

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., 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, Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г.
© 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	76
1.6. Лазерное прецизионное фрезерование на современном этапе	80
Литература	83

Часть 2. Закономерности лазерного сверления и резания

Раздел 2. Поглощение лазерного излучения	87
2.1. Поглощение лазерного излучения металлами	88
2.2. Поглощение лазерного излучения полупроводниками.	92
2.3. Взаимодействие импульсного излучения свободной генерации с диэлектриками, не имеющими собственного поглощения	96
2.3.1. Начальный этап взаимодействия	96
2.3.2. Образование и состав поглощающего слоя.	102
2.3.3. Пороговая плотность мощности	109
2.3.4. Образование и состав поглощающего слоя в алмазе	112
2.4. Поглощение излучения импульсов наносекундной длительности	115
2.5. Поглощение излучения импульсов пико- и фемтосекундного диапазона длительности.	118
2.6. Взаимодействие лазерного излучения с полимерами	123
Литература.	134
Раздел 3. Лазерное сверление отверстий импульсным излучением свободной генерации	136
3.1. Закономерности формирования отверстий при лазерном сверлении	137
3.1.1. Начальный этап формирования.	137
3.1.2. Средний этап формирования.	146
3.1.3. Конечный этап формирования	158
3.2. Экранирование на факеле, образованном действием импульсного излучения	167
3.3. О напряжениях, возникающих в зоне лазерного сверления от действия импульсов свободной генерации	180
3.3.1. Экспериментальное исследование поля напряжений	180
3.3.2. Теоретический анализ поля термонапряжений	186
3.4. Влияние частоты повторения импульсов на формообразование отверстий.	201
Литература.	211

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, привносимые 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 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 STHEALTH 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.	493
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 СО 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 порталными кинематическими системами (серия МЛ35 и МЛП35)	656
10.4. Лазерные установки, предназначенные для подгонки резисторов (серия МЛ5)	664
Литература.	671
Приложения	
1. Символы, используемые в книге.	673
2. Таблица теплофизических констант	676
3. Параметры лазерного излучения и его фокусировка	677