

太赫兹感测与成像

Terahertz Sensing and Imaging

张存林 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

太赫兹感测与成像

Terahertz Sensing and Imaging

张存林 张岩 赵国忠 沈京玲 著
王卫宁 胡颖 周庆莉 孙文峰

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹感测与成像 / 张存林等著. —北京:国防工业出版社,2008.1

ISBN 978 - 7 - 118 - 05258 - 9

I. 太... II. 张... III. 电磁波—电磁辐射 IV. 0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 180341 号

※

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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 202 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓名笔画排序)

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵风起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 宋家树

前 言

太赫兹技术被誉为本世纪的又一场“前沿革命”，它已经成为本世纪科研的热门课题，将会极大地改变人类的生活。太赫兹感测与成像是太赫兹技术应用的重要方面，太赫兹技术在实际中的应用几乎都是基于感测与成像而展开的。由于太赫兹本身所具有的独特性质，其应用潜力和功能让红外、微波以及其他波段的电磁波望尘莫及。目前，随着太赫兹技术的飞速发展，新型太赫兹源和相关探测器层出不穷，为太赫兹感测和成像技术转为实用奠定了坚实的基础。虽然到目前为止，还没有真正实现太赫兹感测与成像的实用化和商业化，但是已有越来越多的科研人员投入到这个奇妙的领域中，越来越多的人也想了解这一神奇的“空白科学技术领域”，所以这本初步介绍太赫兹感测与成像的图书也应运而生。

本书综述了太赫兹的各个相关技术及其发展趋势、应用状况，分析了各类太赫兹源和太赫兹探测器的相关原理和构成组件，阐述了各种太赫兹系统的工作原理和组成结构，介绍了太赫兹感测和成像在实际中的各种应用。在此基础之上，重点论述了太赫兹感测与成像在军事和国土安全方面的应用。本书是在作者近几年来从事太赫兹的相关科研工作所获成果，以及借鉴、吸收和总结国内外多个太赫兹领域的相关专家学者和科研人员的一些有价值的研究成果的基础上完成的，力求本书成为一部系统介绍太赫兹及其感测与成像的、通俗易懂且能为读者所能比较容易接受的、有价值的参考书籍。以满足人们对新科学技术的需求，推动太赫兹技术在我国的发展和普及。

全书共十五章。第一章太赫兹波的本性，总体介绍了太赫兹

的相关内容。第二章太赫兹波的产生,比较全面、系统的介绍了各种太赫兹源的产生原理和构造。第三章太赫兹波的探测,综述了各种太赫兹探测器的探测原理和组成构件。第四章太赫兹的时域光谱,分析了各种太赫兹时域光谱系统的工作原理。第五章太赫兹成像,系统地介绍了太赫兹成像系统的各个组成部分,讨论并分析了各种太赫兹成像方式的原理和相关的数据处理。第六章至第十五章分别介绍了太赫兹在各个领域中的应用状况及其发展前景。其中,第八章至第十章重点地介绍了太赫兹在军事领域,国家安全方面所发挥的巨大作用。

本书适用于从事太赫兹、红外、微波、天文和生物医学等领域的工程技术人员,以及大专院校的相关专业的学生和科研人员。

本书的编写出版得到了国防工业出版社的大力支持与资助;杨国桢院士高瞻远瞩在国内率先为我们确立太赫兹研究方向,美国伦斯勒理工大学太赫兹中心主任张希成教授、中科院院士张杰研究员、中科院物理所汪力研究员给予了大力支持,书中部分研究成果是作者在完成国家自然科学基金重大项目“THz 电磁波段的物理、器件及应用研究”取得的,感谢国家自然科学基金及重大项目课题组全体成员;电子科技大学刘盛纲院士、天津大学姚建铨院士给予了大力支持,南京大学吴培亨院士通读了全书提出了很好的建议;作者得到了所在单位首都师范大学物理系北京市太赫兹波谱与成像重点实验室的大力支持;作者的硕、博研究生,特别是牧凯军同学做了大量文字工作,作者对此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,加之时间有限,另外,太赫兹感测与成像技术还处于探索阶段,有些内容还有待于考究,所以错误和不当之处在所难免,写作还比较粗糙,恳请读者批评指正。

目 录

第一章 太赫兹波的本性	1
1.1 引言	1
1.2 太赫兹波的应用	2
1.3 太赫兹波的独特性质	3
1.4 太赫兹波的波动性	6
1.4.1 太赫兹波的干涉	6
1.4.2 太赫兹波的衍射	7
1.5 太赫兹辐射的粒子性	8
第二章 太赫兹波的产生	10
2.1 基于光学效应的太赫兹辐射源	10
2.1.1 光电导天线	11
2.1.2 光整流	12
2.1.3 空气产生太赫兹	14
2.1.4 太赫兹参量源	16
2.1.5 光泵浦太赫兹激光器	19
2.2 基于电子学的太赫兹辐射源	22
2.2.1 微型真空电子器件	22
2.2.2 相对论性电子器件	30
2.2.3 半导体激光器	39
第三章 太赫兹波的探测	44
3.1 脉冲太赫兹信号探测	44
3.1.1 光电导取样	44
3.1.2 电光取样	46
3.1.3 光电导取样与电光取样的比较	51

