е.Д. Вакс начал работать в области лазерных технологий с самого начала их зарождения. Будучи заведующим лабораторией лазерной обработки ЭНИМС, Е.Д. Вакс начиная с 1963 г., проводил экспериментальные исследования и разрабатывал теоретические аспекты теории лазерного сверления и резания материалов, широко используемых в промышленности. Под его руководством впервые в СССР были разработаны и внедрены в промышленное производство: технология и автоматизированные лазерные установки для сверления отверстий в часовых рубиновых камнях, технология и лазерные станки с программным управлением для резания изделий из керамик и фрезерования волок из природного и искусственного алмазов. В последние годы Е.Д. Вакс продолжает разработку новых направлений лазерной прецизионной обработки в технологической лаборатории НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ».

Один из создателей отечественной элементной базы квантовой электроники к.т.н. Л.Г. Сапрыкин работает в области квантовой электроники с 70-х годов. В конце 80-х и 90-х годах он был руководителем лазерного направления НИИ «Зенит».

М.Н. Миленький пришел в лазерную индустрию в начале 80-х годов после окончания факультета физической и квантовой электроники МФТИ. В 90-х годах он руководил лабораторией лазерных лидарных систем НИИ «Зенит».

В конце 90-х годов Л.Г. Сапрыкин и М.Н. Миленький организовали и возглавили научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ». В настоящее время НПЦ из малого предприятия, выполнявшего разовые заказы, вырос по объему выполняемых НИОКР с разнообразными тематическими направлениями, номенклатуре и объему производства в общепризнанного лидера среди российских производителей лазерного технологического оборудования.

# ВВЕДЕНИЕ

## **Основные характеристики взаимодействия излучения с веществом**

При лазерной обработке характер взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемым материалом зависит от многих факторов. Начальным и сложным из них является выбор лазеров, производимый в зависимости от их оптических и энергетических параметров, режимов работы и способов формирования и фокусирования их излучения. При этом необходимо учитывать, что характер взаимодействия излучения зависит от оптических, теплофизических и механических свойств обрабатываемого материала. И наконец, результат обработки зависит и от кинематических характеристик, скоростных и режимных возможностей установки, поскольку они определяют временные и экспозиционные пределы воздействия на материал, а также достижимую точность.

Специалисты в области разных видов лазерной обработки укажут множество параметров и факторов, которые необходимо одновременно учитывать для «правильного» проведения каждого процесса. Иначе говоря, для «правильной» обработки (т.е. обеспечивающей наилучший результат) оператору необходимо было бы выбрать в многомерном пространстве всех возможных значений единственно правильное «технологическое окно» значений. А оно, как правило, достаточно узкое.

Это означает, что, разрабатывая процесс обработки, необходимо прежде всего определиться с теми параметрами, которые оказывают наиболее значимое влияние как на процесс обработки, так и на желаемый характер взаимодействия излучения с материалом. Ниже перечислены основные факторы, оказывающие существенное влияние на процесс лазерной обработки материала.

## **Основные факторы, оказывающие существенное влияние на процесс обработки**

**Лазер** (тип; длина волны; выходная мощность; энергия в импульсе; частота повторения импульсов; длительность и форма импульсов; поляризация излучения; диаметр пучка; расходимость излучения; пространственное распределение интенсивности излучения; режимы работы).

**Материал** (оптические свойства на выбранной длине волны: поглощение; отражение; рассеяние (как оптическое качество поверхности); коэффициент преломления; теплофизические свойства: теплопровод-

ность; теплоемкость; температуры начальная/плавления/кипения/испарения и латентное тепло фазовых переходов; коэффициенты термического расширения; коэффициент поверхностного натяжения для жидкой фазы; состав для сплавов; давление насыщенных паров; механические: размеры, плотность; твердость; упругость).

**Параметры процесса** (характеристики объектива и вспомогательной оптики; положение фокальной плоскости и глубина фокуса; размер и форма сфокусированного пятна излучения; перекрытие соседних световых пятен; защитные и режущие газы; скорость перемещения; методики обработки).

В классическом понимании лазерная обработка подразумевает тепловые механизмы воздействия на материал (энергетический баланс между поглощенным теплом и ушедшим на нагрев/плавление/испарение и теплоперенос). До появления высокоинтенсивных лазеров, генерирующих ультракороткие импульсы, данный подход брался за основу рассмотрения взаимодействия лазерного излучения с веществом. Еще в 70-х годах на базе обобщения эмпирического опыта многих групп была составлена первая «Карта типовых процессов лазерной обработки», которая в дальнейшем неоднократно расширялась по мере развития лазеров и технологии [7].

На современной карте (рис. 1) на основании экспериментально полученных данных показано, какой плотностью мощности (интенсивностью) должно обладать лазерное излучение, чтобы получить требуемый вид обработки при заданном времени воздействия (или при заданной длительности импульса для импульсного воздействия).

Плотность мощности лазерного излучения, падающего на обрабатываемую поверхность с коэффициентом отражения  $R(\lambda)$  и реально принимающего участие в процессе взаимодействия с материалом при заданных площади и длительности воздействия, может быть приблизительно оценена из следующего соотношения:

$$W = (1 - R)E_i / S \cdot t_i,$$

где  $R$  — коэффициент отражения обрабатываемого материала на длине волны действующего излучения,  $E_i$  — энергия импульса в джоулях,  $S$  — площадь поверхности, на которую локализуется излучение в  $\text{см}^2$ ,  $t_i$  — длительность импульса в секундах.

В зависимости от вида обработки и свойств обрабатываемого материала используется лазерное излучение определенной мощности с за-

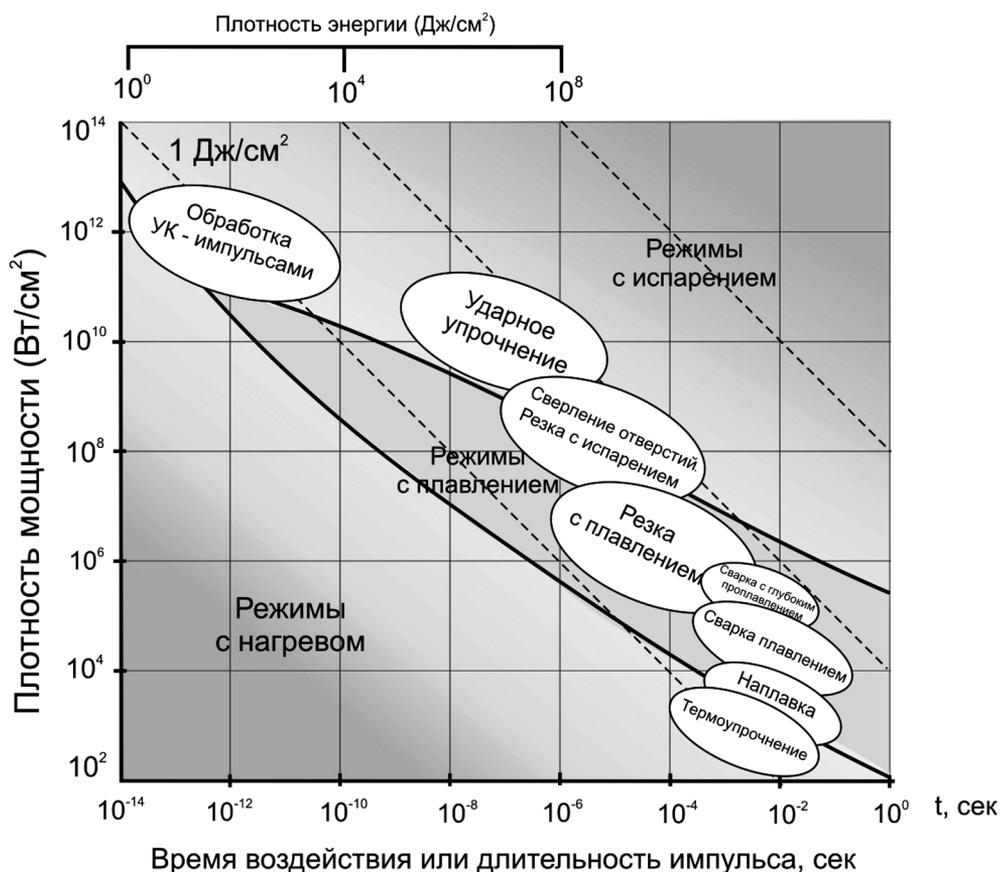


Рис. 1. Эмпирическая карта зон типовых процессов лазерной обработки

данном временем воздействия или длительностью импульсов и с заданной плотностью мощности на поверхности образца.

В диапазоне  $W = 10^5 \text{ Вт/см}^2 - 5 \times 10^5 \text{ Вт/см}^2$  проводятся операции термоупрочнения. При  $W = 5 \times 10^5 \text{ Вт/см}^2 - 5 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$  температура в зоне воздействия лазерного излучения достигает уровня, достаточного для наплавки и сваривания металлов. А при  $W > 5 \times 10^6 \text{ Вт/см}^2$  абляция от лазерного нагрева позволяет производить сверление, резание и фрезерование различных материалов.

Сверление, резание и фрезерование лежат в основе прецизионной лазерной обработки. Рассмотрению процессов, связанных с этими технологическими операциями, и посвящена настоящая книга.

Но прежде чем перейти к их рассмотрению, необходимо объяснить, что означает прецизионность в лазерной обработке и микрообработке.

Под ней понимается:

— высокая, находящаяся для различных применений в пределах от единиц микрон и до 20—30 микрон точность и повторяемость геометрических размеров обрабатываемых объектов (допуск на диаметр и конусность отверстий, ширину и конусность реза, допуск на размеры фрезерованной поверхности);

— минимальная, в пределах от единиц и до 10 мкм, толщина дефектного слоя (зона с измененной структурой исходного материала) на боковой поверхности отверстий или реза, зависящая от глубины проникновения зоны теплового влияния;

— чистота обработанной поверхности для различных применений соответствует величине от Ra 10 до Ra 0,32;

— минимальный по высоте и ширине, в пределах нескольких десятков микрон, грат, образованный застывшей жидкой фазой на входе и выходе просверленных отверстий или изготовленного реза. В некоторых применениях лазерной обработки грат на входе и выходе не допускается. В том числе и потому, что его удаление требует введения дополнительной операции, повышающей время изготовления и стоимость продукции;

— минимизация ширины реза; она не должна превышать при изготовлении изделий: с пленочными покрытиями — 20—30 мкм; из природного алмаза и хрупких диэлектрических материалов — 100 мкм; из металлов толщиной до 20 мм — 0,5 мм;

— ограничение глубины резания при изготовлении ряда изделий с пленочными покрытиями толщиной до нескольких микрон. При этом не допускается повреждение поверхности подложки, на которую покрытия нанесены;

— высокая, находящаяся для различных применений в пределах от нескольких единиц микрон и до 50 микрон точность топологии расположения в поле обработки систем отверстий, вырезаемых контуров и фрезеруемых деталей;

— при подгонке сопротивлений обеспечение требуемого допуска на их номинал. В ряде случаев подгонки не допускается повреждение поверхности подложки, на которую нанесен резистивный слой толщиной не более 1 мкм.

Выполнение указанных требований достигается как совершенствованием аппаратной части лазера и оборудования, так и программной

оптимизацией режимов обработки под конкретную задачу (т.е. отработкой технологии).

Ниже будет показано, что для достижения чистоты, качества и точности размеров при указанных видах лазерной обработки в большинстве случаев желательно обеспечивать максимально возможную величину  $W$  и одновременно повышать скорость обработки.

Точность и повторяемость диаметральных размеров и конусности отверстий, ширины и конусности реза, размеров фрезерованной поверхности во многом зависят от равномерности пространственного распределения интенсивности излучения в его поперечном сечении и стабильности этого параметра. Какое пространственное распределение является наиболее удовлетворительным для прецизионной обработки и каковы возможные способы его обеспечения, также рассмотрено в разделах 3 и 6 книги.

