



装备科技译著出版基金



ELSEVIER
爱思唯尔

Handbook of Terahertz Technology for Imaging,
Sensing and Communications

+ 太赫兹成像、+ 传感 + 及通信技术手册

【加拿大】达里宇舒·萨义德齐亚(Daryoosh Saeedkia) 编著

陈樟 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

太赫兹成像、传感及通信技术手册

Handbook of Terahertz Technology for Imaging,
Sensing and Communications

[加拿大] 达里宇舒·萨义德齐亚 (Daryoosh Saeedkia) 编著

陈樟	杨蒿	罗雪梅	王亚军	
刘超	安宁	李志强	李倩	
王瑞涛	王文杰	曾建平	童小东	译
蒋均	刘伟			

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2014-140 号

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹成像、传感及通信技术手册/(加)萨义德齐亚(Saeedkia,D.)编著;陈樟等译. —北京:国防工业出版社,2016.5

书名原文:Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications

ISBN 978-7-118-10692-3

I. ①太… II. ①萨… ②陈… III. ①电磁波-成像-技术手册 ②电磁传感器-技术手册 ③电磁辐射-无线电通信-技术手册 IV. ①O441.4-62 ②TP212-62 ③TN92-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第066384号

Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications by

Daryoosh Saeedkia ISBN 978-0-85709-235-9

Copyright © Woodhead Publishing Limited, 2013.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier(Singapore)

Pte Ltd. and National Defense Industry Press

Published in China by National Defense Industry Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. .

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan.

Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this

Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体版由Elsevier(Singapore)Pte Ltd. 授予国防工业出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有Elsevier防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 29½ 字数 676 千字

2016年5月第1版第1次印刷 印数 1—1500册 定价 132.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

本书针对太赫兹技术最有优势、近年来得以快速发展的三个应用领域——成像、传感及通信,对太赫兹技术应用所涉及的基础知识、最新技术进展和材料研发现状,以及多个行业的应用情况进行了较为全面的介绍。本书没有大量繁琐的太赫兹基础理论介绍,直接从技术应用角度切入,内容新颖、条理清晰、实用性强,且包括全面、翔实的参考文献列表,能够为致力于太赫兹技术工程实用化的科技人员提供便利的参考。同时,作为一本全面介绍太赫兹成像、传感及通信技术的书籍,本书也十分适合于太赫兹领域的广大研究人员以及具有一定专业基础、有志于从事太赫兹研究的入门者参考使用。

本书编者 Daryoosh Sdeedkia 先生在他多年的科技研究与工程实践的基础上,组织美、加、德、英、日、韩等多个国家的,跨越产、学、研三界的太赫兹应用技术专家及学者,联合编撰了本书。它全面系统地展示了太赫兹技术在成像、传感和通信领域应用相关的方方面面,代表了国际上太赫兹科学与技术的应用发展水平和趋势,是从事太赫兹应用技术研究科技人员所迫切需要的权威技术指南,同时也是广大读者全方位了解太赫兹成像、传感和通信技术的基础知识、最新进展、应用现状及发展趋势的绝佳读本。

全书共 22 章,中国工程物理研究院(简称中物院)电子工程研究所陈樟翻译了第 3 章、第 5 章、第 7 章、第 13~14 章、第 17 章,王亚军翻译了第 19~20 章,罗雪梅翻译了第 18 章,中物院科技信息中心杨蒿翻译了第 1~2 章、第 4 章、第 6 章、第 12 章、第 16 章、第 21~22 章,中物院太赫兹中心集成电路研究室刘超、安宁、李志强、李倩翻译了第 8 章,王瑞涛翻译了第 9 章,王文杰、曾建平、童小东、李倩翻译了第 10 章,蒋均翻译了第 11 章,刘伟翻译了第 15 章。陈樟对全部译稿进行了统稿,并与杨蒿和罗雪梅一起进行了审校。由于译者水平及经验所限,译文中的不妥和疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

陈樟
2015 年 7 月

前 言

过去的 20 年见证了太赫兹科学技术领域的空前发展。那些传统上应用于射电天文及等离子体诊断研究的既庞大又昂贵的太赫兹实验室设备,已经进化成商业化的成套系统产品,让科技人员得以在太赫兹波下重新审视他们的科学问题。目前,太赫兹传感与成像系统已有商业产品,太赫兹无线通信即将登场。让我们额手称庆一个新纪元的到来:这就是太纪元!

