



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书

太赫兹科学技术和应用

许景周 张希成 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书

太赫兹科学技术和应用

许景周 张希成 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹科学技术和应用/许景周,张希成著. —北京:北京大学出版社,2007.7

(北京大学物理学丛书)

ISBN 978-7-301-12503-8

I. 太… II. ①许… ②张… III. ①电磁理论②光电子技术
IV. 0441 TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 100189 号

书 名: 太赫兹科学技术和应用

著作责任者: 许景周 张希成 著

责任编辑: 孙 琰

标准书号: ISBN 978-7-301-12503-8/O · 0725

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

850 毫米×1168 毫米 大 32 开本 8.5 印张 219 千字

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 18.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: (010)62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学

术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

作者前言

人们对太赫兹(tera-hertz, THz)辐射的研究已经有几十年了,在当时这一波段的电磁波在不同的领域中分别被称为远红外辐射或毫米波、亚毫米波。从20世纪80年代中期利用超快光电子技术成功地产生和探测太赫兹脉冲以来,对这一波段电磁辐射的研究愈来愈引起科学技术界广泛的关注。初期的研究主要集中于发展太赫兹技术;然后人们开始利用太赫兹辐射进行一些基础科学的研究,到了21世纪初,则开始关注对太赫兹辐射应用的开发。

脉冲太赫兹技术从开始发展到现在也已经二十多年了,在此期间,各种太赫兹技术不断地被发明。得益于这些技术革新,人们对太赫兹辐射的认识也得以逐步深入,在太赫兹领域已经出版了好几本很好的书。它们分别对太赫兹技术的特定领域进行了详细的探讨;只是这些书籍普遍采取了论文集的形式,在同一本书里面由不同的作者分别介绍自己工作的领域。这样的形式非常有利于对几个特定的方面进行深入的研究;然而它的不足之处在于很难对整个领域进行一个比较全面的描述。而这一点对于试图了解这一领域概貌的读者,特别是初次涉及太赫兹领域的读者,尤其重要。在这里,我们试图采取“参考书”而非“论文集”的形式对太赫兹,尤其是脉冲太赫兹领域的科学和技术进行一个总结。但愿我们的努力能够对那些希望了解太赫兹技术的人们有所帮助,也希望本书能够起到抛砖引玉的作用,触发对太赫兹领域更为深入和全面的总结。由于作者认识范围和工作领域的限制,本书对太赫兹领域的讨论难免有所偏颇,恳请读者予以斧正。

本书从理论、实践两个角度考察了太赫兹科学技术的发展和

体系,阐述了当前太赫兹技术和应用的研究领域。本书由九章组成:第一章简单介绍了太赫兹波和太赫兹技术的发展。接下来利用三章的篇幅介绍太赫兹波的基本知识,其中包括太赫兹辐射的发射和探测技术(第二章);两种最基本的太赫兹技术,即太赫兹光谱和太赫兹成像(第三章);太赫兹波与不同物质相互作用的情况(第四章)。然后讨论了两种太赫兹波的成像技术,即太赫兹波的三维成像方法(第五章)和太赫兹波的近场成像技术(第六章)。最后介绍了几种太赫兹技术的应用,其中包括太赫兹技术在无损探伤(第七章)、安全检测(第八章)和生物医学(第九章)中的应用。除了第一章外,我们在讨论中主要考虑的是对太赫兹技术本身的介绍,而不是对该技术发展的总结和评论。因此除了直接引用文献中的公式或图形,并不给出完整的参考文献。在选择引用图形的时候,我们更多的考虑在于所引用的图形能够说明我们要讨论的主题。因此有很多在各个专题中非常重要的工作并没有被引用到本书之中,这并非是由于我们对那些工作的重要性有所忽视。

本书的标题是“太赫兹科学技术和应用”,因此我们在讨论中试图包括光电子学、光(子)学和电子学三种太赫兹技术。但是本书的重点放在了脉冲太赫兹技术,对连续波的太赫兹技术(包括光学和电子学技术)只是做了简单的介绍和浅显的讨论。我们希望这些讨论可以使得工作在脉冲太赫兹领域的研究人员能够对连续波太赫兹技术有一些基本的了解。