Точность и качество обработки, производимой с использованием импульсных лазеров, определяется также толщиной дефектного слоя, **образующегося** на обрабатываемой поверхности, ее чистотой, а также высотой грата на выходе отверстия или реза грата на входе и выходе сверления или реза. Данные показатели зависят от выбранных пространственно-энергетических параметров излучения. Какими они должны быть для улучшения результата лазерной обработки и какому способу локализации излучения на поверхность детали следует отдать предпочтение, посвящена тематика разделов 3, 6, 7 и 8 книги.

Наличие и высота грата на входе и выходе реза, изготавливаемого непрерывным лазером, чистота боковой поверхности реза и толщина образующегося на ней дефектного слоя зависят не только от мощности излучения, но и от условий его фокусировки на поверхность обрабатываемой детали. Во многом данные показатели качества определяются и скоростью резания. То, каковой она должна быть и как ее подобрать с тем, чтобы обеспечить наилучшие точностные результаты, объясняется в разделах 5, 8 и 9.

В последующих частях книги приведены примеры лазерной прецизионной обработки, внедренные в массовое или мелкосерийное производство и внесшие радикальное изменение в предшествующие технологические процессы. Рассматриваются также и перспективные примеры использования лазерной прецизионной обработки, имеющие принципиально важную значимость для настоящего времени.

### **Почему и для кого написана эта книга**

Настоящая книга посвящена проблематике прецизионной лазерной обработки, о которой написано немало число специальных статей, посвященных отдельным вопросам этой темы. В СССР и затем в России опубликовано порядка десятка или более книг отечественных и зарубежных авторов, в которых рассмотрены все виды лазерной обработки, включая прецизионное сверление и резание. Как минимум 6 книг аналогичного содержания опубликованы в период 2004—2011 гг. в США и Германии. К этому надо добавить множество статей отечественных и зарубежных авторов, в которых рассматриваются различные аспекты лазерной прецизионной обработки. Тогда что же побудило нас написать эту книгу и для кого она написана?

Слово «проблематика» в первой фразе данного текста выбрано не случайно. Дело в том, что в опубликованных источниках проблемы, сопутствующие практике лазерной обработки, в основном только обозначены, да и то далеко не все. Потому в них можно найти не слишком много информации, которая реально могла бы быть полезной при решении вопросов, возникающих в конкретных случаях ее применения. В этом плане в первую очередь эффективную помощь оказывает ясное и обоснованное представление целого ряда закономерностей взаимодействия лазерного излучения с обрабатываемым материалом.

Для начала следует иметь четкое понимание того, как происходит абляция, в особенности на тех материалах, которые не имеют собственного поглощения на длине волны действующего излучения. Известно только то, что в этом случае поглощение излучения длительностью от миллисекунд и до наносекунд, вероятнее всего, происходит на посторонних включениях и дефектах структуры. Однако экспериментальные доказательства тому нигде не приводятся. Вне поля внимания авторов книг оказалось то основное, что следует за поглощением. Здесь речь идет о закономерности, которая определяет условия поддержания абляции во время действия излучения, производящего сверление или резание.

По сию пору остаются несформулированными и необъясненными закономерности формообразования при лазерном сверлении, а значит, и резании, и фрезеровании. Но без этого невозможно обоснованно подходить к разработке требуемых технологических процессов, к поискам новых, перспективных направлений лазерной обработки и создавать соответствующее им оборудование.

Некоторые авторы сообщают об экранировании лазерного излучения плазмой, возникающей при обработке материалов. Но данные о том, какие потери вносит наличие жидкой фазы в факеле и как можно снизить это негативное влияние, не приводятся. Дело в том, что никто из них не проводил соответствующих экспериментальных исследований.

То же самое можно сказать и об экспериментальных исследованиях термонапряжений, возникающих при лазерной обработке. В имеющихся публикациях, посвященных данной проблеме, ничего, кроме сложного теоретического рассмотрения решения дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка, описывающих поле термонапряжений, читатель не найдет. Да и вряд ли он разберется в том, каким образом их следует применять на практике. А ведь во многих случаях именно термонапряжения, порождающие глубокий дефектный слой или растрескивание деталей, ограничивают область применения лазерной обработки.

В работах многих авторов рассмотрены отдельные аспекты теории лазерного резания в различных средах, включая кислородную, с применением достаточно мощных  $\text{CO}_2$ - и волоконных лазеров. Однако обобщающего теоретического или экспериментального воззрения на этот процесс, облегчающего решение проблем его использования на практике, до сих пор не существует. Ряд ведущих зарубежных исследовательских центров предлагает практические рекомендации по проведению лазерного резания металлов с использованием  $\text{CO}_2$ - и волоконных лазеров мощностью 1–4 кВт. Однако эти рекомендации относятся к конкретным типам оборудования и во многих случаях не могут служить основой для использования их потребителями других установок.

О том, когда целесообразно производить лазерную расточку или фрезерование, и то, как это надо делать, пожалуй, никто из пишущих в настоящее время авторов даже не упоминает.

Теория и практика обработки с использованием ультракоротких лазерных импульсов рассматривается во множестве различных статей, подавляющая часть которых написана на английском языке. Не требует доказательств то, сколь важно в настоящее время представить эту информацию в обобщенном и проанализированном виде.

Данное перечисление можно продолжить и далее. Но уже того, что отмечено, достаточно для понимания целесообразности публикации

настоящей книги. Она предназначена для студентов, изучающих лазерную обработку, и для тех, кто занимается исследованиями в этой области и созданием используемого в ней оборудования. Полезной она станет и пользователям такого оборудования на производстве.

## Литература

- [1] Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975.
- [2] Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970.
- [3] Виноградов Б.А., Гавриленко В.Н., Либенсон М.Н. Теоретические основы воздействия лазерного излучения на материалы. Изд. БПИ, 1993.
- [4] Страница памяти М.Ф. Стельмаха. (2012), сайт ОАО «НИИ Полюс» [http://www.polyus.info/in\\_memory\\_of\\_stelmakh/](http://www.polyus.info/in_memory_of_stelmakh/)
- [5] Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. Л.: Лениздат, 1973, 190 с.
- [6] Кондратенко В.С. Исследование и разработка процесса резки стекла методом лазерного управляемого термораскалывания. Диссерт. к.т.н., Москва, 1983.

# Часть I

## 50 лет динамичного развития

### РАЗДЕЛ I

#### ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ РАЗМЕРНОЙ ОБРАБОТКИ И СОВРЕМЕННЫЕ ОБЛАСТИ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Прежде чем приступить к изложению закономерностей прецизионной лазерной обработки, целесообразно в историческом контексте дать краткий обзор причин ее появления и этапов практического развития.

Надо сказать, что в 60—70-е годы прошлого столетия СССР стал лидером в области лазерных технологий, опережая большинство развитых стран и по количеству произведенных лазерных установок, и по номенклатуре освоенных технологий и направлений, часть из которых опережала мировой уровень на 5—7 лет. Жаль, но к 2012 году годовой объем продаж лазерного оборудования России уже не превышал 0,1 % (!) от мирового объема.

Первые в стране лазеры на рубине были запущены в ГОИ в июне и в ФИАНе в сентябре 1961 г. Первый лазер на отечественных рубиновых активных элементах был продемонстрирован осенью 1962 г. Первые импульсы с мощностью, достаточной для «прошивки» лезвия бритвы, были получены в ФИАНе в 1962 году, а к концу года в лабораториях и КБ страны уже работало более десятка лазеров. И хотя большая часть лазерной программы страны в эти годы ориентировалась на военно-космиче-

ские применения лазерной техники, в НИИ «Полюс» уже в 1963 году были созданы первые серийные технологические установки СУ-1 и КЗ с рубиновыми лазерами, ориентированные в основном на задачи радиотехнической и электронной промышленности. В последующие 10—15 лет были не только проведены значительные модернизации этих установок, но и разработаны более 40 новых моделей с лазерами на стекле с неодимом, с АИГ-лазерами и газовыми азотными и СО<sub>2</sub>-лазерами.

Выпуск известной серии установок от «Квант-3» и до «Квант-19», разработанных в НИИ «Полюс» и перекрывавших задачи от приборной сварки, резки, сверления волок и до корпусирования микросхем, лазерной подгонки резисторов, резки стекла и скрайбирования полупроводниковых пластин, превысил 6,5 тыс. шт. Несколько меньшими тиражами прошли установки этого же класса серий «Кристалл», «Кварц», «СЛС», «Корунд» и др.

Несколько позже было выпущено около 300 машин для раскроя металла с помощью мощных СО<sub>2</sub>-лазеров, часть из которых была оснащена отечественными ЧПУ-стойками управления.

Разработка и специализация установок требовала исследования процессов обработки и отработки технологических приемов и методик их использования на производстве.

Помимо «Полюса», технологические исследования по лазерной обработке материалов проводились уже в 1962 г. в лаборатории лазерной обработки ЭНИМСа (Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков, г. Москва). Рубиновый макетный излучатель с энергией в импульсе до 5 Дж (правда, с частотой повторения один раз в три минуты) уже позволял «пробивать» малые отверстия в широкой номенклатуре материалов [1].

До середины 1970-х в большинстве установок в основном использовались импульсные лазеры на рубине или стекле, активированном неодимом. На этих активных элементах собирались твердотельные лазеры для серийных технологических установок серии «Квант» и серийных станков ЭНИМСа (модели 4222 и 4222Ф2, МА4Р222Ф3, МА4Г222Ф3 и МА95Ф4), в том числе и с программным управлением, а также ЛТУ других предприятий.

Но уже к 1968 г. в НИИ «Полюс» было налажено серийное выращивание методом Чохральского монокристаллов алюмоиттриевого граната с неодимом, ниобата лития, КДР и др. и была создана полная технологическая цепочка получения высококачественных элементов из крис-

таллов. Одновременно разрабатывалась элементная база источников питания для серийного выпуска технологических непрерывных и импульсных Nd:YAG-лазеров (серии ЛТН и ЛТИ соответственно). В середине 70-х было начато серийное производство лазеров с модулированными импульсами наносекундного диапазона длительности.

Также к 1969 году в стране были разработаны и серийно выпускались (в Минэлектронпроме) CO<sub>2</sub>-лазеры мощностью до 1 кВт, а позднее — и более мощные, применявшиеся в основном для сварки и термической обработки деталей машин и закалки пресс-форм и штампов.

За рубежом технологии промышленной лазерной резки берут свое начало с первых английских патентов 1967—68 гг., описывающих лазерную резку тонких листов металла непрерывным CO<sub>2</sub>-лазером и прошивочное скрайбирование импульсным CO<sub>2</sub>-лазером керамических подложек с последующим разделением их на «чипы». В 1970 г. с появлением качественного Nd:YAG-лазера компании Quantronix впервые была продемонстрирована технология разделения Si-пластин лазерным скрайбированием.

Следующие поступательные этапы технологического роста в области прецизионной лазерной обработки связаны с появлением в середине 90-х годов первых мощных твердотельных лазеров с диодной накачкой (DPSS-лазеры) и с возможностью преобразования излучения во вторую и третью гармоники.

В начале 2000-х до промышленного применения «доросли» принципиально новые два класса лазеров с диодной накачкой — дисковые и волоконные, предлагающие потребителю широкий выбор по мощности, режимам работы, качеству излучения и гораздо более экономичные и надежные в сравнении с лазерами предшествующего поколения.

За начало следующего этапа можно условно принять 2007 год, когда в мире число изготовленных лазеров со сверхкороткими импульсами перевалило за 1000 шт. Применение пико- и фемтосекундных лазеров в технологических установках не только позволило значительно поднять качество и чистоту обработки за счет «холодного» абляционного взаимодействия с материалом, но и расширило спектр обрабатываемых материалов, включая прозрачные диэлектрики, и обеспечило технологии получения прецизионных 2D-и 3D-микроструктур, в т.ч. и с субмикронным диапазоном размеров.

Ниже в данном разделе рассмотрены причины, побудившие отечественную промышленность к развитию технологий прецизионной лазерной обработки.

## 1.1. Лазерное прецизионное сверление

В условиях конца 60-х и начала 70-х годов одной из актуальных задач данного направления было радикальное повышение производительности при изготовлении в промышленных масштабах ряда миниатюрных изделий из кристаллических материалов.