人们已开发了多种紧凑的太赫兹源和检测器,用于产生、检测及操纵相干太赫兹信号,量子级联激光器、倍频链及光导光混频器等太赫兹源在转换效率和加工封装技术方面取得了巨大进展。非制冷高灵敏太赫兹检测阵列技术的进步使得室温视频速率太赫兹成像成为可能。太赫兹表面等离子激元与近场传感器得以深入研究,它们在生物传感与太赫兹集成电路方面的应用已经展现。太赫兹成像系统正成为工厂生产线上进行实时工艺与质量控制的得力工具。与此同时,其他一些被认为是太赫兹技术潜在市场的工业应用领域也受到人们的关注和研究。

本书适合于那些想对这一发展最快也最为激动人心的研究领域有更多了解的人们,也适合于那些在过去的几年中为太赫兹技术进步作出贡献的人们。对于后者,本书可用作太赫兹技术领域最新进展的综述合集,也可作为太赫兹科学基础理论的参考书籍;对于太赫兹领域的入门者,每一章都介绍了太赫兹科学与技术的一个方面,并提供了全面的参考文献列表以供进一步学习。

在此,我要感谢所有撰稿人对本书的支持。希望广大读者能够喜欢这本书。

Daryoosh Saeedkia

加拿大安大略省,滑铁卢

目 录

第一部分 太赫兹成像、传感及通信技术基础

第1章 用于太赫兹波产生及检测的光电技术	2
1.1 引言	2
1.1.1 太赫兹源技术	2
1.1.2 光电太赫兹源	3
1.2 太赫兹探测器技术	4
1.2.1 零差探测器	4
1.2.2 外差探测器	4
1.2.3 光电探测器	5
1.3 太赫兹光导天线产生太赫兹信号	5
1.3.1 连续波模式	6
1.3.2 脉冲模式	8
1.3.3 库仑屏蔽效应和辐射屏蔽效应	9
1.4 太赫兹光导天线探测太赫兹信号	9
1.4.1 连续波模式	9
1.4.2 脉冲模式	10
1.4.3 连续波模式与脉冲模式的对比	10
1.5 非线性晶体中的参量互作用	11
1.6 非线性晶体中的差频混频	12
1.7 结论	14
1.8 参考文献	14
第2章 太赫兹波在塑料波导中的传输与传播	20
2.1 引言	20
2.2 基于塑料的太赫兹光纤光学的主要挑战	20
2.2.1 损耗	21
2.2.2 色散	24
2.2.3 亚波长光纤的封装	25
2.3 基于亚波长光纤的器件	27
2.3.1 基于光纤的太赫兹成像	28
2.3.2 定向耦合器和无损切断技术	28

2.4	空芯光纤	31
2.4.1	反谐振反射光纤	31
2.4.2	布拉格光纤	32
2.5	太赫兹复合材料	36
2.6	太赫兹波导的实验表征	38
2.7	结论	39
2.8	致谢	41
2.9	参考文献	41
第3章	太赫兹表面等离子激元基础	45
3.1	引言	45
3.2	Drude 模型	46
3.3	平面上的表面等离子激元	48
3.3.1	色散	48
3.3.2	表面等离子激元的特征长度:波长、传播长度及衰减长度	51
3.4	多层结构	54
3.4.1	薄层中的长程及短程表面等离子激元	54
3.5	太赫兹等离子激元的新趋势	57
3.5.1	穿孔金属上设计的表面等离子激元	58
3.5.2	局域表面等离子激元	58
3.6	致谢	59
3.7	参考文献	59
第4章	太赫兹近场成像及传感基础	66
4.1	引言	66
4.1.1	近场和远场	66
4.1.2	感生电偶极矩和感生磁偶极矩的辐射	67
4.2	太赫兹近场测量	68
4.3	不同亚波长孔的近场	71
4.3.1	圆孔近场成像	71
4.3.2	圆孔的有效偶极矩	72
4.3.3	方孔近场成像	74
4.3.4	矩形孔近场成像	74
4.3.5	矩形孔(纳米级宽度)近场成像	77
4.4	基尔霍夫近场估算公式	78
4.4.1	基尔霍夫公式和近场与远场间关系	78
4.4.2	纳米狭缝和纳米天线的近场估算	79
4.5	结论	82
4.6	参考文献	83

