



装备科技译著出版基金

空间微波技术学术著作丛书

Terahertz Spectroscopy and Imaging

太赫兹光谱与成像

[芬] Kai-Erik Peiponen [英] J.Axel Zeitler [日] Makoto Kuwata-Gonokami 编著

崔万照 李 韵 史平彦 刘长军 译

 Springer



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

空间微波技术学术著作丛书

太赫兹光谱与成像

Terahertz Spectroscopy and Imaging

[芬] Kai-Erik Peiponen [英] J. Axel Zeitler

编著

[日] Makoto Kuwata-Gonokami

崔万照 李 韵 史平彦 刘长军

译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-055 号

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹光谱与成像/(芬)卡伊-埃里克·佩波宁
(K-E. Peiponen), (英)J·阿克塞尔·蔡特勒
(J. A. Zeitler), (日)桑田五之神诚著;崔万照等译.
—北京:国防工业出版社,2016.6

书名原文:Terahertz Spectroscopy and Imaging

ISBN 978-7-118-10707-4

I. ①太… II. ①卡… ②J… ③桑… ④崔…
III. ①电磁波—光谱 ②电磁波—成像系统 IV. ①
O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第171882号

Translation from English language edition:

Terahertz Spectroscopy and Imaging

ISBN 978-3-642-2956-3-8

Copyright © Springer - Verlag Berlin Heidelberg 2013

Springer is part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书简体中文版由 Springer - Verlag GmbH 授权国防工业出版社独家出版发行。
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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 插页 10 印张 37 字数 665 千字

2016年6月第1版第1次印刷 印数 1—1500 册 定价 98.00 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

太赫兹 (Terahertz, THz) 科学技术作为衔接经典电磁理论与光学理论的桥梁,具有比微波高 1~4 个数量级的带宽特性与比光波高的能量转换效率,从理论上展现了其卓越的应用优势。在经历了近几十年的技术发展与理论沉淀后,于 21 世纪初迸发出了蓬勃活力,已成为多个国家大力发展的重点支撑技术之一。与此同时,太赫兹科学技术作为国际学术界公认的具有非比寻常性的交叉前沿研究领域,发展到今天达到了一个新的研究高度,在物理学、化学、生物医学、天文学、材料科学和环境科学等方面展现了广阔而诱人的应用前景,并将推动基础科学研究、国民经济发展、国家安全反恐和新一代 IT 技术产业的大力发展。亟需针对当前的研究进展进行总结,对各个研究领域取得的最新成果进行归类概括,为我们进一步深化研究奠定基础,指明方向。

由太赫兹领域的著名专家及直接从事太赫兹研究的著名学者 Kai-Erik Peiponen、J. Axel Zeitler 和 Makoto Kuwata-Gonokami 组织,来自于美国、加拿大、英国、日本等全球十余个国家的 55 位太赫兹领域知名研究者共同完成的《太赫兹光谱与成像》一书,不同于一般概述性著作,专业性非常强,从光谱学和成像两个典型研究领域出发,覆盖了物理、化学、生物医学,甚至是艺术领域的多维尺度、全方位的研究内容,对太赫兹研究的各个方面的前沿动态把握非常到位,可以说为读者倾心打造了一场太赫兹科学与应用技术的盛宴,是每一位从事太赫兹研究的人员不可错过的经典。开卷有益,相信每一位读者都能从中得到启发。

本书在前 7 章详细论述了太赫兹相关电磁学与光学理论原理,以及在媒质中的复折射率、散射和相空间处理等方面的基础理论,并在第 8 章至第 20 章从固体、液体、生物分子、泵浦探针、聚合物太赫兹光谱学和近场、断层成像及其工业和安全探测应用等太赫兹研究涉及的各种应用方向展开讨论,并在第 21 章至第 23 章展现了基础应用物理学在太赫兹领域的诱人未来。本书既可以作为高等院校微波技术等专业的本科生和研究生教材,帮助刚跨入太赫兹领域开展学习与研究的初级研究人员、科研院校学生建立起基础而全面的理论与技术概念,也可以供相关领域的工程技术人员结合本专业领域技术与太赫兹科学技术进行思考与研究。这也是我们希望将此书翻译出来介绍给国内读者的主要原因。

