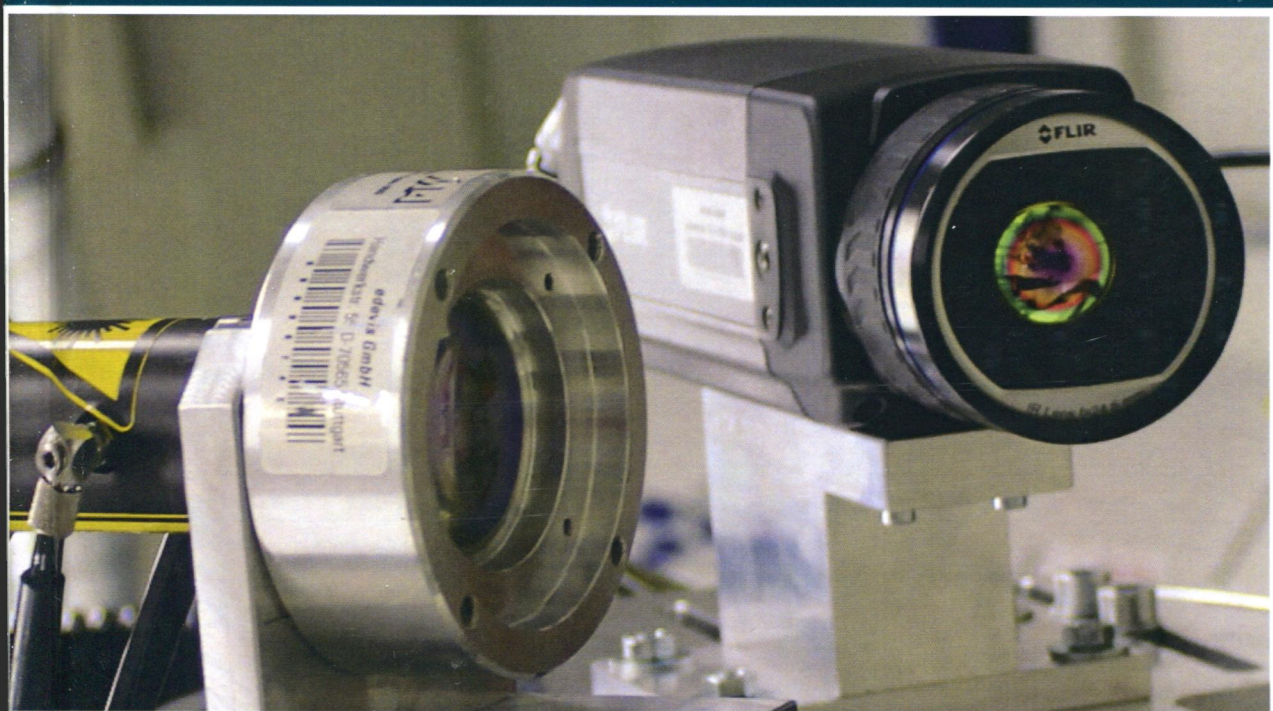


СКВОРЦОВ Л.А.

ОСНОВЫ ФОТОТЕРМИЧЕСКОЙ
РАДИОМЕТРИИ И ЛАЗЕРНОЙ
ТЕРМОГРАФИИ



ТЕХНОСФЕРА



М О Т О Н И К И Ф О Т О Н И К И

Л.А. Скворцов

Основы фототермической
радиометрии и лазерной
термографии

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2017

УДК 543.52 + 621.373

ББК 22.34

С42

Рецензенты:

Проскурин М.А. – д.х.н., профессор МГУ им. М.В. Ломоносова

Свиридов А.П. – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ФНИЦ

«Кристаллография и фотоника» РАН

С42 Скворцов Л.А.

Основы фототермической радиометрии и лазерной термографии

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 220 с. ISBN 978-5-94836-493-3

В книге содержится последовательное изложение принципов фототермической радиометрии/спектроскопии и лазерной термографии – перспективного направления в спектроскопии и тепловидении. В основе нового метода исследований лежит радиометрическая регистрация поглощенной энергии в исследуемых средах при воздействии на них лазерного излучения. Подробно излагается современное состояние и перспективы развития нового направления, его преимущества и границы применимости по сравнению с другими фототермическими методами. Рассмотрены теоретические основы метода модуляционной и импульсной фототермической радиометрии, ее различные модификации, включая резонансную и *rimpr-probe* фототермической радиометрию и термографию. Приводятся многочисленные примеры практической реализации фототермической радиометрии и лазерной термографии в различных областях науки и техники, в частности для дистанционного измерения температуры объектов, исследования слабопоглощающих сред, дистанционного обнаружения и идентификации следовых количеств вещества, неразрушающего контроля материалов и покрытий, измерения их теплофизических параметров. Обсуждаются вопросы, связанные с особенностями применения метода для контроля качества полупроводниковых материалов, например, в части обнаружения подповерхностных дефектов и примесей, измерения их концентрации и энергии активации. Особое внимание в книге уделяется возможностям метода применительно к таким практически значимым областям, как медицина и биология.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов, работающих в области спектроскопии, лазерной физики, химии, биологии и также может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов соответствующих специальностей.