第 5 章 太赫兹场效应管	88
5.1 引言	88
5.2 低维结构中的等离子体波	88
5.2.1 体等离子体波	89
5.2.2 二维(2D)电子气	89
5.2.3 栅控 2D 电子气	90
5.2.4 线中的等离子体波	90
5.3 直流场效应晶体管稳态的不稳定性	91
5.3.1 倾斜模式和边缘发射	92
5.4 FET 检测太赫兹辐射	93
5.4.1 高频体制	93
5.4.2 低频体制	94
5.4.3 特征长度	94
5.4.4 非线性机制	95
5.4.5 简化理论	95
5.4.6 现象学方法	96
5.5 FET 的太赫兹辐射研究	97
5.5.1 回旋共振光谱仪	97
5.5.2 傅里叶变换光谱仪	98
5.5.3 太赫兹发射阈值	98
5.5.4 边缘发射	98
5.5.5 可调发射	99
5.5.6 讨论	100
5.6 FET 太赫兹检测的实验研究	101
5.6.1 实验装置	101
5.6.2 光响应建模	101
5.6.3 栅极漏电流	102
5.6.4 温度依赖性	102
5.6.5 负载效应	103
5.6.6 最优长度选择	103
5.6.7 硅 FET 太赫兹检测	104
5.6.8 室温成像	105
5.6.9 谐振检测	105
5.6.10 谐振谱线展宽	107
5.6.11 沟道窄化	107
5.6.12 电流窄化	107
5.6.13 强磁场研究	108

5.7	结论	109
5.8	致谢	109
5.9	参考文献	109
第6章	太赫兹无线通信	113
6.1	引言	113
6.2	太赫兹无线通信的发展动因	113
6.3	通信中的大气传输	115
6.3.1	太赫兹辐射的方向性	115
6.3.2	闪烁对链路的恶化	116
6.3.3	包括雾、雨及雪在内的大气和自由空间衰减	117
6.4	太赫兹通信信道建模	119
6.4.1	室内	119
6.4.2	卫星-卫星/卫星-地面	121
6.4.3	隐蔽战场	124
6.5	太赫兹通信硬件:源和检测器	126
6.5.1	光电	126
6.5.2	微波倍频器	129
6.5.3	量子级联激光器	130
6.5.4	太赫兹集成电路	131
6.6	太赫兹调制器	132
6.6.1	决定于太赫兹发生器的调制方式	132
6.6.2	肖特基二极管混频系统	132
6.6.3	独立于太赫兹发生器的调制方式	134
6.6.4	用于太赫兹波束整形和控制的调制器	134
6.7	太赫兹信号调制格式	136
6.8	太赫兹通信系统实例	136
6.8.1	太赫兹光电通信系统	137
6.8.2	MMIC 集成电路系统	140
6.8.3	量子级联激光器系统	141
6.8.4	微波倍频系统	141
6.9	太赫兹通信链路上的雨、雾和大气闪烁的实验表征	142
6.10	未来趋势	147
6.11	更多参考信息	148
6.12	致谢	148
6.13	参考文献	148

第二部分 太赫兹技术最新进展

第7章	太赫兹生物传感技术	157
-----	-----------	-----

7.1	引言	157
7.2	太赫兹传感水动力学	157
7.3	蛋白质传感	158
7.4	依赖结合态的传感	160
7.5	太赫兹频段的生物分子特征谐振	161
7.6	水介导太赫兹分子成像	163
7.7	结论	163
7.8	致谢	163
7.9	参考文献	164
第8章	太赫兹阵列成像仪:基于等离子体波的硅基 MOSFET 检测器	
	实现太赫兹相机	167
8.1	引言	167
8.2	阻性混频——准静态分析	168
8.3	等离子体混频——流体动力学分析	169
8.3.1	器件模型	170
8.3.2	阻性混频机制	170
8.3.3	分布式阻性自混频体制	171
8.3.4	等离子体混频体制	173
8.4	互补型金属氧化物半导体(CMOS)场效应管用作太赫兹探测器的 相关技术、设计及实现	175
8.4.1	互补型金属氧化物半导体(CMOS)技术在太赫兹焦平面的应用	175
8.4.2	CMOS 天线的集成	176
8.4.3	探测器设计和实现	177
8.5	场效应管探测器的表征和优化	178
8.5.1	电学和光学响应率	179
8.5.2	噪声等效功率(Noise - Equivalent Power, NEP)	180
8.5.3	响应时间	181
8.5.4	阻抗匹配和调谐的局限	181
8.5.5	一种器件表征方法	182
8.5.6	MOSFET 太赫兹探测器结果	182
8.5.7	电流偏置响应率的增强	184
8.6	太赫兹相机的发展	185
8.6.1	一个 50 像素的阵列	185
8.6.2	10 千像素虚拟相机的直接实时成像仿真	186
8.6.3	使用 10 千像素虚拟相机仿真的实时相干成像	187
8.7	太赫兹成像的其他焦平面技术概述	189
8.8	致谢	190