本书共分为23章,其中前言、第17、18、19、20章由崔万照翻译,第1、2、3、5、11、22章由李韵翻译,第4章由史平彦翻译,第13、16章由刘长军翻译,第7、9章由李泉霄翻译,第14、15章由陈翔翻译,第6章由白春江翻译,第8章由董亚洲翻译,第10章由王瑞翻译,第12章由倪大宁翻译,第21章由杨晶翻译,第23章由朱忠博翻译,全书由李韵和崔万照进行审校。在部分词句及专业词汇的审校过程中得到了刘丰的帮助,在此表示感谢。本书所有译者对全书译稿多次进行了讨论,并就疑难点的译文进行推敲,力求得到最忠实于原文的表达。王晓海对本书的图片和公式进行了处理与录入,在此表示感谢。

译者

致 谢

真诚感谢装备科技译著出版基金的资助,以及中国电子学会空间电子学会和空间微波技术重点实验室给予的大力支持。国家自然科学基金重点项目(U1537211)、国防预研基金(9140C530101150C53011、9140C530101140C53231、9140C530101130C53013、9140C530404130C53193、9140C530301140C53012、9140A21010214HT05001)等课题的研究为本书的出版提供了重要支撑。

由于本书由来自全球多个国家的 55 位合作研究者共同编著完成,卷帙浩繁,写作风格各异,翻译难度之大,涉及研究范围之广非比寻常,虽经译者近 3 年的艰苦努力,然而水平始终有限,书中难免有疏漏与欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

译者

前言

时至今日,仍然没有普遍认可的太赫兹 (THz) 辐射频率上下限的定义。太赫兹光谱高频与远红外频谱重叠,低频与微波频段重叠。一些作者将 $0.1 \sim 1.0\text{mm}$ 波长范围作为太赫兹辐射,而其他作者将太赫兹辐射范围扩展至波长 $30\mu\text{m}$ 之短。因此,术语指的是电磁频谱中相对窄的部分。尽管频谱如此狭窄,太赫兹辐射与其他频谱,例如,可见光共同在技术和生命科学的基础研究中发挥着极其重要的作用。虽然没有人质疑辐射,例如,可见光研究的重要性,但迄今为止有关太赫兹辐射的研究仍然比较模糊。

毋庸置疑,太赫兹光谱研究飞速发展主要原因是超快激光器的进步和 20 世纪 70 年代 Auston 开关的发明。这些促进了 20 世纪 90 年代早期新一代分光计的诞生,该分光计能够以前所未有的便利性和敏感性产生和检测相干太赫兹辐射的脉冲。直到今天,太赫兹光谱和成像的大多数研究仍然使用时域分光计。虽然本书主要关注太赫兹时域光谱仪 (Terahertz time - domain spectroscopy, THz - TDS),但是其他技术如远红外频谱仍然非常重要,我们也在适当之处讨论和提及。本书大体上分为 3 个部分:前 7 章介绍了太赫兹光谱的技术和基础物理学;接下来的 13 章详细论述了太赫兹辐射如何广泛用于研究材料;最后 3 章指出了包括太赫兹频段物理学在内的太赫兹领域诱人的未来。由于篇幅所限,本卷略去了对气体光谱学的深入讨论和涉及天文学和天体物理学的内容。

我们非常荣幸地邀请到了一些太赫兹领域的著名专家编写了本书的许多章节。我们的目标是提供代表性的论著针对太赫光频谱和成像研究的现状进行概述。太赫兹光谱研究已经发展为一个非常活跃的学科,我们希望本书能够为从事太赫兹研究的新科研人员提供资料收集的帮助,也为多年从事太赫兹研究的学者提供一本实用的参考书。

Kai-Erik Peiponen(纽恩苏)

J. Axel Zeidler(剑桥)

Makoto Kuwata-Gonokami(东京)