Ключевые слова: фототермические методы, фототермическая радиометрия, резонансная фототермическая радиометрия, *rimpr-probe* фототермическая спектроскопия, лазерная термография, тепловые волны, плазменные волны в полупроводниках, дистанционные измерения, неразрушающий контроль, фототермическая радиометрия и имиджинг биологических тканей.

Автор выражает благодарность рецензентам за интерес, проявленный к рукописи и сделанные ценные замечания.

УДК 543.52 + 621.373

ББК 22.34

© Скворцов Л.А., 2017

© АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление, 2017

ISBN 978-5-94836-493-3

Содержание

Предисловие	10
Глава 1. Краткий обзор методов исследования, основанных на фототермическом эффекте	14
1.1. Фотоакустический метод	14
1.2. Дефлекционный метод (мираж-эффект)	15
1.3. Метод термолинзы	16
1.4. Поверхностная термическая линза	19
1.5. Метод фототермической радиометрии	20
1.6. Метод фототермического отражения	21
1.7. Интерференционный метод	22
Глава 2. Основы классической радиометрии	24
2.1. Радиометрические величины и их количественные соотношения	24
2.2. Законы теплового излучения	27
2.2.1. Излучательная и поглощательная способность тел	27
2.2.2. Закон Кирхгофа	30
2.2.3. Закон Планка	32
2.2.4. Закон смещения Вина и закон Стефана – Больцмана	33
Глава 3. Общие сведения о фотоприемниках и радиометрических свойствах инфракрасной системы	36
3.1. Основные характеристики приемников излучения	36
3.2. Параметры, характеризующие радиометрические свойства инфракрасной системы	38
Глава 4. Теоретическое обоснование метода фототермической радиометрии и лазерной термографии	40
4.1. Диффузионные волны	40
4.1.1. Введение	40
4.1.2. Математика диффузионных волн	41
4.1.3. Физика диффузионных волн	42
4.2. Концепция тепловых волн	44
4.2.1. Импульсные и периодически модулированные тепловые волны	45
4.2.2. Свойства тепловых волн	46

4.3. Плазменные волны носителей заряда в полупроводниках	47
4.3.1. Происхождение плазменных волн	47
4.3.2. Свойства плазменных волн и их детектирование	48
Глава 5. Измерение теплофизических параметров тел с помощью методов фототермической радиометрии и лазерной термографии	50
5.1. Введение	50
5.2. Эффект фототермического «насыщения»	52
5.3. Метод лазерной вспышки	53
5.4. Метод термоволновой интерферометрии (TWI-метод)	56
5.5. Термографические методы	58
5.5.1. Термографический метод I (регистрация пространственного распределения температуры при нагреве поверхности ограниченным пучком)	58
5.5.2. Термографический метод II (регистрация температуры вдоль стержня при возбуждении в нем поперечных тепловых волн)	61
5.5.3. Термографический метод III (конфигурация «отражения» при импульсном нагреве, односторонний метод вспышки)	63
5.6. Выводы	65
Глава 6. Дистанционное измерение температуры тел при лазерной активации поверхности	67
6.1. Физические основы измерения температуры поверхности тел с помощью лазерной фототермической радиометрии	67
6.1.1. Основные проблемы классической пирометрии	67
6.1.2. Внешняя модуляция собственного теплового потока как способ устранения влияния фоновых сигналов	69
6.2. Особенности измерения температуры при воздействии на объект модулированного по амплитуде лазерного излучения	71
6.2.1. Физические принципы, лежащие в основе метода	71
6.2.2. Область высоких температур ($T > 750$ К)	79
6.2.3. Область низких температур (260—340 К)	81
6.3. Особенности измерения температуры при импульсном режиме облучения	82
6.3.1. Физические принципы, лежащие в основе метода	82
6.3.2. Временная зависимость фототермического сигнала	84