К ним, в частности, относились:

- часовые камни и подшипники скольжения специальных точных приборов, которые изготавливаются из рубина и сапфира;
- волокна из естественного алмаза, необходимые для вытягивания тонкой проволоки диаметром от 10 мкм;
- волокна из искусственных алмазов, в которых необходимо было сверлить и профилировать профилированные отверстия с диаметром до 80—100 мкм при допуске всего в несколько микрон.

Несколько позже похожие по сложности и точности задачи возникли при сверлении отверстий в прозрачных кристаллах пьезокварца, ниобата и танталата лития и др.

В 1970 г. по заказу корпорации Boeing на заводе американской компании General Electric с помощью импульсного рубинового лазера было впервые выполнено сверление многочисленных охлаждающих отверстий в турбинных лопатках и деталях «горячей зоны» авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), что в разы увеличивало его ресурс. К 1974 году уже более десяти усовершенствованных систем компании Raytheon с Nd:YAG-лазерами успешно работали на серийных заводах General Electric Ind., крупнейшего в то время производителя авиационных двигателей для гражданских и военных самолетов и для ракетно-космической техники.

Понятно, что эта задача стала очень актуальной и для отечественных производителей авиационных турбин.

Стратегически важной задачей 70-х было лазерное «сверление» прецизионных фильер в труднообрабатываемых металлических деталях для станков вытяжки синтетических волокон.

В ту пору требовался еще ряд важнейших для различных отраслей промышленности задач, суть которых излагается несколько ниже.

### **1.1.1. Сверление отверстий в изделиях из кристаллических материалов**

**Обработка волок из природного алмаза с применением лазерных станков в производственном процессе началась в СССР в 1969 г.** Возможным это стало только после того, как стали понятны и были устранены причины растрескивания природного алмаза при воздействии на него сфокусированного лазерного излучения, а также подобраны лазерные технологические режимы, обеспечивающие точно заданные размеры калибрующей зоны волок.

Дело в том, что при лазерной прошивке алмаза в зоне обработки всегда образуется тонкий графитовый слой, и его толщина сильно зависит от режимов лазерной обработки. Поскольку допуск на диаметр калибрующей зоны алмазных волок для протяжки тонкой проволоки по ТУ не должен превышать  $\pm 2$  мкм, то необходимо было жестко выдерживать режим работы лазера и параметры фокусировки, с тем чтобы толщина графита на боковой поверхности канала не превышала 2 мкм на сторону.

Первый подобный лазерный станок модели «Квант 9» для сверления калибрующей зоны волок, разработанный в НПО «Полюс», был введен в начале 1969 г. на заводе алмазного инструмента в г. Рославль. Летом того же года на Полтавском заводе искусственных алмазов и алмазного инструмента для изготовления волок был внедрен лазерный станок модели МА49, разработанный в ЭНИМС.

В результате изменения технологии время на операции сверления канала волокни сократилось с нескольких смен до нескольких минут.

В последующие два года с помощью лазерной установки «Квант 9» (НПО «Полюс») лазерную обработку распространили и на операцию изготовления входной распушки (входного конуса) волокни.

Примерно в середине 1970-х гг. в СССР в промышленных масштабах было освоено выращивание дешевых искусственных алмазов, после чего лазерные установки начали использовать и для изготовления волок с диаметром калибрующей зоны от 100 мкм и более.

В 1973 г. специалисты ЭНИМС решили сложную для того времени проблему изготовления волок из природного алмаза с диаметром калибрующей зоны в 10 мкм. Для проведения этой операции на заводе жаропрочных и тугоплавких материалов в г. Чирчик (Узбекистан) был внедрен специальный лазерный станок.

К концу 70-х началось активное промышленное использование импульсных и непрерывных лазеров на гранате (Nd:YAG), работающих как в режиме свободной генерации, так и с модулированной добротностью, и замена ими лазеров на рубине и стекле с неодимом.

**В 70-х годах в стране также была успешно решена актуальная для часовой промышленности задача лазерного сверления отверстий в часовых рубиновых камнях.**

Надо сказать, что к этому моменту такая задача стояла перед производителями часов и часовых и прецизионных механизмов во всем мире. Так, в 1965 г. швейцарский производитель рубиновых камней для часов Watch Stones Corp. подписал контракт с Институтом прикладной физики Бернского университета на исследование возможности лазерного сверления отверстий в рубиновых заготовках, тем самым открыв «лазерную эру» в Швейцарии. В начале 1972 г. ведущий швейцарский производитель часов ASUAG (с 1983 г. — SWATCH Group SA) открыл специальный лазерный центр для технологической проработки проблемы. В 1974 году центр был преобразован в компанию LASAG Corp. с миссией разработки лазерного оборудования и технологии лазерного сверления часовых рубиновых камней для швейцарской и европейской часовой промышленности.

На разработку отечественной технологии и соответствующих ей лазерных станков также потребовалось почти 10 лет. За этот период была успешно решена задача предотвращения растрескивания камней, получение 50 мкм диаметра отверстия с требуемым допуском и толщиной дефектного слоя и разработана конструкция лазерных станков-автоматов с достаточной производительностью и надежностью.

В 1972 г. на часовом заводе в г. Петродворец была внедрена разработанная в ЭНИМС лазерная технология сверления отверстий  $\varnothing 50$ —80 мкм в 0,5 мм часовых камнях с допуском  $\pm 3$  мкм и с толщиной дефектного слоя не более 10 мкм на сторону. Для этого специалисты завода и института совместно разработали и изготовили лазерные станки-автоматы модели АК-345 и АК-348. Произошло это всего на несколько месяцев позже, чем аналогичная технология стала использоваться в Швейцарии.

Впервые в станке были использованы инновационные оптические решения — лазер высокой яркости на стекле с неодимом с оригинальным резонатором, выводом излучения через отверстие в переднем зеркале. Была впервые использована проекционная оптическая схема фо-

кусировки излучения на деталь, переход на двухимпульсную обработку и много других нововведений. При длительности импульса  $\sim 300$  мкс лазер обеспечивал очень высокую яркость и пиковую мощность при стабильной и долговременной работе.

Десять этих станков обеспечивали годовой выпуск до 90 миллионов камней при средней производительности одно отверстие в секунду вместо 30 минут при механическом сверлении. На этих же станках впоследствии сверлились отверстия в миниатюрных сапфировых подшипниках скольжения [1].

На часовом заводе в г. Углич и на заводе точных технических камней в г. Куса, изготавливающих часовые камни в суммарном количестве порядка 500 миллионов штук в год, в производство были внедрены лазерные станки «Караван». На этих станках обработка одного отверстия также занимала не более двух секунд.

### **1.1.2. Сверление отверстий в металлах**

Очень острой проблемой для отечественной промышленности 70-х годов была разработка стабильной и производительной технологии прецизионного сверления отверстий в приборных жиклерах гироскопов, а также в металлических фильерах для вытяжки тонких синтетических волокон.

Приборные жиклеры, используемые для раскрутки сжатым воздухом гироскопов в системах инерциального управления летательных аппаратов, выполнялись из латуни толщиной 150 мкм, и прецизионное калиброванное отверстие диаметром 50—100 мкм прокалывалось вручную с помощью специальной иглы. Эта непростая операция с учетом «человеческого фактора» приводила к значительному разбросу в калибровке, что и предопределило необходимость перехода на автоматическое лазерное сверление.

Фильерные цилиндры для вытяжки полимерных и синтетических волокон и моноплетей изготавливаются из нержавеющей стали толщиной до 0,2 мм и имеют в донной части от нескольких десятков до нескольких тысяч отверстий (фильер) диаметром от 30 и до 100—150 мкм, реже до 1—2 мм, через которые и продавливается горячий жидкий полимерный материал для охлаждения и растяжки. Застывая на некотором расстоянии после выхода из калибрующего отверстия, он образует прочные волокна, применяемые для изготовления синтетической пряжи и скручивания в синтетические нити.

Отверстия в таких фильерах изготавливались прокалыванием на специальных сложных автоматах. Актуальность применения лазерного сверления в данном случае определялась быстрым износом как прокалывающего инструмента, так и самих фильер.

Основным требованием ко всем перечисленным отверстиям было обеспечение высокой размерной точности, воспроизводимости и постоянства расхода (воздуха или расплавленного полимера). Требуемый допуск обычно составлял  $\pm 2$  мкм. Но даже при соблюдении допуска лазерное сверление не всегда обеспечивало требуемую точность расхода или заданную скорость потоков. Как показали исследования, основной причиной несоответствия являлось наличие затвердевшей жидкой фазы на боковой поверхности отверстий, выполненных лазерами со сравнительно «длинными» импульсами.

Лишь к концу 1980-х с переходом на модуляцию импульсного или непрерывного излучения лазера акустооптическим затвором удалось радикально уменьшить остаточное количество жидкой фазы и увеличить повторяемость и калибруемость отверстий.

**На середину 70-х приходится появление новых типов газоразрядных приборов-индикаторов.** В их конструкциях в катоде, изготавливаемом из специальных марок стали толщиной 0,1 мм, необходимо было сверлить регулярные матрицы в несколько тысяч отверстий диаметром  $100 \pm 2$  мкм и с координатной точностью не менее  $\pm 2$  мкм.

Для выполнения этой непростой тогда задачи в ЭНИМСе был создан специальный станок модели АК-348Ф2 с ЧПУ, обеспечивающим 2-координатное управление столом и синхронную с ним работу лазера.

### 1.1.3. Развитие технологии прецизионного лазерного сверления

#### **Сверление отверстий в жаропрочных и труднообрабатываемых материалах**

К середине 70-х прошлого века при бурном развитии турбореактивной авиации задача повышения ресурса и увеличения межповерочного интервала для авиационных двигателей встала с особой остротой. За рубежом к этому времени на предприятиях GE Aircraft Engines, Rolls-Royce и Pratt & Whitney уже работали десятки лазерных установок от компаний Raytheon (SS-500 и SS-550), Lumonics (JK MS-830), а позднее и Convergent Energy (Gemini с Aurora P50) и др. для сверления охлаждающих отверстий в турбинных лопатках «горячей зоны» и в деталях камеры сгорания авиационных двигателей.

Число отверстий диаметром от 250 до 900 мкм и глубиной от 3 и до 10 мм в хромоникелевых жаропрочных и труднообрабатываемых сплавах доходило до нескольких сотен на одну лопатку, а потребность в лопатках исчислялась сотнями тысяч (см. рис. 1.1).

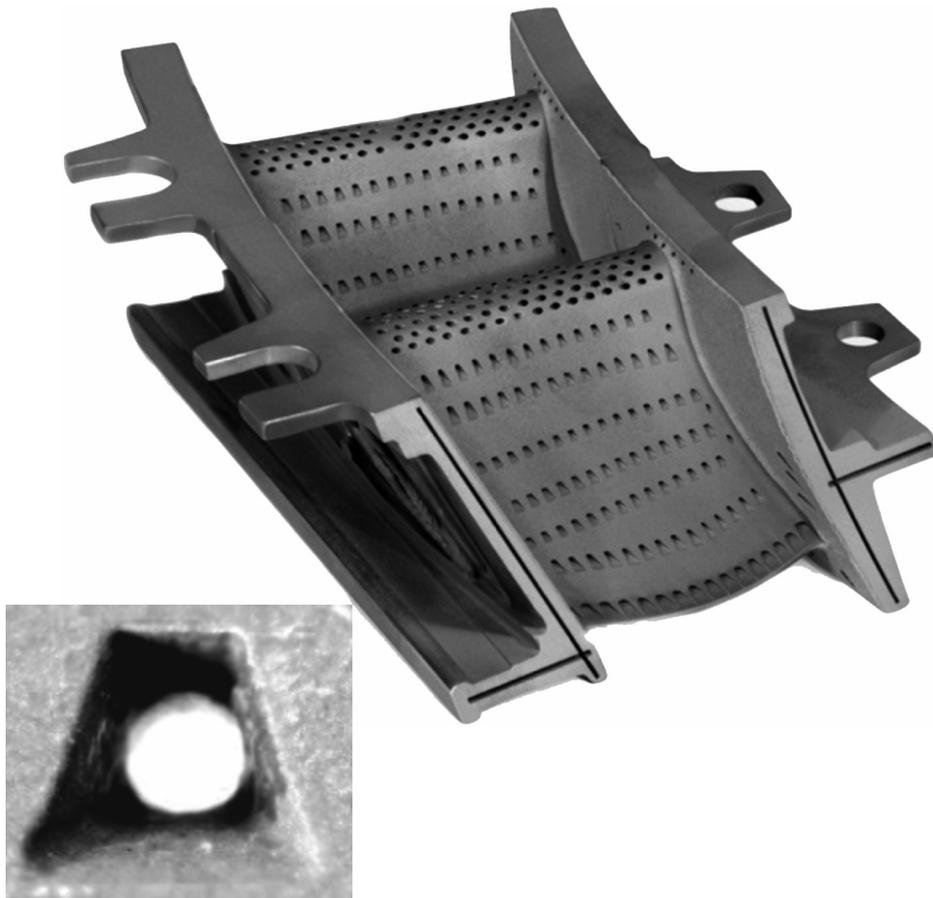


Рис. 1.1. Сверление и профилирование охлаждающих отверстий в лопатке ГТД и увеличенное изображение диффузора с проработанным аэродинамическим профилем

При столь массовом производстве высокая скорость и производительность лазерного сверления в короткое время вытеснили на многих заводах конкурирующие процессы электрохимической (ЭХО) и электроэрозионной (ЭЭО) обработки (хотя они все еще используются для получения отверстий с очень большим аспектным отношением или криволинейной формой). Более низкое качество и больший размерный

разброс в сравнении с эрозионными методами на тот момент устраивал производителей, поскольку в процессе охлаждения участвовали одновременно сотни отверстий и лопатка калибровалась только по совокупному расходу воздуха и нижнему допуску на размеры отверстий [25].

