

Ф ИЗИКИ И Т ЕХНИКИ

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

Практика
прецизионной
лазерной обработки



ТЕХНОСФЕРА

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 лазерной 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

Раздел 1. История развития лазерной прецизионной размерной обработки и современные области ее применения	24
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

Раздел 2. Поглощение лазерного излучения	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
Раздел 3. Лазерное сверление отверстий импульсным излучением свободной генерации	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

Раздел 4. Сверление и резание ультракороткими импульсами	212
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
Раздел 5. Лазерное резание	302
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

Раздел 6. Повышение точности и качества

лазерной обработки отверстий	397
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

Раздел 7. Лазерное фрезерование, термораскалывание

и технология STEALTH DICING	441
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
Раздел 8. Некоторые аспекты практики лазерного резания в среде воздуха и нейтральных газов	495
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 ₂ -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

Раздел 9. Особенности лазерного резания в среде кислорода	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»

Раздел 10. Основные характеристики ЛТУ	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 портальными 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

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 CO_2 -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 CO_2 -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) CO₂-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 CO₂-лазером и прошивочное скрайбирование импульсным CO₂-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 требовал решения 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 ± 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 введен 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 введен 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 ± 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 ~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 ± 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 катод, изготавливаемом из специальных марок стали толщиной 0,1 мм, необходимо было сверлить регулярные матрицы в несколько тысяч отверстий диаметром 100 ± 2 мкм и с координатной точностью не менее ± 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).

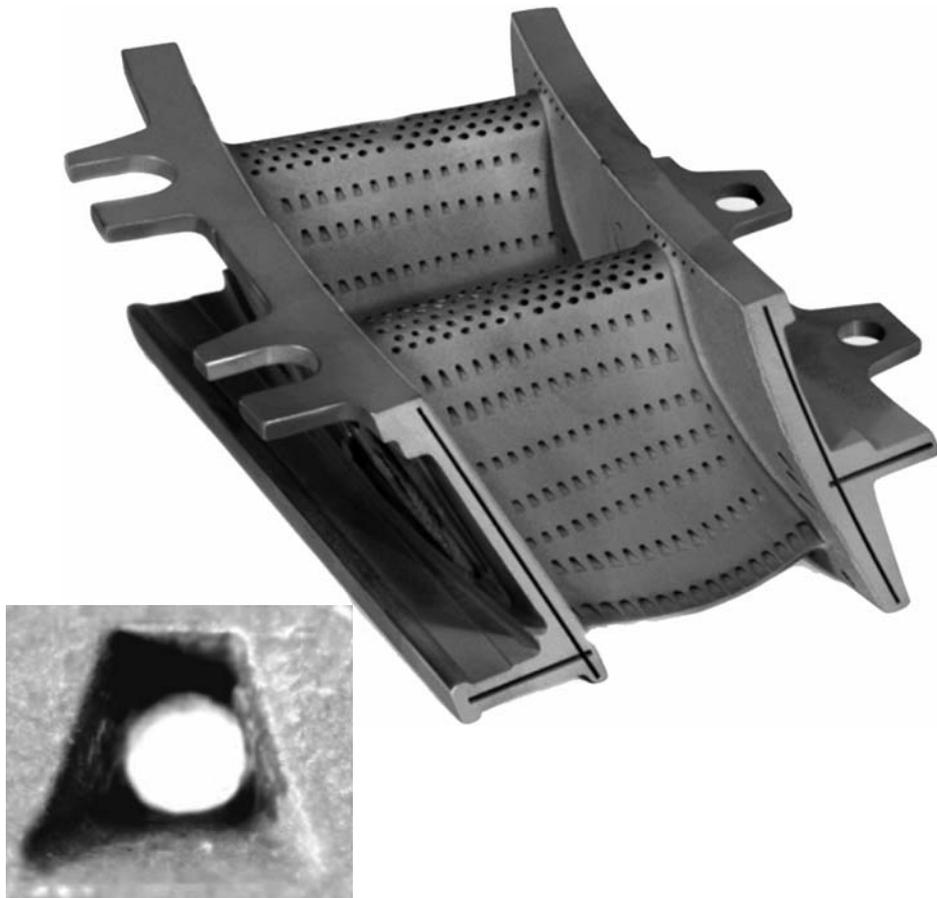


Рис. 1.1. Сверление и профилирование охлаждающих отверстий в лопатке ГТД и увеличенное изображение диффузора с проработанным аэродинамическим профилем

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/см², 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 ± 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 производителем 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].