8.9	参考文献	190
第9章	亚波长等离子体结构中的太赫兹谐振场增强	194
9.1	引言	194
9.2	太赫兹频率下表面等离子激元的基本原理	195
9.3	太赫兹波通过金属孔阵列的异常传输	195
9.3.1	通过光学薄金属孔径阵列的谐振传输特性	196
9.3.2	与金属介电常数相关的表面波传输特性	198
9.3.3	表面等离子体传感器:介质层对金属孔径阵列的影响	200
9.4	太赫兹表面等离子激元的有源控制	202
9.4.1	硅光子晶体到金属孔径阵列的有源变换	202
9.4.2	具有超材料属性的混合等离子开关器件	205
9.4.3	超导等离子体	206
9.5	结论	209
9.6	参考文献	209
第10章	光纤耦合太赫兹时域光谱系统	212
10.1	引言	212
10.2	光纤导波	215
10.3	实验布局及系统特征	217
10.3.1	非线性效应	221
10.3.2	组件,测量头和系统	222
10.3.3	系统表征	223
10.4	基于光纤的太赫兹系统测量结果	224
10.4.1	角度相关性测试	224
10.4.2	在脉冲磁场下的回旋共振的高速测量	226
10.4.3	光纤耦合单片集成电路衰减全反射(ATR)传感器	227
10.5	光纤耦合太赫兹时域光谱与其他系统及技术的对比	229
10.5.1	基于光纤的脉冲系统——Picometrix Inc	229
10.5.2	1.5 μm 泵浦波长下的脉冲系统	230
10.5.3	光纤连续波(CW)系统	232
10.6	未来趋势及结论	233
10.7	参考文献	233
第11章	最新的太赫兹连续波光混频系统	236
11.1	引言	236
11.2	连续波发射机和探测器技术	237
11.2.1	砷化镓器件	238
11.2.2	InGaAs/InP 器件	243
11.3	相干信号检测	247

11.3.1	光电调制器的相位变化	249
11.3.2	在光纤拉伸器中的相位变化	249
11.3.3	在控制频率步长相位变化	250
11.4	激光源	251
11.4.1	小节双分布反馈激光器(DFB)	251
11.4.2	双模和多模激光二极管	253
11.4.3	双波长光学参量振荡器	255
11.5	光混频连续波太赫兹系统选定的应用	256
11.5.1	痕量气体检测	256
11.5.2	固体的频谱分析	257
11.5.3	成像	258
11.6	结论	260
11.7	致谢	260
11.8	参考文献	260
第 12 章	太赫兹近场成像及传感的新技术	270
12.1	引言	270
12.2	最新太赫兹近场方法	271
12.3	新型微加工太赫兹近场探针	272
12.4	纳米光子学二阶非线性光波导的太赫兹近场探测分析	275
12.5	基于太赫兹时域反射测量法的集成电子学结构失效分析	277
12.6	用于光伏材料检测的自由载流子浓度高分辨成像	281
12.7	结论及未来趋势	284
12.8	参考文献	284
第 13 章	太赫兹纳米器件与纳米系统	290
13.1	引言	290
13.2	纳米级太赫兹探测器	290
13.2.1	超导体与半导体	291
13.2.2	碳纳米管	291
13.3	太赫兹近场成像仪	296
13.3.1	太赫兹近场成像	296
13.3.2	集成太赫兹近场成像仪	298
13.4	结论	301
13.5	致谢	301
13.6	参考文献	301
第 14 章	太赫兹集成器件与系统	305
14.1	太赫兹集成生物传感器芯片	305
14.1.1	传输线传感器	305

14.1.2	传输线传感器的结构与设计	306
14.1.3	太赫兹生物传感芯片的实验与结果	307
14.2	集成贴片天线的太赫兹振荡器	309
14.2.1	太赫兹半导体振荡器	309
14.2.2	RTD 振荡器设计	309
14.3	共振隧穿二极管结果与讨论	310
14.4	参考文献	312
第 15 章	基于频率梳技术的太赫兹频率计量	315
15.1	引言	315
15.2	频率梳相干频率链接	316
15.3	太赫兹梳参考频谱分析仪	317
15.3.1	工作原理	318
15.3.2	实验装置	319
15.3.3	测试结果	320
15.4	光频梳参考太赫兹频率综合器	322
15.4.1	工作原理	323
15.4.2	实验装置	324
15.4.3	实验结果	326
15.5	太赫兹梳参考频谱测量仪	328
15.5.1	工作原理	329
15.5.2	实验装置	330
15.5.3	测试结果	330
15.6	结论及未来趋势	332
15.7	参考文献	332
第 16 章	太赫兹应用半导体材料的发展	335
16.1	引言	335
16.1.1	太赫兹辐射	335
16.2	宽带脉冲太赫兹辐射的产生与探测	336
16.3	光混频技术产生连续太赫兹辐射	338
16.4	半导体光导材料	339
16.4.1	低温 GaAs	339
16.4.2	ErAs:GaAs 超晶格	343
16.4.3	LT-In _{0.53} Ga _{0.47} As-In _{0.52} Al _{0.48} As	344
16.4.4	ErAs:In _{0.53} Ga _{0.47} As-In _{0.52} Al _{0.48} As	348
16.5	结论	348
16.6	致谢	349
16.7	参考文献	349