6.3.3. Влияние экспериментальных параметров на результат измерений	89
6.3.4. Результаты измерений и их обсуждение	91
6.4. Измерение температуры поверхности путем анализа кривой затухания фототермического сигнала	95
Глава 7. Неразрушающий контроль	98
7.1. Применение лазерной термографии для обнаружения поверхностных трещин	98
7.1.1. Введение	98
7.1.2. Особенности активной термографии для неразрушающего контроля материалов при использовании лазерного (точечного) источника нагрева	99
7.1.3. Практическая реализация метода лазерной термографии	101
7.1.4. Моделирование теплового поля при наличии вертикальной трещины	104
7.1.5. Визуализация трещины при наличии теплового фона от лазерного воздействия	108
7.2. Неразрушающий контроль силы адгезии гальванических покрытий и обнаружение дефектов отслоения	111
7.2.1. Введение	111
7.2.2. Основные представления о распространении тепловых волн на границе раздела сред	113
7.2.3. Измерение толщины упрочняющего слоя на поверхности стали	114
7.2.4. Контроль силы адгезии гальванически осажденных слоев	116
7.2.5. Обнаружение дефектов отслоения гальванических покрытий	117
7.3. Особенности применения термографической системы с лазерным сканирующим устройством	119
7.3.1. Численное 2D-моделирование тепловых полей, индуцируемых лазерным воздействием	119
7.3.2. Пространственное (поперечное) разрешение при лазерном сканировании	121
7.3.3. Выводы	121
Глава 8. Измерение поглощения в оптических материалах и покрытиях	123
8.1. Введение	123

8.2. Теоретическое рассмотрение метода фототермической радиометрии применительно к измерению малых поглощений	124
8.3. Измерение потерь на поглощение в оптических покрытиях	129
8.4. Измерение объемного коэффициента поглощения в прозрачных материалах	130
8.5. Оценка толщины излучающего тепловой поток слоя вещества и верхней граничной частоты повторения лазерных импульсов. Границы применения метода	131
8.6. Внутррезонаторная лазерная фототермическая радиометрия	134
8.6.1. Измерение поглощения в образцах с просветляющими покрытиями	134
8.6.2. Измерение поглощения в образцах без покрытий	137
8.6.3. Измерение поглощения в зеркальных покрытиях	138
8.7. Измерение поверхностного поглощения в оптических материалах	140
8.7.1. Введение	140
8.7.2. Метод измерений	140
8.7.3. Пример практической реализации метода	141
8.8. Неразрушающий контроль лазерной прочности оптических покрытий	143
Глава 9. Двухлучевая (pump-probe) лазерная фототермическая радиометрия	147
9.1. Введение	147
9.2. Оценка чувствительности метода	148
9.3. Пример реализации метода pump-probe фототермической радиометрии	149
9.4. Выводы	151
Глава 10. Резонансная инфракрасная фототермическая спектроскопия	153
10.1. Введение	153
10.2. Лазерные источники излучения в среднем и дальнем ИК-диапазоне спектра	154
10.3. Примеры практической реализации метода активного формирования гипер/мультиспектральных изображений в спектре теплового излучения	157
10.3.1. Дистанционное обнаружение следовых количеств вещества с помощью квантово-каскадных лазеров	157
10.3.2. Применение CO ₂ -лазера для практической реализации метода	160

10.4. Оценка чувствительности метода	163
10.4.1. Расчет температуры нагрева	163
10.4.2. Расчет мощности теплового излучения	164
10.4.3. Расчет минимальной концентрации вещества и дальности обнаружения	165
10.6. Выводы	167
Глава 11. Применение лазерной фототермической радиометрии для исследования полупроводниковых материалов	169
11.1. Введение	169
11.2. Особенности применения метода для полупроводниковых материалов	170
11.3. Практическая реализация метода на примере МОП-структур	171
11.4. Измерение времени жизни носителей заряда и контроль наличия примесей	173
11.5. Метрология ионной имплантации	174
11.6. Выводы	177
Глава 12. Применение лазерной фототермической радиометрии для медицинской диагностики и лечения заболеваний	178
12.1. Введение	178
12.2. Импульсная лазерная фототермическая радиометрия как метод диагностики и лечения заболеваний	179
12.3. Примеры практической реализации метода при лечении и диагностике заболеваний	182
12.3.1. Диагностика родимых пятен «цвета портвейна» (винное пятно)	182
12.3.2. Определение степени гидратации кожи	183
12.3.3. Диагностика структурных преобразований ткани под действием лазерного излучения в процессе хирургического вмешательства	185
12.3.4. Лазерная инженерия хрящей	189
12.3.5. Фототермическая томография	190
12.4. Выводы	191
Заключение	193
Литература	195