目 录

第 1 章 太赫兹辐射的产生与探测	1
1.1 宽带太赫兹脉冲的产生与探测	1
1.1.1 飞秒激光系统	2
1.1.2 产生及探测宽带脉冲的总体方案	3
1.1.3 光电导天线	4
1.1.4 光电导天线探测方法	6
1.1.5 光学整流和电光采样	7
1.1.6 其他宽带发射器	12
1.1.7 太赫兹辐射的发展前景	13
1.2 连续波太赫兹辐射的产生	14
1.2.1 光混频	14
1.2.2 差频产生	15
1.2.3 参量放大	15
1.2.4 气体激光器	16
1.2.5 微波频率倍频器	16
1.2.6 回波振荡器	17
1.2.7 自由电子激光器	18
1.2.8 P 型锗激光器	18
1.2.9 量子级联激光器	19
1.3 探测器	20
1.3.1 热探测器	21
1.3.2 外差探测	22
1.3.3 能带探测器	22
1.4 结论	22
参考文献	23

第2章 太赫兹光学	26
2.1 引言——太赫兹光学	26
2.2 理想光学系统中的高斯波束传输	27
2.2.1 简单高斯波束模型的传播特性	27
2.2.2 聚焦高斯波束:简单光学系统	29
2.2.3 一般光学系统中 $ABCD$ 矩阵和传输	30
2.3 光学元件和子系统	32
2.3.1 耦合波束和聚焦元件	32
2.3.2 离轴聚焦镜	32
2.3.3 厚透镜	34
2.3.4 分束器、偏振栅格、屋脊反射镜、干涉仪和滤波器	34
2.3.5 衍射元件和相位光栅	35
2.4 波束耦合问题	36
2.4.1 辐射元件耦合	36
2.4.2 失配高斯波束和散焦效应	37
2.5 详细建模	39
2.5.1 高阶高斯波束模型	39
2.5.2 畸变、截断、波束失真	40
2.5.3 其他建模技术	42
2.5.4 部分耦合和多模系统	43
2.6 光学系统设计	43
2.6.1 反射镜/透镜参数的选择	43
2.6.2 系统布局	44
2.6.3 太赫兹光谱系统成像问题	45
2.7 总结	46
参考文献	47
第3章 太赫兹光谱范围内媒质的复折射率	50
3.1 引言	50
3.2 复介电常数和折射率	51
3.3 复传输和反射系数	54
3.4 有效媒质模型	57
3.5 太赫兹光谱分析的修正克拉茂—克朗尼希色散关系	58

3.6	时域太赫兹反射光谱的最大熵法	67
3.7	总结与展望	68
	参考文献	70
第4章	采用平面和汇聚波束传递函数确定复折射率	72
4.1	采用传递函数提取材料的参数	72
4.2	平面传递函数计算	73
4.2.1	实验理论传递函数	73
4.2.2	相位解缠	75
4.3	汇聚波束建模	76
4.3.1	角度的权重函数	77
4.3.2	汇聚波束透射穿过一个厚板	77
4.3.3	汇聚算法中的相位解缠	79
4.3.4	仿真数据	79
4.4	实验数据	81
4.5	结论	82
	参考文献	82
第5章	太赫兹散射	84
5.1	引言	84
5.2	具有光滑平面界面的样本的太赫兹反射与传输	85
5.2.1	单层界面的反射和传输	85
5.2.2	同一层界面的反射和透射	87
5.3	随机媒质	88
5.3.1	随机粗糙表面的太赫兹反射	89
5.4	体散射和吸收	93
5.4.1	单个粒子的散射	93
5.4.2	随机分布粒子散射	95
5.4.3	数值计算和蒙特卡罗模拟	99
5.5	结论	100
	参考文献	100
第6章	太赫兹辐射的相空间处理	103
6.1	引言	103

6.2	太赫兹场的表征参数	104
6.3	太赫兹辐射表征和处理的相空间技术	107
6.3.1	威格纳分布函数及其在信号处理中的应用	111
6.3.2	模糊函数及其在信号处理中的应用	116
6.3.3	光谱图及其在信号处理中的应用	118
6.3.4	小波变换及其在信号处理中的应用	122
6.3.5	分数傅里叶变换及其在信号处理中的应用	126
6.4	结论	130
	参考文献	130
第7章	晶体材料振动模式分布的计算方法	134
7.1	引言	134
7.1.1	单分子与周期晶体结构的计算	135
7.2	晶体声子的理论	137
7.2.1	一维晶体的声子	137
7.2.2	真空和凝聚态的正交模式	139
7.2.3	3D 晶体声子	141
7.2.4	原子-原子势(力场)法	144
7.2.5	量子力学的电子结构计算	146
7.2.6	计算实例	148
7.3	分子动力学	157
7.4	结论、总结和方法的局限性	160
7.4.1	力场和电子结构(DFT)计算的对比	160
7.4.2	晶格动力学与分子动力学的对比	160
7.4.3	需要解决的一般问题	161
	参考文献	165
第8章	晶体和非晶固体的太赫兹光谱学	170
8.1	引言	170
8.2	测试注意事项	172
8.2.1	散射	172
8.2.2	样品制备	176
8.2.3	光学常数的计算	178
8.2.4	动态范围	181