作者感谢所有曾经一起工作过的和现在正在一起工作的合作者们,在本书中大量地引用了他们的工作。他们包括在本组工作(过)的学生:金雅红、马兴发、G. Wagoner、邬起、J. Riordan、李明、韩鹏昱、孙凤国、陈勤、K. -S. Lee、王少宏、S. Mickan、B. Ferguson、F. M. Al-Douseri、刘凯、袁韬、钟华、谢旭、刘海波、N. Karpowicz、B. Schulkin、陈坚;博士后和访问学者:刘东风、李明、孙凤国、赵冷柱、汪力、吕振国、蒋志平、G. Cho、黄旭光、T. Masahiko、陈毓川、秦家银、A. Menikh、胡颖、H. Han、陈云清、A. Redo、

戴建明、J. Choi、梁伟；国内的合作者：杨国桢、汪力、张杰、张存林、张岩、赵国忠等。其中，为本书提供插图或公式的合作者包括：邬起、蒋志平、韩鹏昱、陈勤、王少宏、袁韬、刘凯、刘海波、钟华、A. Menikh、陈侯通、谢旭、N. Karpowicz、陈云清、A. Redo、戴建明等等。作者感谢所有允许我们使用插图的同行们。他们包括：D. Auston, D. Grischkowsky, G. Williams, D. Arnone, A. Tredicucci, R Kersting, A. Leitenstorfer, D. Mittleman, M. Tani, H. Han, O. Mitrofanov, R. Appleby, M. Nagel, A. Xie, E. J. Heilweil, A. G. Markelz.

作者特别感谢曾丽女士和严文苓女士的支持。

许景周 张希成

于美国伦斯勒理工学院

2006 年春

目 录

第一章 太赫兹辐射	(1)
§ 1.1 太赫兹波段和太赫兹辐射	(1)
1.1.1 太赫兹辐射的存在和太赫兹空隙	(1)
1.1.2 太赫兹辐射的特性	(4)
1.1.3 限制太赫兹辐射应用的因素	(6)
§ 1.2 太赫兹波的研究历史	(8)
1.2.1 超快光电子学太赫兹技术的发展	(8)
1.2.2 光学太赫兹技术的发展	(15)
1.2.3 电子学太赫兹技术的发展	(17)
§ 1.3 太赫兹科学现状	(18)
1.3.1 太赫兹科学研究的发展和壮大	(18)
1.3.2 太赫兹科学当前的研究领域	(20)
参考文献	(21)
第二章 太赫兹波的发射和探测	(27)
§ 2.1 光开关模式的太赫兹波发射和探测	(27)
2.1.1 光电导天线	(27)
2.1.2 半导体表面电场和太赫兹发射	(31)
2.1.3 光致丹倍效应和太赫兹发射	(34)
§ 2.2 光整流和电光探测	(37)
2.2.1 光整流效应	(37)
2.2.2 电光检测	(41)
2.2.3 宽带太赫兹辐射的发射和探测	(45)
2.2.4 频率下转换的太赫兹波发射	(47)
§ 2.3 利用空气产生和探测太赫兹脉冲	(48)

2.3.1	空气中产生太赫兹脉冲	(48)
2.3.2	利用空气探测太赫兹辐射	(54)
§ 2.4	其他太赫兹波发射器	(57)
2.4.1	反波管	(57)
2.4.2	耿氏二极管振荡器和倍频器	(58)
2.4.3	气体激光器	(59)
2.4.4	半导体激光器	(60)
2.4.5	同步辐射和自由电子激光器	(61)
§ 2.5	太赫兹波探测器	(63)
2.5.1	辐射热计	(63)
2.5.2	热释电探测器	(63)
2.5.3	热膨胀式探测器	(64)
2.5.4	混频器和差频检测	(64)
§ 2.6	对太赫兹波发射和探测方式的比较	(66)
2.6.1	对太赫兹波发射源的比较	(66)
2.6.2	对太赫兹波探测器的比较	(66)
	参考文献	(68)
第三章	太赫兹波光谱和成像	(69)
§ 3.1	太赫兹时域光谱	(69)
3.1.1	太赫兹时域光谱技术	(69)
3.1.2	太赫兹时域光谱的信噪比	(71)
3.1.3	单脉冲的时域光谱测量	(74)
3.1.4	太赫兹差异光谱技术	(78)
§ 3.2	太赫兹波成像	(80)
3.2.1	空间扫描形式的太赫兹波成像技术	(80)
3.2.2	二维太赫兹波成像技术	(82)
3.2.3	飞行时间成像	(85)
3.2.4	合成孔径成像和干涉成像	(86)
§ 3.3	与太赫兹光谱和成像相关的技术	(88)