Во всех установках применялись импульсные Nd:YAG-лазеры с ламповой накачкой, высокой яркостью и пиковой мощностью 20—50 кВт при длительности импульса от 0,2 до 5 мсек. Средняя мощность в середине 80-х уже составляла 300—500 Вт, а к 90-м с целью увеличения производительности в ряде случаев была поднята до 1 кВт. Многоимпульсное сверление (до 30—80 имп./отв. в «пачке») осуществлялось *перкуSSIONным* или *трепанационным* методом с газовой продувкой. Высокое качество маломодового пучка обеспечивало достижение средней плотности мощности в фокусе до  $10^6$ — $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, однако почти гауссовское распределение приводило к сосуществованию процессов плавления и испарения с преобладанием испарения в центре и значительной зоной расплава вблизи стенок отверстия. Дальнейшее повышение средней мощности и увеличение энергии в импульсе для смещения процесса в сторону испарения приводило к менее стабильному качеству, особенно для глубоких отверстий. С точки зрения эффективности процесса — из-за разницы значений теплоты плавления и испарения — удаление расплавленного материала избыточным давлением паров более экономично и требует менее 15—20 % от энергии, необходимой для только испарения того же материала. Поэтому более надежным и простым методом повышения качества оказались подбор временной формы импульса и его динамическое изменение в пределах «пачки». Среднее время выполнения одного отверстия составляло от одной до нескольких секунд.

К концу 90-х в мировой авиации были ужесточены требования по надежности, уровням шумности и экологичности авиационных двигателей. В «горячей зоне» появились лопатки с керамическим термобарьерным покрытием (англ. «ТВС»), для улучшения охлаждения и снижения уровня шумов и расхода топлива все выходы отверстий на поверхность лопатки начали профилировать, придавая им требуемую аэродинамическую форму диффузоров.

Хрупкая ТВС-керамика из-за возможного трещинообразования не может обрабатываться мощными импульсами миллисекундного лазера. Для ее обработки и профилирования в установки дополнительно устанавливались вторые YAG-лазеры с модуляцией добротности и разверткой излучения с помощью сканеров. Пиковая мощность короткоимпульсного

лазера достигает 1—2 МВт при средней мощности до 100 Вт, и абляционное многопроходное 3D-профилирование каждого диффузора занимает не более нескольких секунд, при этом его профиль индивидуально оптимизируется для каждого охлаждающего отверстия [45].

Аэродинамика охлаждающего потока лопатки и сложный внешний и разветвленный внутренний профиль требуют расположения отверстий по индивидуальной схеме и под разными (в т.ч. и «острыми», вплоть до 15°) углами к поверхности. Поэтому обработка проводится на специальных скоростных 5-осных лазерных станках с прецизионной кинематикой [13].

Один из наиболее современных европейских заводов MTU Aero Engines расположен в Мюнхене и производит современные авиационные двигатели, узлы и комплекты лопаток как для Airbus S.A.S. (для семейства самолетов A-320 и A-380), так и для других авиастроительных компаний. Обработка лопаток и деталей осуществляется в три смены на шести двухлазерных станках LaserTec 80 PowerDrill производства Deckel-Macho Group (DMG). В станках установлены лазеры компаний Lasag и Rofin-Baasel [46].

В некоторых станках аналогичного назначения компании WinBro сверление отверстий производится последовательно лазерно-эрозионным методом, что обеспечивает более высокое качество [47].



Рис. 1.2. Универсальный 5-координатный лазерно-эрозионный обрабатывающий центр WinBro Serie 800 для сверления и профилирования диффузоров всех типов лопаток и сопловых блоков

Близкие задачи по сверлению отверстий диаметром 80—100 мкм, но с очень малым допуском до  $\pm 2$  мкм при глубине сверления до 1 мм стояла в 70-х и 80-х годах перед производителями фильтров и распылительных форсунок топливной аппаратуры дизельных двигателей, также выполняемых из жаропрочных сплавов и работающих в условиях давлений до 1000 атм. Механическая или электроэрозионная обработка была достаточна трудоемка и приводила на тот момент к значительному проценту брака.

Накопление к середине 90-х годов данных по физическим закономерностям лазерного сверления и развитие элементной базы твердотельных лазеров позволили существенно расширить их применения в этой области, значительно повысив производительность и обеспечивая при этом требуемое качество и геометрическую точность.

В Европе, а с 1984 г. и в Америке такие лазеры для прецизионного сверления начала поставлять производителям технологических установок швейцарская компания Lasag Corp. Имея значительный технологический опыт, накопленный в начале 80-х при разработке собственной 5-осевой установки для сверления деталей авиационных турбин, и типоряд мощных твердотельных лазеров с уникальными характеристиками, Lasag в короткие сроки организовала серийный выпуск и технологическое сопровождение новых Nd:YAG-излучателей, оптимально «заточенных» под данный круг задач [2].

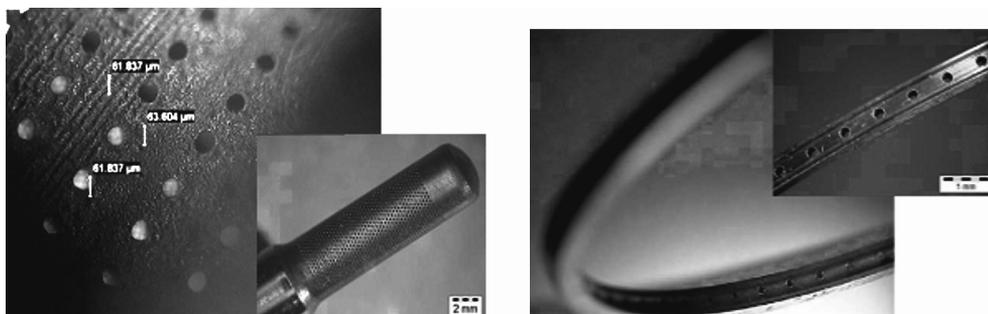
На рис. 1.3 приведены фото фильтра (слева) и кольцевой обечайки (справа) с отверстиями, изготовленными с помощью лазеров серий KLS 246 и FLS 552 по технологии Lasag.

В примере изготовления фильтра на рис. 1.3 следует выделить высокую точность диаметральных размеров отверстий, реализованную на повышенной частоте повторения импульсов.

На рис. 1.4 приведены фото, иллюстрирующие возможности *одноимпульсного* сверления отверстий в торцах очень тонких хирургических игл (*офтальмологические иглы*) на установке модели NR компании Lasag.

Диаметр высверливаемых *за один импульс* отверстий может составлять 0,05—0,4 мм и выбирается в зависимости от диаметра самой иглы. Получается круглое цилиндрическое отверстие, на выходе которого отсутствует застывшая жидкая фаза. Достижимое аспектное отношение (*при жестком допуске на толщину остающейся стенки*) составляет 1:4 — 1:8.

В этом примере следует обратить внимание на то, что импульс излучения с энергией, достаточной для быстрого и «чистого» одноимпульсного



Лазер KLS 246: режим — 500 Гц, 0,05 Дж, 0,1 мс; нержавеющая сталь толщиной 0,5 мм; диаметр отверстия на входе — 0,06 мм, на выходе — 0,055 мм; точность  $\pm 0,005$  мм; время 120 отв./мин

Лазер FLS 552: режим — 20 Гц, 14 Дж, 0,6 мс; низколегированная сталь 2 мм; диаметр отверстия на входе — 0,7 мм, на выходе — 0,55 мм; точность  $\pm 0,015$  мм

Рис. 1.3. Сверление отверстий в топливном фильтре (слева) и в кольцевой обечайке (справа)

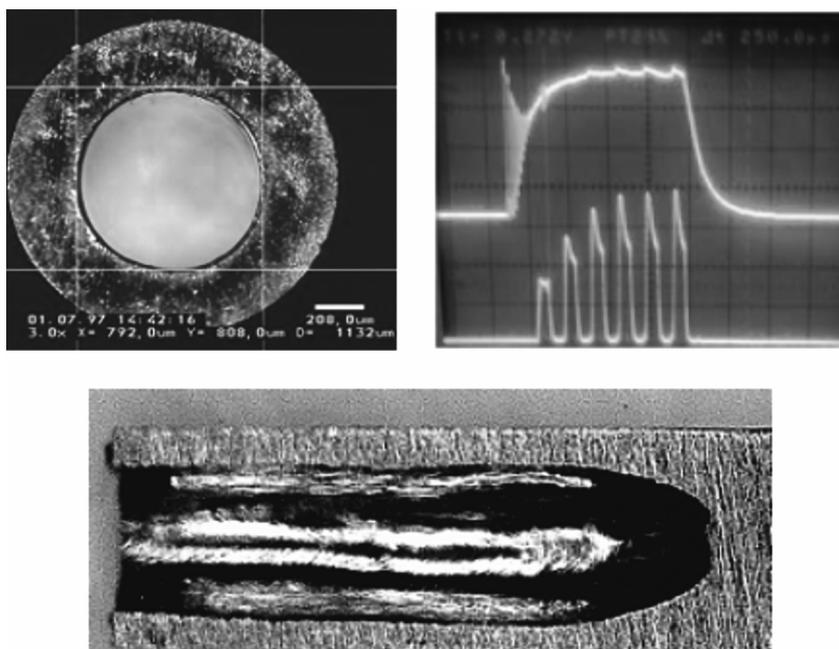


Рис. 1.4. Одноимпульсное сверление отверстий в торце тонкой офтальмологической иглы из нержавеющей стали

испарения материала, модулируется несколькими более короткими подымпурсами с нарастающей интенсивностью и с регулируемой скважностью (в данном случае скважность около двух). Поскольку эти результаты относятся к 1985 году, то это практически первая демонстрация успешной микрообработки «пачками» импульсов. Регулировка скважности, амплитуды и числа импульсов в «пачке» позволяет подобрать режим качественного сверления без повреждения тонких стенок для каждого типоразмера игл. В разделе 6.1 показано, что такая структура является основой улучшения качества лазерной обработки.

В России лазерные установки с близкими параметрами излучения были разработаны и начали серийно выпускаться с начала 2000-х годов в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ».

Современный этап развития технологий лазерного сверления тесно связан с прогрессом в разработке и выпуске в промышленном исполнении твердотельных лазеров с диодной накачкой, генерирующих на высоких частотах повторения импульсы нано- и пикосекундной длительности.

На рис. 1.5 приведен пример высокоскоростной перфорации сотен тысяч отверстий в тонколистовом металле. Показан фрагмент мембраны фильтра, содержащего более 200 тысяч отверстий диаметром 30 мкм, с шагом между ними 50 мкм. Мембрана изготовлена из нержавеющей стали толщиной 30 мкм и выполнена **импульсами наносекундной** длительности.