3.1.4	空气探测太赫兹	52
3.2	连续太赫兹信号的探测	55
3.2.1	测辐射热计	56
3.2.2	高莱探测器	57
3.2.3	热释电探测器	58
3.2.4	肖特基二极管	59
3.2.5	场效应晶体管	60
3.3	太赫兹单光子探测	62
第四章	太赫兹时域光谱	64
4.1	太赫兹时域光谱技术的优势	64
4.2	太赫兹时域光谱系统	65
4.3	太赫兹时域光谱技术原理	66
4.3.1	透射式太赫兹时域光谱技术	66
4.3.2	反射式太赫兹时域光谱技术	67
4.4	其他探测方法	68
4.5	太赫兹时域光谱技术的应用	69
4.6	总结和展望	69
第五章	太赫兹成像	70
5.1	太赫兹成像系统	70
5.1.1	飞秒激光源	71
5.1.2	光学延迟系统	72
5.1.3	信号获取	73
5.1.4	数据处理	74
5.2	太赫兹时域光谱成像	74
5.2.1	振幅和位相成像	74
5.2.2	液态水的太赫兹成像	78
5.2.3	成像处理	79
5.2.4	太赫兹反射成像	79
5.2.5	烧伤诊断	81
5.3	扫描成像	82

5.4	太赫兹实时成像	83
5.5	太赫兹层析成像	84
5.6	太赫兹近场成像	88
5.7	太赫兹连续波成像	90
	5.7.1 太赫兹连续波成像系统	91
	5.7.2 太赫兹连续波成像原理	92
5.8	太赫兹成像技术应用	94
第六章	太赫兹在物理学中的应用	96
6.1	发展机遇	96
6.2	太赫兹在光物理中的基础研究	97
	6.2.1 随机介质中的电磁波传播	97
	6.2.2 左手材料	98
	6.2.3 近场电磁效应	98
	6.2.4 单周期脉冲	99
6.3	量子相干和控制	99
6.4	大气科学、实验室天文学和分子碰撞	100
	6.4.1 大气科学	100
	6.4.2 高分辨天文科学	101
6.5	极端条件下的物质探测	101
第七章	太赫兹在化学和生物学中的机遇	103
7.1	发展机遇	103
7.2	面临的挑战	104
7.3	太赫兹在化学中的应用	105
	7.3.1 气相物质	105
	7.3.2 团簇光谱	106
	7.3.3 液体	106
	7.3.4 自组分子结构	107
	7.3.5 部分无序固体	107
	7.3.6 晶体	108
	7.3.7 利用太赫兹控制化学电子转移	108

7.3.8	磁现象	108
7.4	太赫兹在生物学中的应用	109
7.4.1	固态生物材料的太赫兹光谱	109
7.4.2	植物中药	113
7.4.3	水	114
7.4.4	太赫兹科学在生物研究方面的适用性	115
7.4.5	太赫兹光谱在化学和生物学中的应用展望	115
第八章	太赫兹遥感	117
8.1	相关介绍	117
8.1.1	研究背景	117
8.1.2	传感器系统	118
8.1.3	太赫兹固态设备	119
8.2	太赫兹辐射的传输	120
8.2.1	大气吸收	120
8.2.2	大气散射	121
8.2.3	太赫兹功率的测量	122
8.3	太赫兹耦合到自由空间	122
8.3.1	金属波导	123
8.3.2	耦合到自由空间	123
8.4	太赫兹探测器	124
8.4.1	直放式探测器	124
8.4.2	外差式探测器	125
8.5	太赫兹信号和噪声处理	125
8.6	探测器灵敏度的限制条件	126
8.7	探测器的性能	127
8.7.1	探测前的最佳信噪比	127
8.7.2	探测后的传感器性能	127
8.8	无源传感器	128
8.9	有源传感器	129
8.9.1	太赫兹源	130

8.9.2	探测器	131
8.9.3	用有源传感器探测吸收信号	131
8.10	二维成像	134
8.10.1	发展动力	134
8.10.2	空间取样成像	135
8.10.3	太赫兹成像器的应用	137
第九章	太赫兹雷达	140
9.1	应用前景	140
9.2	太赫兹雷达	142
9.2.1	能对目标均匀照射的太赫兹雷达	144
9.2.2	探测目标	145
9.2.3	散射辐射	146
9.2.4	双站雷达	147
9.3	雷达探测	148
9.3.1	导体和介质圆柱体	148
9.3.2	介质球	151
9.3.3	角度分辨散射测量	152
9.3.4	古伊相移	154
9.3.5	实际目标测量	157
9.4	未来展望	159
第十章	太赫兹成像的军事用途	160
10.1	太赫兹在军事领域的机遇	160
10.2	太赫兹在军事领域中的应用	161
10.2.1	目标识别	161
10.2.2	目标响应	163
10.2.3	毒气战剂和生物战剂的感测	164
第十一章	太赫兹在国土安全中的应用	166
11.1	利用太赫兹成像技术探测隐蔽武器	166
11.1.1	应用背景	166
11.1.2	太赫兹扫描成像	167