3.3.1 太赫兹波收发器	(88)
3.3.2 圆渐开线型光学延迟器	(91)
3.3.3 无移动元件的光学延迟器	(94)
3.3.4 太赫兹波时域光谱与傅里叶变换红外 光谱的比较	(96)
参考文献	(97)
第四章 太赫兹波与物质的相互作用	(98)
§ 4.1 太赫兹波与自由载流子	(98)
4.1.1 物质在太赫兹波段的介电常数	(98)
4.1.2 物质在太赫兹波段的折射率	(102)
4.1.3 利用太赫兹光谱测量物质中载流子 的性质	(103)
§ 4.2 太赫兹波与能级共振态	(104)
4.2.1 电磁波与共振结构的相互作用	(104)
4.2.2 太赫兹反射光谱和晶体的声子振荡	(107)
4.2.3 声子-自由载流子相互作用和太赫兹 波发射光谱	(109)
§ 4.3 太赫兹波与光子学结构	(112)
4.3.1 太赫兹辐射的自由空间传播	(112)
4.3.2 太赫兹波的波导传播	(114)
4.3.3 太赫兹波的光子晶体	(117)
4.3.4 太赫兹波与金属表面周期结构的相 互作用	(119)
参考文献	(123)
第五章 太赫兹波三维成像技术	(125)
§ 5.1 太赫兹波的计算机辅助层析技术	(125)
5.1.1 计算机辅助层析成像	(125)
5.1.2 太赫兹波层析成像系统	(126)
5.1.3 层析成像和重现	(128)

5.1.4	太赫兹层析成像的空间分辨率	(132)
§ 5.2	太赫兹波衍射层析技术	(134)
5.2.1	太赫兹波的衍射	(134)
5.2.2	太赫兹波衍射层析成像	(136)
5.2.3	太赫兹波衍射层析像的质量分析	(138)
§ 5.3	菲涅耳透镜三维成像	(140)
5.3.1	菲涅耳透镜的性质	(140)
5.3.2	利用菲涅耳透镜进行三维成像	(143)
5.3.3	菲涅耳透镜成像的分析	(145)
	参考文献	(147)
第六章	太赫兹波近场显微技术	(148)
§ 6.1	太赫兹波成像的分辨率和近场成像	(148)
6.1.1	太赫兹波成像的分辨率	(148)
6.1.2	亚波长尺度物体的衍射	(149)
6.1.3	远场波和隐失波	(150)
§ 6.2	孔径限制的近场显微技术	(152)
6.2.1	动态光学孔径和太赫兹波显微镜	(152)
6.2.2	针孔限制的太赫兹波显微镜	(155)
§ 6.3	基于电光效应的太赫兹近场成像	(158)
6.3.1	亚波长的太赫兹波发射源	(158)
6.3.2	太赫兹波发射源限制的近场显微镜	(160)
6.3.3	探测器限制的太赫兹波近场显微镜 和二维近场显微镜	(162)
§ 6.4	无光学孔径的太赫兹波近场成像	(163)
6.4.1	无光学孔径的近场成像	(163)
6.4.2	针尖对太赫兹波的散射	(165)
6.4.3	针尖对太赫兹波的吸收和太赫兹波 近场成像	(166)
§ 6.5	太赫兹波发射显微技术	(169)