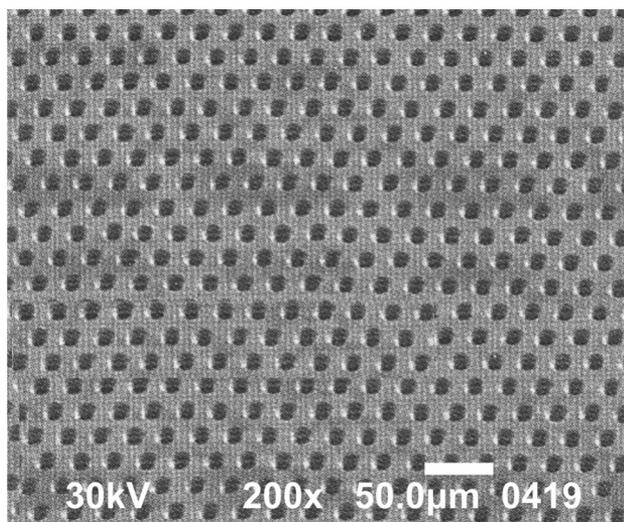


Рис. 1.5. Перфорация отверстий диаметром 30 мкм и с шагом 50 мкм в нержавеющей стали толщиной 30 мкм

Стабильность диаметра перфорированных отверстий и правильность их формы свидетельствует о стабильности всех параметров лазерного излучения и высокой равномерности его пространственного распределения.

Данная система отверстий была изготовлена на специальном лазерном станке, который, по заявлению представителя создавшей его немецкой фирмы LPKF, способен перфорировать до **680000** отверстий в час [4]. Столь высокая скорость реализуется за счет перемещения сфокусированного излучения по поверхности детали гальваносканером.

В настоящее время для решения аналогичных технологических задач предлагается множество различных нано- и пикосекундных лазеров. Масштабный промышленный выпуск целой линейки пикосекундных лазеров осуществила немецкая фирма **Lumera Laser**. В Мюнхене на выставке Laser Show 2009 был продемонстрирован лазер Hyper Rapid 50, генерирующий импульсы длительностью 15 пс на четырех длинах волн ( $\lambda = 355, 532$  и  $1064$  нм). На частоте следования импульсов 400 кГц при качестве излучения не хуже  $M^2 < 1,5$  энергия, соответствующая указанным значениям  $\lambda$ , равна 70–120 мкДж, что обеспечивает абляцию, равную 60 мм<sup>3</sup>/мин [5]. Пикосекундные лазеры производят также такие известные компании, как Rofin и Trumpf [6].

## 1.2. Лазерное прецизионное резание на начальном этапе

Прецизионное резание с использованием импульсных твердотельных лазеров на кристаллах Nd:YAG, обеспечивающих плотность мощности на поверхности зоны перекрытия соседних сфокусированных световых пятен не менее  $5 \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> для абляции материала, было опробовано уже в середине 70-х. На его базе создавались импульсные лазеры с повышенной частотой следования и энергией импульсов и непрерывные лазеры (и тот и другой могли работать с модулированной добротностью излучения), что позволило удовлетворять возросшую к тому времени потребность в лазерном резании.

Кроме того, весомые усилия на данном этапе были сосредоточены на разработке технологий лазерного резания материалов, механическая обработка которых затруднена или практически невозможна. В связи с этим резка листовых материалов и металлов на этот момент целиком производилась с использованием более мощных непрерывных CO<sub>2</sub>-лазеров.

Практически только к концу 80-х годов с появлением сравнительно мощных (до 0,3—0,6 кВт) непрерывных и импульсных Nd:YAG-лазеров с ламповой накачкой стало возможным и целесообразным не только разрабатывать установки и применять твердотельные лазеры для резания механически труднообрабатываемых материалов, но и массово обрабатывать такие металлы, как конструкционная и нержавеющая сталь, алюминий, медь, латунь, титан и т.д., а также и цветные металлы, плохо поддающиеся обработке с помощью CO<sub>2</sub>-лазеров.

Качество импульсной резки твердотельными лазерами многих черных и цветных металлов и ряда диэлектриков во многих случаях значительно превосходило результаты, получаемые при резке CO<sub>2</sub>-лазерами. При меньшем размере пятна и ширине реза не только достигалась более высокая точность (прецизионность) ответственных деталей, но и минимизировалась зона термического воздействия (ЗТВ) из-за снижения аккумуляции тепла.

Тем не менее большая часть оборудования с твердотельными лазерами, разрабатываемая в этот период, предназначалась для целевых специализированных технологических применений и, естественно, выпускалась очень малыми партиями или «поштучно».

**Одно из интересных применений прецизионного резания в технологическом процессе изготовления бриллиантов было осуществлено в 1974—76 гг.** Для этого в ЭНИМСе был разработан первый отечественный прецизионный станок с лазером на стекле с неодимом, предназначенный для нанесения на природном («сыром») алмазе нестираемых линий разметки (разметка огранки будущего бриллианта) глубиной **порядка 0,1 мм**. До этого разметка наносилась технологом тушью и при «распиловке» или огранке алмаза часто терялась, что приводило к ошибкам и порче дорогого сырья.

Последующая доработка, проведенная в ЭНИМСе, по совершенствованию технологии лазерной разметки позволила учитывать при разметке ориентацию кристаллических граней алмаза, что позволяло спланировать получение бриллианта наибольшей возможной каратности и наивысшего качества и блеска. Стоимость готового бриллианта при этом значительно возрастала.

Работа была внедрена на московском заводе «Кристалл» в 1977 г.

Дальнейшая модернизация станка и технологии в ЭНИМСе позволила осуществлять лазерный надрез алмазов на глубину до ~0,3 мм для последующей точной установки в него тонкого (50—80 мкм) вращаю-

щегося алмазного диска для распиливания кристалла на полную глубину по плоскости с заданной разметкой ориентацией.

Позднее в середине 80-х на станок был установлен более современный Nd:YAG-лазер на гранате с непрерывной ламповой накачкой и акустооптической модуляцией добротности. Лазер, разработанный в НПО «Полус», обеспечивал мощность до 20 Вт в маломодовом режиме.

В конце 1980-х в ЭНИМС был разработан Nd:YAG-лазер с непрерывной накачкой и акустооптической модуляцией, со средней мощностью до 100 Вт. С ним была отработана технология программно управляемого многопроходного резания природного алмаза со скоростью до 25 мм/мин на глубину до 1 мм при ширине реза 100 мкм. При этом в резе отсутствовало трещинообразование, а на его боковой поверхности образовывался слой графита толщиной не более 2 мкм. Данный результат делал особо перспективным внедрение лазерной технологии для проведения сквозного двухстороннего резания алмазов с размерами до 2 мм (~0,1 карата), наиболее часто встречающихся в партиях кристаллов для изготовления бриллиантов. Механическое резание таких кристаллов могло длиться многие часы.

В 90-е годы основным центром производства бриллиантов в России стал Смоленский завод «Кристалл». На этом заводе был организован участок лазерной обработки алмазов. Основу участка составили три станка компании Orgiv (Израиль), оснащенные непрерывным одномодовым лазером Quantronix 114 (США) с непрерывной накачкой и акусто-оптической модуляцией излучения, а также две экспериментальные отечественные установки ЛТК1 и ЛТК-2 с Nd:YAG-лазером с непрерывной накачкой и АОМ. На последних установках была отлажена отечественная технология «послойного распиливания» кристаллов по параметрам минимально узкого клинообразного распила, задаваемого оператором, а также предложено распиливание «крупных» кристаллов «с переворотом», то есть с двух сторон, с автоматическим совмещением полуплоскостей распиливания. На этих же станках в автоматическом режиме резки проводилось и предварительное формообразование кристалла под заданную огранку, включающее все стандартные и фантазийные формы («круглый», «овал», «маркиз», «груша», «сердце» и др.).

Некоторые большие кристаллы невозможно было разрезать алмазным диском, поскольку у них не существовало так называемого мягкого направления и присутствовали внутренние напряжения, препятствующие механической обработке. Их разрезка, как правило, осуществляема

только лазером. В этом случае становится возможным увеличивать глубину резания до нескольких миллиметров за счет постепенного перемещения фокальной плоскости ко дну реза, ширина которого увеличивается последовательными параллельными проходами.

Наилучшее качество реза достигалось при использовании импульсного одномодового лазера со средней мощностью около 10 Вт. При длительности импульсов в 150—200 нс оптимальный результат достигался на частоте следования 2—2,5 кГц. Оптическое качество пучка и оптическая система позволяли фокусировать излучение в световое пятно диаметром 30—50 мкм. Малый диаметр лазерного излучения на выходе из резонатора и указанный диаметр светового пятна обеспечивали узкий апертурный угол фокусируемого пучка и минимальную ширину реза.

Еще одним существенным преимуществом данной установки было ее оригинальное программное обеспечение. С его помощью была произведена унификация операций резания и предварительной огранки, что повысило ее функциональность и облегчило эксплуатацию.

**К началу 80-х на повестку дня в стране остро встал вопрос лазерной размерной обработки керамических подложек, а также прецизионной вырезки в них «окон» и технологических отверстий.** Военная электроника массово переходила на технологию компактных и легких гибридных интегральных схем (ГИС), выполняемых на керамических подложках с высокими диэлектрическими параметрами. Даже при значительном увеличении функциональной сложности электронных блоков их массогабаритные показатели уменьшались в десятки раз, а стойкость и защищенность значительно возрастали. Прогресс в области силовой электроники и СВЧ-приборов требовал использования в качестве подложек новых теплопроводящих керамических материалов со специфическими диэлектрическими характеристиками.

Все это стимулировало разработки специализированных лазерных установок с твердотельными и газовыми лазерами для высокоточной обработки, резки и разделения различных видов керамических подложек (ситалл, поликор, 22ХС, нитридные теплопроводящие керамики и др.). Размеры «стандартных» отечественных подложек обычно составляли 60 × 48 мм при толщине от 200 мкм и до 2 мм.

Из-за высокой твердости и хрупкости этих керамик их механическая обработка была трудноосуществима.

Твердотельные лазеры, работающие на длине волны  $\lambda = 1,064$  мкм, достаточно хорошо разрезали многие виды керамических материалов.

Однако технология требовала гарантированного отсутствия трещинообразования, в связи с чем глубина дефектного слоя на боковой поверхности реза не должна превышать 10 мкм. Кроме того, требовалась высокая «чистота» процесса, поскольку многие операции вырезки и разделения должны были производиться на подложках с подготовленным рисунком металлизации, а подчас и с установленными компонентами ГИС. Быстро стало понятно, что «длинные» импульсы с высокой энергией, хотя и с легкостью прошивают керамику значительной толщины, малопригодны для «чистого» и бездефектного разделения. Эти технические и технологические проблемы постепенно решались за счет использования все более совершенных лазеров с более высокой частотой повторения укороченных импульсов и высоким качеством пучка.

Начиная с 1985 года в ЭНИМС в содружестве с НИИ «Зенит» (г. Зеленоград) была намечена целевая программа по разработке и постановке в серию технологической лазерной установки с мощным твердотельным лазером и подготовкой необходимой к производству компонентной базы. Первоначально был разработан и серийно выпускался станок модели 4Р222Ф2 на базе рубинового лазера с частотой следования импульсов 20 Гц, но уже с 1988 г. начался серийный выпуск установки модели 4Г222Ф2 с 50-ваттным Nd:YAG-лазером с ламповой накачкой и частотой следования импульсов до 50 Гц. Оба станка применялись на многих предприятиях, использующих керамические подложки для изготовления элементов электроники. К 1990 году частота и мощность были повышены до 100 Гц и 100 Вт соответственно.

В начале 90-х для повышения производительности установки и увеличения глубины резания был разработан лабораторный образец двухкаскадного (задающий генератор и усилитель) импульсного (длительность импульса 250 мкс) лазера с мощностью до 175 Вт с модуляцией излучения акустооптическим затвором. Удалось решить многие ресурсные проблемы лазера за счет общего снижения нагрузок на квантроны и лампы.