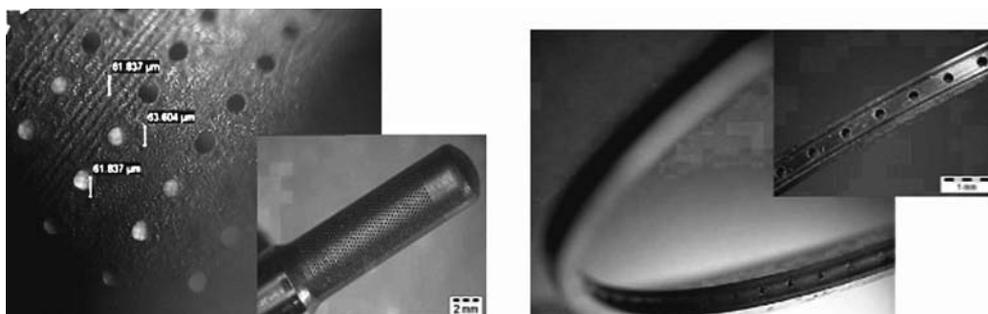
На рис. 1.3 приведены фото фильтра (слева) и кольцевой обечайки (справа) с отверстиями, изготовленными с помощью лазеров серий KLS 246 и FLS 552 по технологии Lasag.

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)

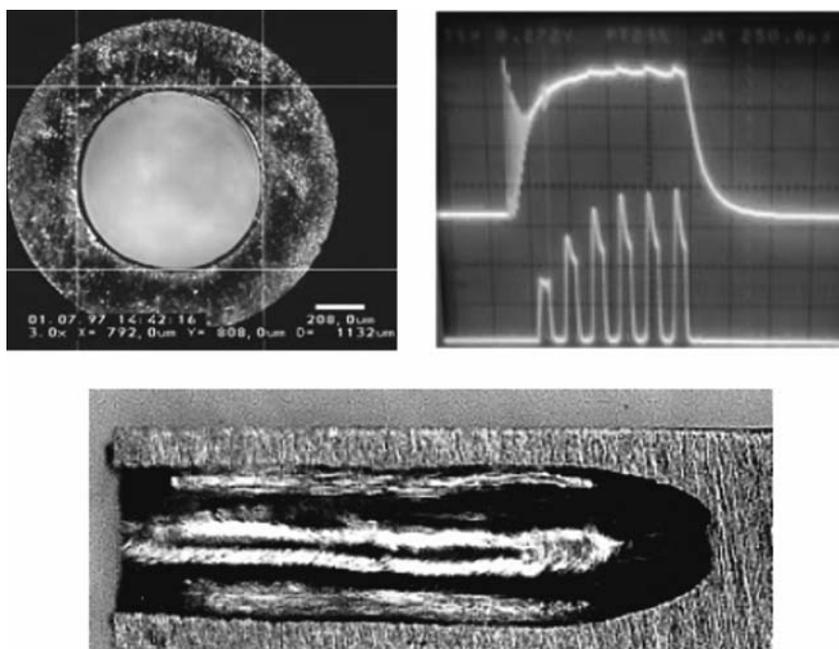


Рис. 1.4. Одноимпульсное сверление отверстий в торце тонкой офтальмологической иглы из нержавеющей стали

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.

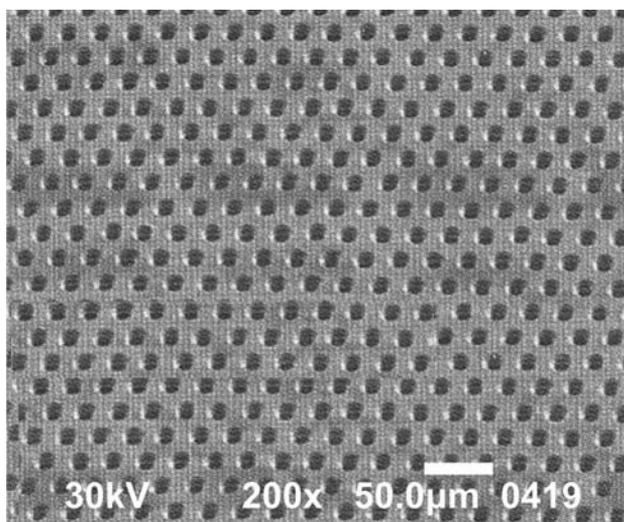


Рис. 1.5. Перфорация отверстий диаметром 30 мкм и с шагом 50 мкм в нержавеющей стали толщиной 30 мкм

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 λ , равна 70–120 мкДж, что обеспечивает абляцию, равную 60 мм³/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 5×10^6 Вт/см² 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 CO₂-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 CO₂-лазеров.

Качество импульсной резки твердотельными лазерами многих черных и цветных металлов и ряда диэлектриков во многих случаях значительно превосходило результаты, получаемые при резке CO₂-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