8.3	晶体材料光谱学	183
8.3.1	生物分子	183
8.3.2	有机小分子	184
8.3.3	爆炸物	190
8.3.4	其他晶体材料	191
8.4	非晶固体材料光谱学	192
8.4.1	玻璃	192
8.4.2	有序碳材料	194
8.5	小结	198
	参考文献	199
第9章	生物分子和液体的太赫兹光谱学	203
9.1	液体	203
9.1.1	液体的太赫兹响应	203
9.1.2	液体透射	206
9.1.3	主要结论和研究现状	210
9.2	生物分子	211
9.2.1	生物分子的太赫兹响应	211
9.2.2	主要进展和研究现状	217
	参考文献	218
第10章	太赫兹频段的泵浦-探测光谱学	222
10.1	引言	222
10.2	技术	223
10.2.1	实验细节	223
10.2.2	参数提取	224
10.2.3	电导率模型	225
10.3	无机半导体	229
10.3.1	块材	229
10.3.2	激子系统	229
10.3.3	纳米结构	230
10.4	有机半导体	232
10.4.1	石墨和石墨烯	232
10.4.2	碳纳米管	232

10.4.3 半导体聚合物	233
10.5 无机有机混合	235
10.6 展望	237
参考文献	237
第 11 章 太赫兹光谱学:太赫兹波的椭圆偏光法	
与有源极化控制	241
11.1 引言	241
11.2 透射模式时域椭圆偏光法	242
11.2.1 利用线栅极化器测量极化状态的方法	242
11.2.2 介电张量的计算	243
11.2.3 极化测量的例子	244
11.3 反射模式时域磁光椭圆偏光法	247
11.3.1 斜入射时的 MOKE 信号	248
11.3.2 基于强度测量的分析	252
11.3.3 基于时域太赫兹椭圆偏光法的分析	252
11.3.4 分析实例	254
11.4 太赫兹波的有源极化控制	260
11.5 结论	264
参考文献	264
第 12 章 液晶及其在太赫兹频率范围的应用	266
12.1 太赫兹频段的液晶	266
12.1.1 引言	266
12.1.2 最新研究进展	267
12.1.3 液晶相	267
12.1.4 关键属性	268
12.1.5 正与负介电各向异性	268
12.1.6 纯液晶与混合物	268
12.1.7 宏观属性——从千赫兹到紫外线	269
12.1.8 液晶的太赫兹光谱	270
12.1.9 液晶的宏观太赫兹性质	270
12.1.10 氰基联苯的分子太赫兹特性	278
12.1.11 总结与展望	283

参考文献	284
第 13 章 聚合物太赫兹光谱学	290
13.1 引言	290
13.2 太赫兹频段聚合物的介电特性	291
13.2.1 太赫兹频段聚合物分类	292
13.2.2 光谱特性起源	293
13.2.3 玻璃化检测	296
13.2.4 聚合物	299
13.3 太赫兹系统在聚合物加工工业中的应用	301
13.3.1 用太赫兹传感器控制混合过程	301
13.3.2 塑料元件的湿度监测	303
13.3.3 塑料焊接接头的检测	304
13.3.4 粘着键的太赫兹光谱学	305
13.3.5 加固塑料中纤维取向的确定	308
参考文献	309
第 14 章 非线性太赫兹光谱学	316
14.1 引言	316
14.2 高强度太赫兹脉冲的产生	317
14.2.1 光电导开关产生太赫兹脉冲	318
14.2.2 气体等离子体中的太赫兹产生	320
14.2.3 光学整流产生太赫兹脉冲	322
14.2.4 GaSe 和 ZnTe 晶体中差频产生多周期强太赫兹脉冲	326
14.3 太赫兹非线性光谱方法	326
14.3.1 强度相关透射	327
14.3.2 太赫兹泵浦/太赫兹探针实验	329
14.3.3 太赫兹泵浦/光学探针测量	330
14.3.4 二维太赫兹光谱学	330
14.4 太赫兹非线性光学	332
14.5 半导体的非线性太赫兹光谱学	334
14.5.1 太赫兹场的有质动力	334
14.5.2 太赫兹驱动弹道输运	335
14.5.3 太赫兹场激子操作	337