Позднее работы в этом направлении были продолжены в научно-производственном центре «Лазеры и аппаратура ТМ» (г. Зеленоград). В конце 90-х годов на новой элементной базе силовой электроники и новой конструкции резонаторов и квантронов был разработан типоряд твердотельных лазеров и организован серийный выпуск лазерных технологических установок серии МЛ1-1 и МЛ1-12.

## 1.3. Использование лазерного резания на современном этапе

За 30 лет после появления первых машин для лазерной резки техническое и технологическое развитие в этом сегменте двигалось по пути медленного эволюционного наращивания мощности излучения всех известных типов промышленных лазеров и, как следствие, столь же плавного наращивания скорости и производительности оборудования. Так же плавно росли качество, точность, сервис, «дружелюбность» программного интерфейса и толщина обрабатываемых заготовок.

В последнее десятилетие развитие практических применений лазерной резки значительно ускорилось. В основном это определилось промышленным освоением и появлением на рынке новых типов мощных лазеров с диодной накачкой, обладающих несравненно более высокой удельной мощностью, надежностью, ресурсом и экономичностью. Одним из признаков современного этапа развития является то, что безоговорочные лидеры 1990-х годов в области массовой резки листового материала — CO<sub>2</sub>-лазеры в последние годы повсеместно вытесняются мощными волоконными и дисковыми лазерами, захватившими за последние несколько лет более 70 % сегмента прецизионной резки металлов толщиной до 20 мм. Другая особенность современного развития технологий лазерного резания связана с созданием промышленных моделей импульсных лазеров с нано-, пико- и фемтосекундной длительностью импульсов излучения. С освоением этих лазеров появилась возможность вывести лазерную микрообработку на качественно новый уровень.

В данном разделе мы прежде всего рассмотрим особенности и возможности использования именно этих новых и перспективных «игроков» в сегменте лазерной резки, а также постараемся объяснить, почему во многих случаях потребители и разработчики отдают предпочтение новым типам лазеров.

### 1.3.1. Мощные лазеры в технологии изготовления изделий из листовых металлов

Изготовление изделий из листовых металлов (конструкционная сталь, нержавеющая сталь, алюминий и его сплавы, медь, латунь, вольфрам, никель, цирконий, молибден и др. толщиной от 1—8 мм и более)

с использованием лазерного резания является в настоящее время широко востребованным во многих странах, включая Россию.

Наиболее известным и успешным разработчиком и производителем волоконных лазеров является известная компания IPG Photonics. Среди других производителей волоконных лазеров следует выделить компании Rofin и Trumpf.

Еще две компании недавно вышли на рынок с непрерывными волоконными лазерами киловаттной мощности. Это британские компании SPI Lasers и JK Lasers.

Компания IPG Photonics серийно выпускает одномодовые волоконные лазеры мощностью от 0,1 кВт и до 10 кВт с полной расходимостью менее 1—2 мрад и качеством одномодового излучения  $M^2 < 1,1$  [10]. Эти лазеры обеспечивают наилучшее качество и скорость при резке конструкционной стали толщиной до 5—8 мм и нержавеющей стали толщиной до 4—6 мм [12]. Многомодовые волоконные лазеры выпускаются мощностью до 50 кВт с расходимостью излучения от 4 мрад и более.

Компания Rofin предлагает волоконные лазеры серии FL, обладающие мощностью в пределах 500 Вт — 4 кВт. Для оптимизации режимов обработки может устанавливаться транспортное оптическое волокно диаметром от 50 до 600 мкм. Одномодовые волоконные лазеры достигают параметра качества пучка  $BPP = 0,4$  мм × мрад при выходной мощности до 1 кВт. «Топовая» модель FL 040 мощностью 4 кВт обеспечивает качество излучения  $BPP = 2,5$  мм × мрад. В перспективе должны последовательно появиться лазеры с выходной мощностью 6 и 10 кВт (по-видимому, FL 060 и FL 100).

Лазеры компании Rofin включают интеллектуальную систему управления RCU (Rofin control unit), работающую под ОС WindowsCE с пультом ДУ и сенсорным дисплеем для оперативного вывода всей информации о состоянии и параметрах работы. В случае применения нескольких лазеров производства Rofin система обеспечивает их единое управление через общие интерфейсы, в остальных случаях — легкую программируемую интеграцию в оборудование OEM-производителей. Опционно RCU обеспечивает непосредственное управление сканерной головкой и системами контроля процесса.

Компания Trumpf производит под маркой «TruFiber X00» одномодовые волоконные лазеры мощностью 200, 300 и 400 Вт с качеством излучения  $M^2 < 1,1$ . Лазеры ориентированы на сектор прецизионной обработки и резки сравнительно тонких материалов. Мощность



Рис. 1.6. Одномодовый волоконный лазер IPG Photonics YLS-2000, многомодовый волоконный лазер компании Rofin FL 040 и одномодовый волоконный лазер TruFiber 400 компании Trumpf

многомодового волоконного лазера, выпускаемого Trumpf, равна 3,6 кВт.

Все перечисленные волоконные лазеры могут работать в непрерывном и импульсном режимах. Но поскольку импульсный режим обеспечивается модуляцией тока, то пиковая мощность импульса остается на том же уровне, что и в непрерывном режиме. Это означает, что такой режим, если и улучшает качество резания, то только с потерей в производительности. О том, в каких случаях целесообразно его использовать, объяснено в разделе 5 настоящей книги.

Дисковые лазеры, генерирующие излучение с длиной волны  $\lambda = 1,06$  мкм, серийно выпускаются компаниями Trumpf и Rofin.

Компания Trumpf разработала и производит семейство дисковых лазеров под общей маркой TruDisk X00 мощностью 1—16 кВт. Качество излучения (BPP) для лазеров мощностью 1 кВт и 2 кВт составляет  $2 \text{ мм} \times \text{мрад}$  и  $4 \text{ мм} \times \text{мрад}$  соответственно, (т.е.  $M^2 = 1,3$  и  $M^2 = 3$ ). Качество излучения (BPP) для лазеров мощностью от 2,6 до 16 кВт равно  $8 \text{ мм} \times \text{мрад}$  (или  $M^2 = 6$ ) [11]. По материалам компании Trumpf, дисковый лазер мощностью 3 кВт легко разрезает конструкционную сталь

толщиной до 20 мм, нержавеющей сталь — до 15 мм, алюминий — до 15 мм, медь — до 4 мм, бронзу — до 3 мм [22].

Излучение дисковых лазеров передается в зону обработки по транспортному волокну, диаметр которого у лазеров мощностью 1 и 2 кВт равен 50 мкм и 100 мкм, а у 2–16 кВт лазеров диаметр установленного транспортного волокна — 200 мкм. Для лазеров мощностью в 16 кВт он опционно может быть увеличен до 300 мкм.

Примерно к 2007 г. разработчики и производители CO<sub>2</sub>-лазеров, не желая терять свои позиции, существенно улучшили параметры их излучения. Компания Trumpf выпускает такие лазеры мощностью 0,7–3,6 кВт с качеством излучения  $M^2 = 1,67$  [5]. Таким образом, удалось уменьшить расходимость излучения этих лазеров примерно до 3 мрад и повысить их выходную мощность. Улучшены и эксплуатационные качества этих лазеров. CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 3 кВт режет конструкционную сталь толщиной до 20 мм, нержавеющую сталь и алюминий толщиной 15 мм, медь толщиной 4 мм и бронзу толщиной 3 мм.

Постарались не оказаться не у дел и другие разработчики CO<sub>2</sub>-лазеров. Фирма RoFin создала семейство CO<sub>2</sub>-слэб-лазеров мощностью от 1 кВт и до 8 кВт с качеством излучения  $k = 0,95$ .

На проведенной в Москве в 2011 г. выставке «Металлообработка» компания Mitsubishi продемонстрировала технологическую установку со встроенным в нее многомодовым CO<sub>2</sub>-лазером мощностью 4,5 кВт собственной разработки. Демонстрировалось резание конструкционной стали толщиной до 25 мм (с кислородом) [9].

Российская компания «ВНИТЭП» на той же выставке демонстрировала свою технологическую установку, оснащенную волоконным лазером от IPG с мощностью 2 кВт, на которой также в кислородной среде можно резать специальную конструкционную сталь толщиной до 20 мм [11].

Здесь еще раз важно обратить внимание на то, что особо выделяли все представители перечисленных фирм. Указываемые ими толщины реализуются при резании в среде кислорода специальной конструкционной стали, отличающейся повышенной однородностью структуры и уменьшенным количеством примесей.

Многие широко применяемые на различных производствах листовые металлы не вступают в экзотермическую реакцию. К таковым относятся наиболее употребимые в различных областях промышленности нержавеющая сталь, алюминий и его сплавы, медь и латунь.

Цирконий, молибден и титан, часто используемые в ряде специализированных отраслей промышленности, неуправляемо сгорают даже в среде воздуха и тем более в кислородной среде, вызывая тем пожароопасную ситуацию. Потому изготовление из этих металлов различных изделий с применением лазерного точного резания осуществляется в среде нейтральных газов.

Исследования процесса резания в среде сжатого воздуха листовой конструкционной стали отечественного производства толщиной до 5 мм, не относящейся по мировым стандартам к специальной лазерной стали, нержавеющей стали толщиной до 4 мм, сплавов алюминия толщиной до 5 мм, а также и меди толщиной до 3 мм, производимые с использованием волоконного лазера мощностью 1 кВт, были проведены в НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» в период 2009—2010 гг. (см. раздел 8).

Удовлетворительные качественные показатели резания в среде нейтрального газа отечественной нержавеющей стали толщиной 5 мм и дюралю толщиной 6 мм реализуются за счет использования волоконного многомодового лазера мощностью 1,5 кВт. Для обеспечения приемлемого качества резания конструкционной стали толщиной более 3 мм его надо производить в среде кислорода.

Удовлетворительные для производителей качественные показатели резания в среде кислорода отечественной конструкционной стали толщиной до 16 мм, нержавеющей стали толщиной до 10 мм и алюминиевого сплава АМГ5 толщиной до 10 мм в среде нейтрального газа реализуются за счет использования многомодового волоконного лазера мощностью 2 кВт.

Теоретические расчеты, проведенные в НПЦ в 2011 г., показали, что увеличение глубины и улучшение качественных показателей резания, проводимого на максимально возможной скорости резания, при неизменной мощности лазера реализуются оптимизацией локализации излучения на деталь и подбором конструкции и параметров сопла, через которое в зону обработки подается ассистирующий газ (см. разделы 5, 8 и 9).

Следует коротко остановиться на проблеме резания меди с помощью волоконных лазеров. Суть ее определяется высоким коэффициентом отражения излучения с длиной волны 1,06 мкм на этом материале. Отраженное излучение, пройдя через фокусирующий объектив в обратную сторону, попадает на торец волокна, используемого в этом лазере, и вызывает его разрушения. В НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» был разработан способ резания меди с помощью волоконного лазера, при котором отражение

излучения понижается до уровня, при котором не происходит указанного разрушения. То, за счет чего снижается отражение, объяснено в разделе 2. Каким образом реализуется снижение и то, какие получаются результаты по глубине и скорости резания меди с использованием многомодового волоконного лазера мощностью 1 кВт, рассказано в разделах 5 и 8.

**Применение лазерного резания не ограничивается изготовлением изделий из листовых материалов.** То, сколь в настоящее время актуальна и разнообразна иная область применения лазерного резания и какие лазеры используются для удовлетворения ее потребностей, показывают данные, приведенные в таблице 1.1 [13].

Таблица 1.1

Application range	cw Fiber-laser			Fiber	Nd:YAG
	100 W	200 W	300 W	100-300 W	15-300 W
Watch Industry	•	•	•		
Medical – FineCutting parts	•	•	•		
Electronics	•	•	•	•	
Apparatus Engineering				•	•
Automotive				•	•
Aerospace				•	•

Application range — область применения; watch industry — часовая промышленность; medical — fine cutting parts — точное резание медицинских изделий; electronics — электроника; apparatus engineering — инженерная аппаратура; automotive — производство автомобилей; aerospace — самолето- и ракетостроение.