6.5.1 针尖与半导体表面之间的太赫兹波发射	(169)
6.5.2 局域的肖特基势垒	(171)
6.5.3 太赫兹波发射显微技术	(173)
参考文献	(175)
第七章 太赫兹波无损探伤技术	(177)
§ 7.1 太赫兹波对物体的穿透性	(177)
7.1.1 物体对电磁波传播的阻碍	(177)
7.1.2 常见物质的太赫兹透射谱	(178)
7.1.3 太赫兹波穿透的限制	(184)
§ 7.2 脉冲太赫兹波成像检查泡沫材料中的缺陷 ...	(184)
7.2.1 应用背景	(184)
7.2.2 太赫兹波在泡沫材料中的传播	(185)
7.2.3 缺陷的脉冲太赫兹像	(186)
7.2.4 对太赫兹波成像的分析	(188)
7.2.5 便携式的太赫兹波成像装置	(192)
§ 7.3 连续波太赫兹检测技术	(194)
7.3.1 不同频率的连续波太赫兹像	(194)
7.3.2 缺陷像的调制度和判定概率	(197)
7.3.3 提高太赫兹检测的速度	(200)
§ 7.4 太赫兹成像对石墨纤维复合材料的检测	(200)
7.4.1 石墨纤维复合材料及缺陷	(200)
7.4.2 石墨纤维复合材料的连续太赫兹波像 ...	(201)
7.4.3 石墨纤维复合材料的太赫兹时域光谱 ...	(202)
第八章 太赫兹波安全检测技术	(206)
§ 8.1 炸药等危险物质的太赫兹光谱	(206)
8.1.1 炸药的太赫兹光谱	(206)
8.1.2 太赫兹波反射和散射光谱	(210)
8.1.3 对炸药太赫兹光谱的理论计算	(212)

§ 8.2 太赫兹波的透视和遥感	(215)
8.2.1 太赫兹波的远距离传输	(215)
8.2.2 太赫兹波的透视成像和检测	(220)
§ 8.3 太赫兹波的站开检测和光谱成像	(223)
8.3.1 太赫兹波的站开检测	(223)
8.3.2 太赫兹波的光谱成像	(226)
参考文献	(229)
第九章 太赫兹技术应用于生物医学	(230)
§ 9.1 生物分子的太赫兹光谱	(230)
9.1.1 生物小分子的太赫兹光谱	(230)
9.1.2 蛋白质和 DNA 分子的太赫兹光谱 响应	(232)
9.1.3 太赫兹差异光谱和生物分子识别	(235)
§ 9.2 太赫兹波与药物的相互作用	(238)
9.2.1 分子的水合在太赫兹光谱中的表现	(238)
9.2.2 太赫兹技术应用于药品的质量控制	(240)
§ 9.3 太赫兹技术应用于医疗诊断	(242)
9.3.1 细胞的太赫兹光谱	(242)
9.3.2 太赫兹波成像应用于疾病诊断	(243)
参考文献	(246)
名词索引	(249)

第一章 太赫兹辐射

§ 1.1 太赫兹波段和太赫兹辐射

1.1.1 太赫兹辐射的存在和太赫兹空隙

太赫兹辐射是对一个特定波段的电磁辐射的统称. 它在电磁波谱中位于微波和红外辐射之间. 太赫兹辐射的命名来源于它的振荡频率在 10^{12} Hz ($1\text{ THz}=10^{12}\text{ Hz}$) 左右. 在电子学领域里, 这一频段的电磁波又被称做毫米波和亚毫米波; 而在光谱学领域, 它也被称为远红外射线. 一般称谓的太赫兹波段, 其频率范围为 $0.1\sim 10\text{ THz}$; 在有些场合特指 $0.3\sim 3\text{ THz}$, 还有些时候被赋予一种广义的定义, 其频率范围可包含高达 100 THz 的波, 这包括整个中、远红外波段. 图 1-1 给出了太赫兹波段在电磁波谱中的位置.

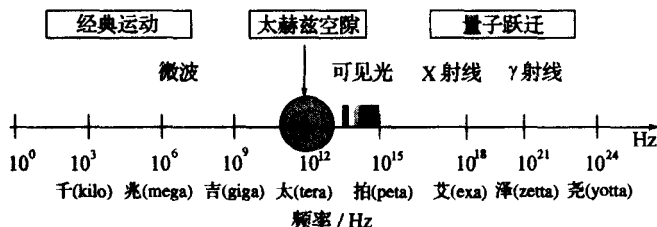


图 1-1 电磁波谱和太赫兹空隙

首先, 让我们对太赫兹波有一个数量上的了解. 一个振荡频率为 1 THz 的电磁波, 它的振荡周期为 1 ps ($1\text{ ps}=10^{-12}\text{ s}$), 相应的波长是 $300\text{ }\mu\text{m}$. 一个频率为 1 THz 的光子的能量是 4.1 MeV , 对应于 33 个波数, 它的特征温度是 48 K . 自然界中拥有大量的太赫兹

辐射源,比如我们身边绝大多数物体的热辐射都在太赫兹波段.图1-2给出了宇宙背景辐射(2.7 K)的频谱分布以及常温(300 K)物体的热辐射频谱分布,其中的阴影部分属于太赫兹波段.

