

# 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 nano-, piko- 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>	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
<b>Раздел 5. Лазерное резание . . . . .</b>	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

<b>Раздел 6. Повышение точности и качества лазерной обработки отверстий . . . . .</b>	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 излучения . . . . .	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, термораскальвание и технология STEALTH DICING . . . . .</b>	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

<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
<b>Литература . . . . .</b>	637
 <b>Часть 4. Лазерные технологические установки для прецизионной обработки, производимые НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»</b>	
<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 порталыми кинематическими системами (серия МЛ35 и МЛП35) . . . . .	656
10.4. Лазерные установки, предназначенные для подгонки резисторов (серия МЛ5) . . . . .	664
<b>Литература . . . . .</b>	672
 <b>Приложения</b>	
1. Символы, используемые в книге . . . . .	673
2. Таблица теплофизических констант . . . . .	676
3. Параметры лазерного излучения и его фокусировка . . . . .	677