11.1.3	实时宽带全息成像	170
11.1.4	实时成像应用	172
11.2	太赫兹主动探测成像	174
11.3	爆炸物及其相关材料的太赫兹光谱探测	175
11.3.1	研究现状	175
11.3.2	太赫兹光谱测量	176
11.3.3	太赫兹光谱的理论解析	179
11.4	炸药和生化战剂的识别	181
11.4.1	神经网络	182
11.4.2	信封中的生物药剂	183
11.4.3	人体炸弹	185
11.5	挑战与展望	188
第十二章	太赫兹成像在生物医学中的应用	190
12.1	发展机遇	190
12.2	应用潜力	190
12.3	基本原理	191
12.4	太赫兹在生物医学中的应用	192
12.4.1	树密度测绘	192
12.4.2	植物生理学	193
12.4.3	医学成像	198
12.5	总结与展望	201
第十三章	太赫兹器件在天体物理学中的应用	202
13.1	天体物理测量手段	202
13.1.1	光度测定法	202
13.1.2	光谱测量法	203
13.2	边缘跃迁测辐射热计	204
13.2.1	TES 测辐射热计的设计方案	206
13.2.2	多路输出技术	209
13.3	分离库珀对型探测器和隧道结探测器	211
13.3.1	分离库珀对型探测器	211

13.3.2	STJ 探测器	211
13.3.3	动感探测器	212
13.3.4	SQUID 动感探测器	212
13.3.5	SIS 光子探测器	213
13.3.6	SIN 结微型测辐射热计	213
13.4	隧道结混频器	214
13.5	HEB 型混频器	216
13.6	前景展望	217
第十四章	太赫兹通信	218
14.1	太赫兹通信	218
14.1.1	宽带通信和高速信息网	219
14.1.2	高速短距离无线通信	219
14.1.3	太赫兹空间通信	220
14.1.4	太赫兹晶体管	220
14.2	太赫兹通信在军事上的应用	221
14.3	太赫兹通信所遇到的挑战	222
第十五章	太赫兹在无损检测及航天器检测中的应用	224
15.1	应用时域太赫兹探测航天飞机隔离层中的缺陷	224
15.1.1	将时间和强度的峰值信息处理	228
15.1.2	对波形变化的处理	229
15.2	连续太赫兹波成像系统的无损检测	230
参考文献	236

CONTENTS

Chapter 1	Nature of THz	1
1.1	Introduction	1
1.2	Applications of THz	2
1.3	Unique Characters of THz	3
1.4	Wave Characters of THz	6
1.4.1	Interference of THz	6
1.4.2	Diffraction of THz	7
1.5	Particle Properties of THz	8
Chapter 2	Generation of THz	10
2.1	Generation of THz Based on Optical Methods	10
2.1.1	Photoconductive Antenna	11
2.1.2	Optical Rectification	12
2.1.3	Generating THz Using Air as the Emitter	14
2.1.4	THz Parametric Sources	16
2.1.5	Optically-Pumped THz Laser	19
2.2	Generation of THz Based on Electronics	22
2.2.1	THz Micro-Vacuum Electron Devices	22
2.2.2	Relativistic Devices	30
2.2.3	Semiconductor Laser	39
Chapter 3	THz Detection	44
3.1	Pulsed THz Detection	44
3.1.1	Photoconductive Sampling	44
3.1.2	Electro-Optic Sampling	46
3.1.3	Comparison between PC Sampling and EO	

	Sampling	51
	3.1.4 Detecting THz Using Air as the Detector	52
3.2	Continuous Wave Detection	55
	3.2.1 Bolometer	56
	3.2.2 Golay Cell	57
	3.2.3 Pyroelectric Detector	58
	3.2.4 Schottky Diode	59
	3.2.5 Field-Effect Transistor	60
3.3	Single-Photon Detection	62
Chapter 4	THz Time-Domain Spectrum	64
4.1	Predominance of THz Time-Domain Spectrum Technology	64
4.2	THz Time-Domain Spectrum of System	65
4.3	Principle of THz Time-Domain Spectrum Technology	66
	4.3.1 Transmitted THz TDS	66
	4.3.2 Reflected THz TDS	67
4.4	Other Methods	68
4.5	Applications of THz TDS	69
4.6	Future Prospects	69
Chapter 5	THz Imaging	70
5.1	THz Imaging System	70
	5.1.1 Femto-second Laser	71
	5.1.2 Optical Delay Line	72
	5.1.3 Signal Acquisition	73
	5.1.4 Data Processing	74
5.2	Imaging with THz-TDS	74
	5.2.1 Amplitude and Phase Imaging	74
	5.2.2 THz Imaging of Liquid Water	78
	5.2.3 Processing for Amplitude and Phase	