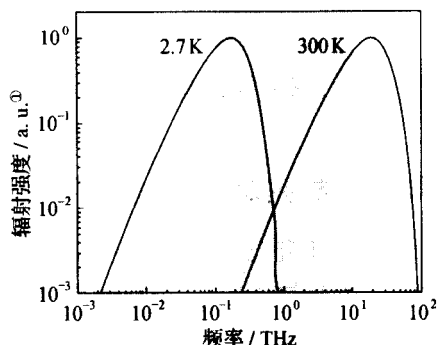


图 1-2 宇宙背景辐射和室温物体的热辐射谱

尽管自然世界中充斥着太赫兹辐射,但是在 20 世纪 80 年代中期之前,由于缺乏太赫兹波段的高效率的发射源和灵敏的探测器,这一波段的电磁辐射并没有得到深入的研究,也只有极少量的技术和屈指可数的应用.与之相对的在电磁波谱中处于太赫兹波两侧的微波和红外辐射则早已经被广泛地应用在通信、探测、光谱、成像等众多领域.太赫兹波段成为宽广的电磁波谱中的一段不为人熟悉的“空白”,被称为电磁波谱的太赫兹空隙(THz gap).在近二十年中,主要是得益于超快光电子(optoelectronic)技术和低尺度半导体技术的发展,为太赫兹波段提供了合适的光源和探测手段,太赫兹科学和技术才得以飞速的发展.

科学研究在由其两侧向太赫兹波段迈进的过程中所遭遇的困难是由太赫兹波段在电磁波谱所处的位置决定的.在太赫兹波段的长波方向是传统电磁学(电子学)的领域;而它的短波方向则是

① “a. u.”表示“任意单位”.

光学的研究范围. 在这两个领域中, 电磁波波源的工作方式、操作电磁波所应用的元器件及描述其与物质相互作用的物理表述等都有很大的不同(见表 1-1).

表 1-1 电磁波和光波研究的比较

	电磁学(电子学)	光 学
称 谓	电磁波	光 波
遵循法则	麦克斯韦(Maxwell)方程	薛定谔(Schrödinger)方程
发 射	电荷的经典运动	电子的量子跃迁
检测物理量	电场强度	光强(功率)
应用元器件	电路, 天线, 波导	透镜, 反射镜, 光纤
近似方法	均匀电磁场	均匀介质

低频电磁波的发射来源于电荷的宏观运动. 当电磁场的振荡频率达到太赫兹波段时, 一些在低频可以忽略的效应(比如杂散电容效应等)的影响则越来越显著. 因此一些经典的电磁波源和电子元器件无法适用于太赫兹波段, 必须开发更快速和尺度更小的电子元器件来满足这波段的需求. 光波则来源于电子的量子跃迁, 相当于太赫兹辐射光子能量的两个能级之差只有毫电子伏. 这一能级差甚至小于大多数晶体光学声子的能量, 因此受到热弛豫效应的严重影响. 要获得这一波段高效率的光源, 必须有效地避免热弛豫效应的影响, 比如采用稀薄气体或低温冷冻的固体等作为激光媒质. 对于低频的电磁波, 由于电磁波的波长一般远大于操作该电磁场的元器件的尺寸, 因此在处理电磁场与元器件相互作用时, 可以把电磁场看做是均匀的. 而与此相反地, 光学元器件的尺寸则远大于光的波长. 所以在研究光学问题时, 不再假设光场是均匀的, 而是认为介质在光学波长范围内是均匀的. 在处理太赫兹辐射与物质相互作用时, 以上两种近似则往往都不能严格成立, 因此需要谨慎分析具体的情况. 太赫兹波段处于电子学和光学这两个研究领域之间, 所以仅仅利用电子学的或光学的技术和器件都不能完