Соответствующие таблице 1.1 примеры прецизионного резания приведены ниже на рис. 1.7. Большая часть демонстрируемых на нем деталей изготовлена с использованием твердотельного импульсного лазера с активным элементом на Nd:YAG с мощностью излучения 300 Вт. Как уже отмечалось выше, такие лазеры начали разрабатываться в конце 90-х. Создание на основе этих лазеров технологических установок, оснащенных прецизионным координатным столом, оригинальной оптической системой фокусирования излучения, устройством подачи в зону обработки ассистирующего газа, автоматизированной системой управления процессом обработки, позволило начать широкое внедрение технологии прецизионной резки конструкционной и нержавеющей сталей, труднообрабатываемых металлов, сплавов алюминия, цветных металлов, керамики и т.д.

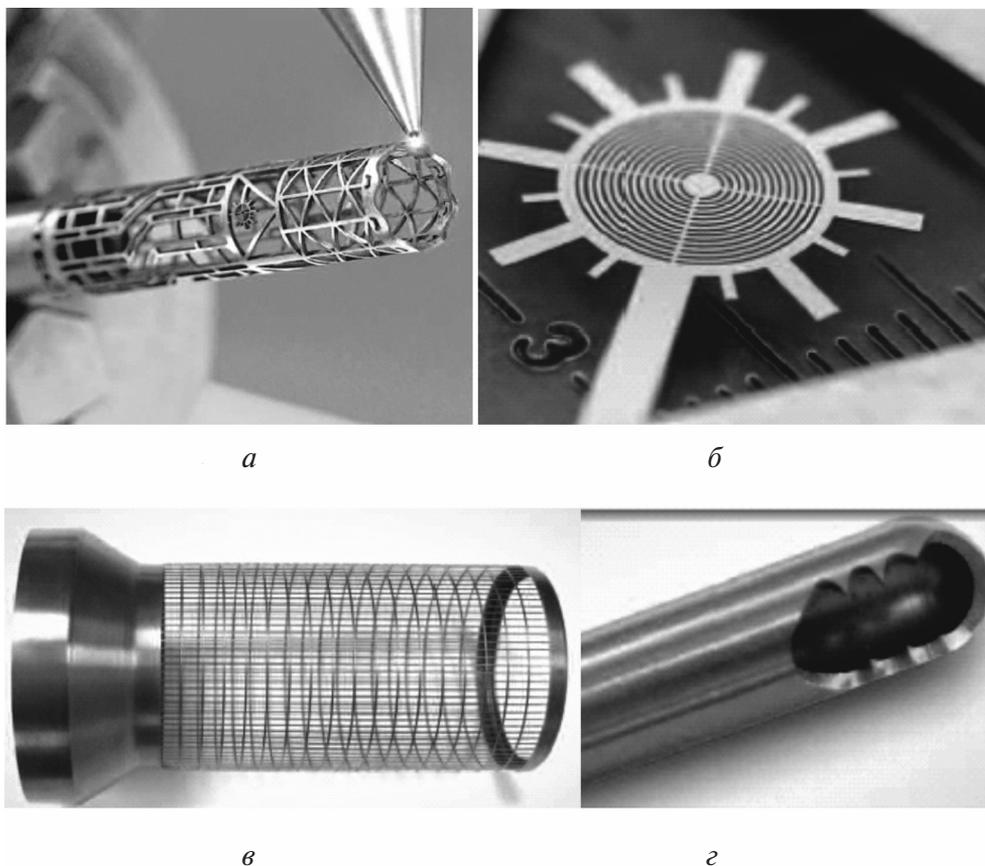


Рис. 1.7. Прецизионные детали, изготовленные на оборудовании Lasertec компании DMG

На рис. 1.7 *а* показана обработка трубки модулятора электронного прибора в металле диаметром 6 мм, производимая импульсным Nd:YAG-лазером мощностью до 300 Вт.

На рис. 1.7 *б* представлена высокоточная деталь, вырезанная в металле толщиной 0,2 мм.

На рис. 1.7 *в* представлен филигранно вырезанный лазерным излучением вкладыш фильтра. По внешнему виду вкладыша допустимо предположить, что для его обработки использовался cw-лазер с модуляцией добротности мощностью до 100 Вт.

На рис. 1.7 *г* демонстрируется хирургический инструмент с открытой полостью, вырезанной в трубке с толщиной стенки 1,5 мм, с использованием импульсного Nd:YAG-лазера мощностью до 300 Вт.

На российских предприятиях для прецизионного резания деталей из указанных металлов и керамик наибольшее распространение в настоящее время получили установки на базе двухкаскадных импульсных твердотельных лазеров с ламповой накачкой серии МЛ1-2 и МЛ4-2. Они применяются для изготовления изделий из керамики, нержавеющей стали, кобальта, латуни, меди, алюминия и серебра. То, на каких режимах следует производить резание на указанных установках, объяснено в разделе 8.

Преимуществом лазеров с ламповой накачкой по сравнению с волоконными и дисковыми лазерами являются высокие энергия и пиковая мощность импульсов излучения. Это обеспечивает лучшее качество резания, выражающееся в повышенной чистоте боковой поверхности реза, максимальная глубина которого в зависимости от материала находится в пределах 2—4 мм, и меньшей высоте грата, образующегося на его выходе. Однако при повышении их средней мощности (за счет частоты следования импульсов или накачки) из-за возникновения в активном элементе термических искажений значительно увеличивается расходимость излучения. По этой причине получение маломодового излучения мощностью, находящейся в пределах даже 30—50 Вт, является принципиально сложной задачей. Данный недостаток существенно ограничивает область применения резания с их использованием, поскольку он не позволяет увеличить производительность и глубину обработки.

### **1.3.2. Лазерное прецизионное резание с использованием нано-, пико- и фемтосекундных импульсов**

Повышение требований к надежности и качеству высокотехнологичной продукции, необходимость ее миниатюризации с одновременным увеличением функциональных возможностей привели в последние годы к быстрому росту спроса на лазерное технологическое оборудование нового поколения. Согласно данным исследовательской компании Strategic, сектор рынка нового оборудования поколения в последние 4—5 лет демонстрирует наиболее быстрые темпы роста (более 35—40 %), значительно превосходящие темпы роста традиционных технологий. Его основной особенностью является то, что оно должно обеспечивать толщину дефектного слоя в зоне обработки до микронного уровня и позволять изготавливать различные по назначению миниатюрные изделия из полупроводниковых и диэлектрических материалов с нанесен-

ными на них пленочными покрытиями. Реализация этих требований с использованием ранее разработанных и выпускаемых лазерных обрабатывающих комплексов невозможна.

Качественный скачок в создании новых технологий резания и соответствующего им оборудования произошел в последние годы и был связан с прогрессом в создании нано-, пико- и фемтосекундных твердотельных лазеров с диодной накачкой. Использование этих лазеров обеспечило достижение такой плотности мощности в зоне обработки, при которой абляция состоит в основном из испарения. При этом возможность проведения обработки излучением не только ближнего инфракрасного (ИК) диапазона спектра, но и видимого, и ультрафиолетового диапазонов позволила значительно расширить перечень обрабатываемых материалов и уменьшить зону термического влияния.

В настоящее время разработку технологических комплексов с нано-, пико- и фемтосекундными лазерами ведут практически все фирмы, занимающиеся микрообработкой. Одними из первых эти работы начали компании Clark-MXR Inc., Oxford Lasers Ltd., 3D Micromac, LPKF и др. Немецкая компания LPKF сконцентрировала свои усилия в отмеченной выше актуальной области использования лазерного резания в технологии изготовления как печатных плат и необходимых для того паяльных масок (стенсил), так и соединительных элементов плат. При создании оборудования для этих технологий она использует лазеры с диодной накачкой, генерирующие **импульсы наносекундной длительности** на требуемых для оптимального процесса обработки длинах.

Для серийного промышленного производства LPKF разработала ряд разнообразных технологических процессов лазерного резания и фрезерования, а также создала на базе этих лазеров соответствующие им установки серии MicroLine. С использованием этого оборудования на фирме производятся следующие операции:

- вырезание полугибких и жестких печатных плат требуемой конфигурации из многослойного стеклотекстолита толщиной 0,3—1 мм [14];
- вырезание пазов заданного контура в многослойной плате с помощью специальной оптики, позволяющей уменьшить до минимума дефекты, образующиеся на боковой поверхности реза. Высокое качество боковой поверхности такого реза демонстрирует фотография на рис. 1.8 [14];

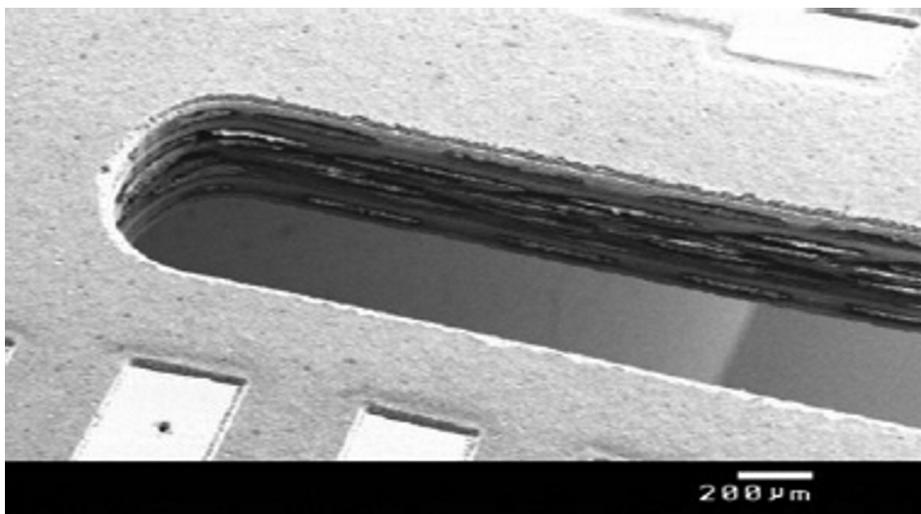


Рис. 1.8. Паз, вырезанный в многослойной плате

— вырезание гибких соединительных элементов печатных плат, изготавливаемых из меди, покрытой пластиком, с общей толщиной 10—50 мкм. Фото соединительного элемента торсионного типа показано на рис. 1.9 [15];

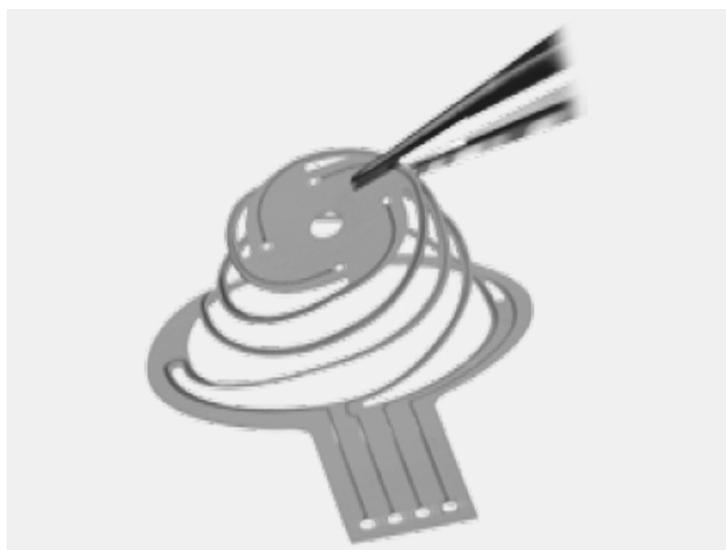


Рис. 1.9. Соединительный элемент торсионного типа (см. цв. вклейку)

- сверление в платах глухих переходных отверстий диаметром от 50 мкм на требуемую глубину, предназначенных для последующей организации межслойного электрического соединения за счет гальванического нанесения на их боковую поверхность слоя меди [14];
- сверление в платах сквозных отверстий диаметром 75 мкм, предназначенных для электрического соединения слоев меди толщиной 20—30 мкм;
- вырезание масок для нанесения паяльной пасты, изготавливаемых из нержавеющей стали или специального полимера толщиной 100—250 мкм с различными по форме аперттурами («стенсилы»), количество которых доходит до 15000. В зависимости от толщины этой детали и числа вырезаемых в ней отверстий скорость обработки на данной операции равна 7700—10400 апертур в час [16].