14.6	非线性振动光谱学	339
14.7	太赫兹脉冲的磁场效应	340
14.8	强相关材料的太赫兹激励	341
14.9	总结和展望	343
	参考文献	343
第 15 章	太赫兹近场成像	348
15.1	引言:近场、远场及衍射极限	348
15.1.1	衍射极限和远场	348
15.1.2	近场	349
15.2	无孔径近场显微镜	350
15.2.1	ANSOM 的变化	354
15.3	孔径技术	355
15.3.1	波导、动态孔径以及准孔径	357
15.4	近场成像	359
15.4.1	太赫兹近电场成像	359
15.5	总结和展望	367
	参考文献	367
第 16 章	生物医学成像	371
16.1	为什么太赫兹辐射适用于生物医学系统研究?	371
16.1.1	安全性	371
16.1.2	分子间相互作用的敏感性	371
16.2	样本制备	372
16.2.1	组织脱水和水合作用	372
16.2.2	可重复性	372
16.2.3	清单示例	373
16.3	样本系统	373
16.3.1	薄与厚	373
16.3.2	均匀与非均匀	374
16.3.3	带宽和轴向分辨率	374
16.3.4	信噪比和穿透深度	375
16.3.5	结构信息与光谱信息	377
16.3.6	成像与光谱	377

16.4	样品架及其对计算的影响	377
16.4.1	透射装置	377
16.4.2	反射装置	378
16.5	时域数据解释	379
16.5.1	反卷积	379
16.5.2	工作实例	379
16.6	医学应用研究	381
16.6.1	乳房癌	381
16.6.2	皮肤癌	381
16.6.3	结肠癌	381
16.6.4	龋齿	381
16.6.5	皮肤	383
16.6.6	蛋白质光谱学	383
16.7	总结	384
	参考文献	384
第 17 章	太赫兹层析成像	386
17.1	采用太赫兹和毫米波的计算层析成像	386
17.1.1	CT 的原理	387
17.1.2	太赫兹 - CT 应用举例	388
17.2	飞行时间太赫兹层析成像	392
17.2.1	TOF 层析成像原理	392
17.2.2	TOF - 太赫兹层析成像实例	394
	参考文献	399
第 18 章	太赫兹成像工业应用	400
18.1	引言	400
18.2	工业成像	401
18.2.1	基本原理	401
18.2.2	对比机制	402
18.2.3	无损测试	404
18.2.4	实时成像	407
18.3	制药工业	408
18.3.1	特殊成像需求	408

18.3.2	装设仪器	409
18.3.3	信号处理	411
18.3.4	药片成像	415
18.3.5	应用	420
18.4	展望	430
	参考文献	431
第 19 章	毫米波和太赫兹成像在安防中的应用	437
19.1	引言	437
19.2	安检现象学	438
19.2.1	毫米波被动成像系统性能	438
19.2.2	毫米波被动成像对比度	438
19.2.3	毫米波被动成像现象学	439
19.2.4	毫米波主动(相干)成像	441
19.2.5	毫米波主动成像现象学	443
19.2.6	大气传输	444
19.2.7	材料特性	444
19.3	成像系统设计概述	446
19.4	检测器技术	447
19.4.1	相干上变频或下变频	447
19.4.2	前置放大的直接检测	449
19.4.3	非相干(未放大)直接测量	450
19.5	毫米波安检门	450
19.5.1	L-3 ProVision	450
19.5.2	Millivision	451
19.6	远距离成像	452
19.6.1	远距离被动成像系统	452
19.6.2	远距离主动成像系统	456
19.7	多光谱和光谱成像	457
19.7.1	多光谱成像	457
19.7.2	太赫兹光谱成像	458
19.8	未来发展方向	459
	参考文献	460