第三部分 太赫兹技术的应用

第 17 章	太赫兹技术在层析成像和材料光谱分析中的应用:综述	354
17.1	引言	354
17.2	层析成像技术的应用	355
17.2.1	计算机辅助层析成像技术	355
17.2.2	飞行时间层析成像技术	357
17.3	粉末状化学制品的定量分析	360
17.4	结论	364
17.5	参考文献	365
第 18 章	太赫兹技术在航空航天工业中的应用	366
18.1	引言	366
18.2	基于透射式太赫兹时域光谱技术的飞机复合材料无损检测	367
18.2.1	理论与实验	368
18.2.2	结果与讨论	369
18.3	基于反射式太赫兹时域光谱技术的飞机复合材料无损检测	372
18.3.1	理论与实验	373
18.3.2	结果与讨论	374
18.4	航空应用中的太赫兹连续波无损成像	381
18.4.1	理论与实验	381
18.4.2	结果与讨论	383
18.5	玻璃纤维强化塑料无损成像对比	385
18.5.1	实验过程	385
18.5.2	比较	388
18.6	结论	389
18.7	参考文献	390
第 19 章	太赫兹技术在木制品行业中的应用	392
19.1	引言	392
19.2	概述	393
19.3	木材的结构和形态	395
19.3.1	软木	395
19.3.2	硬木	395
19.3.3	木材的化学成分	396
19.4	木材的远红外特性	397
19.5	太赫兹频段木材特性检测	404
19.6	定向刨花板行业中的太赫兹传感	405
19.6.1	OSB 工艺	405

19.6.2	OSB 工业的挑战	406
19.6.3	太赫兹方法	406
19.6.4	结论	408
19.7	未来趋势	409
19.8	参考文献	410
第 20 章	太赫兹技术在医药行业中的应用	413
20.1	引言	413
20.2	太赫兹时域光谱技术:光谱装置与分析	414
20.2.1	光谱装置	414
20.2.2	样品制备和数据分析	416
20.3	太赫兹时域光谱技术:识别、量化及分析	418
20.3.1	多晶型和水合物的识别和量化	419
20.3.2	固态相变分析	420
20.4	太赫兹时域成像技术:成像装置与分析	422
20.4.1	成像装置	422
20.4.2	数据分析和解释	423
20.4.3	药片和包衣的性能分析	424
20.5	太赫兹时域成像技术:过程监控、光谱成像及化学映射	426
20.5.1	制药过程监控	426
20.5.2	光谱成像和化学映射	428
20.6	结论及未来趋势	430
20.7	致谢	431
20.8	参考文献	431
第 21 章	太赫兹技术在艺术品保护中的应用	437
21.1	引言	437
21.1.1	文物科学中的太赫兹空隙	437
21.1.2	太赫兹波的优点	438
21.2	太赫兹波用于材料分析	438
21.2.1	谱数据库	438
21.2.2	实物的太赫兹光谱学	439
21.2.3	案例研究	440
21.3	太赫兹波用于艺术品内部结构观测	440
21.3.1	利用太赫兹时域光谱学 (THz - TDS) 系统进行无损截面观测	440
21.3.2	THz - TDS 系统应用案例	440
21.4	太赫兹技术的未来发展:一种文物科学研究工具	441
21.5	参考文献	442

第 22 章	太赫兹技术在半导体行业中的应用	443
22.1	引言	443
22.1.1	电 - 光太赫兹脉冲反射仪(EOTPR)原理	444
22.2	电 - 光太赫兹脉冲反射仪特性	446
22.2.1	分辨率	447
22.2.2	上升时间	447
22.2.3	信噪比(SNR)	447
22.2.4	测量范围	447
22.2.5	波形解读	448
22.3	电 - 光太赫兹脉冲反射仪用于故障分析的实例	449
22.3.1	凸点连接错位	449
22.3.2	介质破裂所致断路故障	450
22.3.3	non - wet 凸点	451
22.3.4	基底短路/泄漏故障	451
22.4	结论及未来趋势	452
22.5	参考文献	453

第一部分

太赫兹成像、传感及通信技术基础