Компания LPKF разработала новый способ ускорения изготовления паяльных масок. Суть его заключается в том, что отдельная аперттура вырезается без перемещения стола. Реализуется это использованием зеркальной отклоняющей системы, перемещающей лазерный луч в пределах сопла подачи газа [17].

На рис. 1.10 *а* показан фрагмент маски из 50 тысяч отверстий диаметром 50 мкм, изготовленных новым способом за один час. На рис. 1.10 *б* представлен аналогичный фрагмент более сложной маски из 25 тысяч

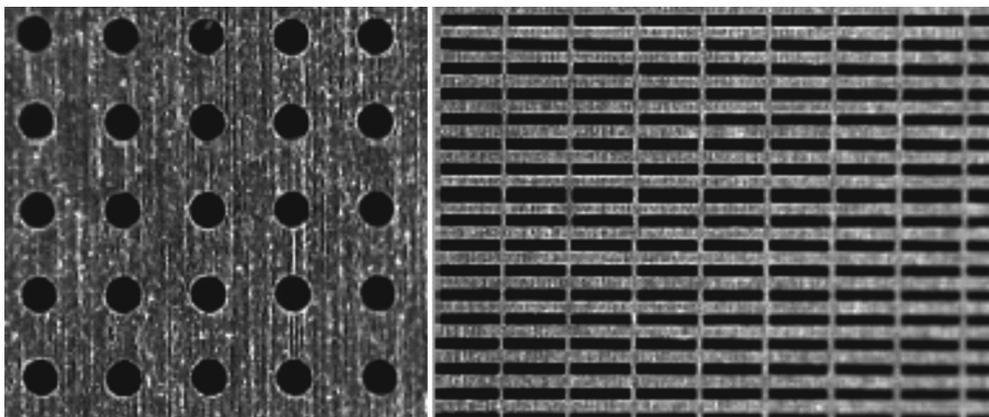
*а**б*

Рис. 1.10 *а, б*. Фрагменты масок («трафаретов») с отверстиями разной формы

прямоугольных отверстий размером  $60 \times 300$  мкм, также изготовленной новым способом за один час. Данные рисунки демонстрируют как высокую точность геометрического расположения обработанных отверстий, так и высокое качество обработки.

О высоком качестве и разрешающей способности резания, проводимого новым способом, позволяет судить показанная на рис. 1.11 фотография пазов размерами  $30 \times 66$  мкм, изготовленных в многослойной плате. Радиус закругления в углах пазов равен 10 мкм.

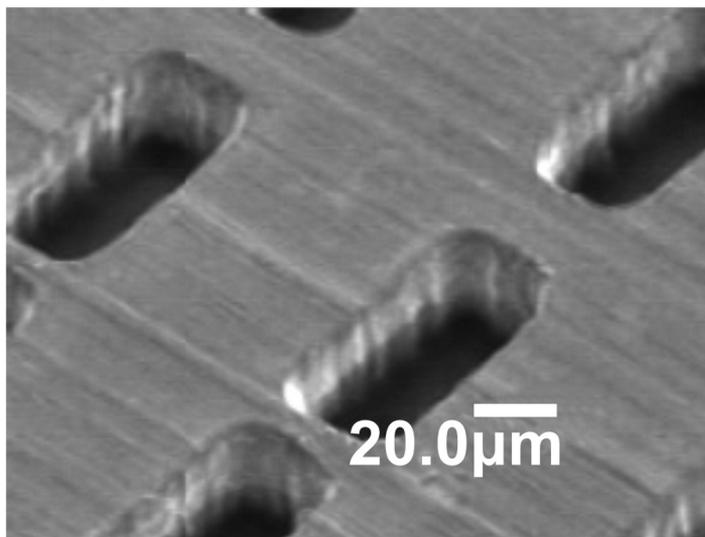


Рис. 1.11. Миниатюрные пазы, изготовленные в многослойной плате

На установках серии MicroLine проводится также качественное резание, скрайбирование и сверление различных спеченных и сырых керамик (нитрид кремния, оксид алюминия, нитрид алюминия, оксид циркония) толщиной от 0,25 мм и до 1 мм [17].

Лазерами, генерирующими **импульсы пикосекундной длительности**, в настоящее время производится резание обширной номенклатуры деталей, изготовленных из различных материалов. Ниже приведены некоторые примеры обработки такого рода деталей.

**Углеродные композитные материалы** относятся к наиболее перспективным в авиакосмической промышленности, автомобилестроении и нефтехимии. Их обработка механическими методами весьма затруднительна, что и вызвало повышенный интерес к их лазерному резанию.

Использование для резания углеродных композитных материалов толщиной 1,5—3 мм непрерывных CO<sub>2</sub>-лазеров мощностью до 2 кВт и импульсного CO<sub>2</sub>-лазера, работающего на частоте следования импульсов 500 Гц с длительностью импульса 20 мкс и энергией импульса 1 Дж, привело к неприемлемым по точности результатам. Они таковы: ширина реза — 0,4—1 мм, глубина зоны термического влияния на входе реза — 1,8—4,55 мм, а в поперечном сечении реза — 2—4 мм. В этой зоне происходит выгорание матрицы и образуются трещины и поры. Боковая поверхность реза покрыта слоем пироуглерода [19].

При использовании CO<sub>2</sub>-лазера, работающего в импульсном режиме с частотой следования импульсов 10 Гц, глубина зоны термического влияния оказалась равной нулю. Но и это не привело к удовлетворительному результату в целом, поскольку ширина реза стала равной 1,6 мм.

Одной из основной причин недопустимых как ширины реза, так и глубины зоны термического влияния является то, что при воздействии на материалы излучения с длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм при плотности мощности, превышающей  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, вблизи поверхности детали образуется плазма. Она вызывает рефракцию излучения, его поглощение и последующую передачу энергии в окружающую среду и в зону расширения, образующуюся на поверхности обрабатываемого материала [19].

При использовании выпускаемого фирмой Lumera пикосекундного лазера модели Nurag Rapid 50, работающего в режиме УФ-излучения с мощностью до 20 Вт на частоте импульсов 200—2000 кГц, скорость абляции при длительности импульсов 15 псек достигает 60 мм<sup>3</sup>/мин. Такая производительность была получена при резании углеродного композитного материала толщиной 1 мм [20].

Сколь высокое качество реза реализуется при укорочении длительности импульса до 15 псек, видно на рис. 1.12. Нити волокон четко различимы в правой части боковой поверхности реза, на которой отсутствует углерод. Минимальная величина неровностей, характеризующая чистоту поверхности, равна 200 нм. Поскольку расходимость излучения этого лазера близка к одномодовой, то ширина реза даже при использовании фокусирующего объектива с  $f = 200$  мм не превысит 200 мкм.

По заявлению компании Trumpf, **пикосекундные дисковые лазеры** серии обеспечивают высококачественное и с достаточно высокой скоростью резание деталей из нержавеющей стали, титана, кремния и других полупроводниковых материалов. Высокое качество характеризуется

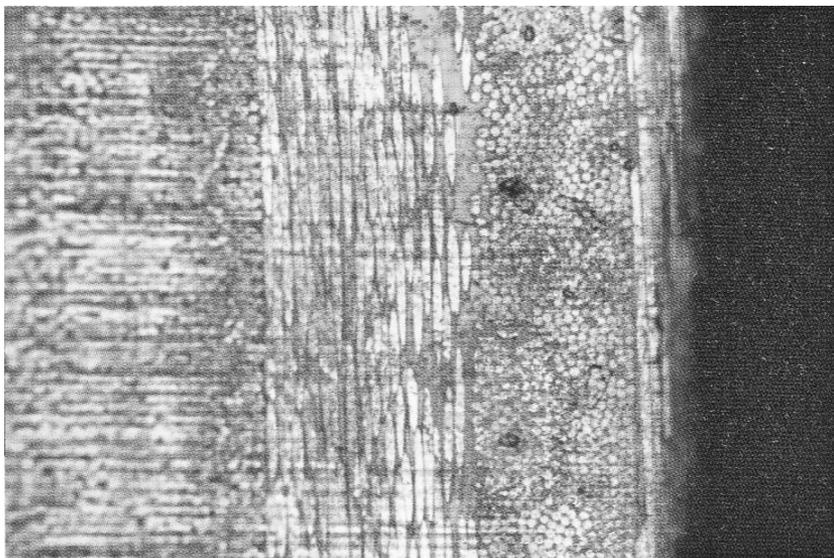


Рис. 1.12. Боковая поверхность реза композитного материала (см. цв. вклейку)

малой глубины зоны термического влияния, образующейся на боковой поверхности реза, ее высокой чистотой и отсутствием грата на выходе реза.

Качество боковой поверхности реза, сравниваемое с тем, которое получается шлифованием, отчетливо различимо на фотографии отверстия, вырезанного лазером TruMicro 5050 в титане, рис. 1.13 [7].

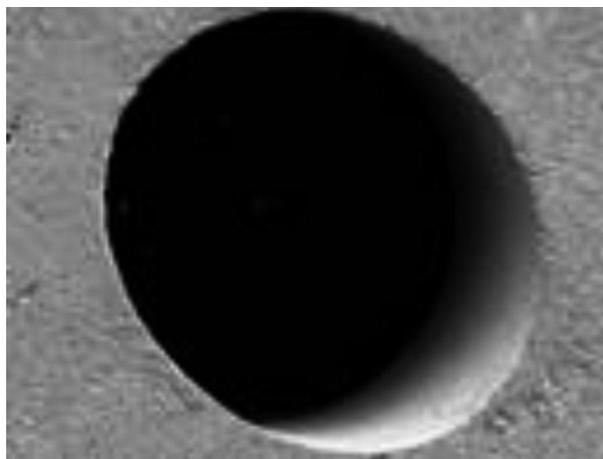


Рис. 1.13. Отверстие, вырезанное в титане

Импульсным пикосекундным лазером с мощностью излучения 45 Вт и длиной волны 1030 нм, производимым фирмой Jenoptik, вырезаются пазы шириной 0,6 мм в кремнии толщиной 0,725 мм. Скорость изготовления таких пазов равна 0,3 мм<sup>3</sup>/сек. По мнению специалистов Jenoptik, такое качество боковой поверхности не может быть обеспечено резанием с использованием других лазеров [12].

**Потребность в резании деталей, изготавливаемых из стальной, латунной, бронзовой и медной ленты толщиной примерно от 0,025 мм и до 0,1 мм, возникла в начале 2000-х.** Ниже приведены несколько актуальных для настоящего времени примеров данного вида резания, производимого с применением **пикосекундного лазера.**

В медной фольге толщиной 100 мкм лазером вырезаются пазы шириной 100 мкм и длиной 200 мкм. Минимальная ширина перемычки между пазами равна 50 мкм. Получена она при использовании для резания пикосекундных импульсов, минимизирующих глубину проникновения зоны теплового влияния [21]. В ином случае вряд ли бы удалось предотвратить тепловое разрушение материала столь узких перемычек.

В фольге из латуни толщиной 25 мкм импульсами пикосекундной длительности вырезаются 26000 различных контуров. Время вырезки контура с общей длиной 175 м не превышает 60 мин. То есть скорость резания вплотную подошла к 3 м/мин [21]. Надо понимать, что механическое резание фольги такой толщины если и возможно, то на гораздо меньшей скорости, да и сопровождается оно значительными трудностями, а именно необходимостью разработки подходящего для него режущего инструмента и конструкции специального станка, оснащенного соответствующими приспособлениями для крепления ленты.

**В последние 4—5 лет использование пикосекундных лазеров возросло в связи** с необходимостью обработки деталей точной механики, электронных приборов, принтеров и деталей, изготовленных из полимерных материалов, особо чувствительных к температуре.

Уникальный пример обработки высокоточного со сложным профилем микроскопических размеров зубчатого колеса из керамики с использованием лазера модели Nupur Rapid 50, генерирующего импульсы длительностью 11 псек, показан на рис. 1.14 [23]. Иными способами изготовить такое изделие со столь высоким качеством вряд ли возможно.

Использование этой модели лазера открывает новые перспективные возможности в разных областях техники. Например, на лопастях турбины