



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉

 Springer

太赫兹辐射物理 及应用

PHYSICS AND APPLICATIONS OF TERAHERTZ RADIATION

Matteo Perenzoni Douglas J. Paul

编著

刘劲松

译



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



“十二五”国家重点图书出版规划项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

世界光电经典译丛

丛书主编 叶朝辉

 Springer

太赫兹辐射物理 及应用



Matteo Perenzoni Douglas J. Paul 编著

刘劲松 译



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Translation from the English language edition:
Physics and Applications of Terahertz Radiation
by Matteo Perenzoni and Douglas J. Paul
Copyright ©2014 Springer Netherlands
Springer Netherlands is a part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved

湖北省版权局著作权合同登记 图字:17-2017-060 号

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹辐射物理及应用/(意)马泰奥·佩伦佐尼,(英)道格拉斯·保罗编著;刘劲松译.—武汉:华中科技大学出版社,2017.6
(世界光电经典译丛)
ISBN 978-7-5680-2554-6

I. ①太… II. ①马… ②道… ③刘… III. ①电磁辐射-研究 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 012226 号

太赫兹辐射物理及应用
Taihezi Fushe Wuli ji Yingyong

Matteo Perenzoni Douglas J. Paul 编著
刘劲松 译

策划编辑:徐晓琦
责任编辑:余涛
封面设计:原色设计
责任校对:刘竣
责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

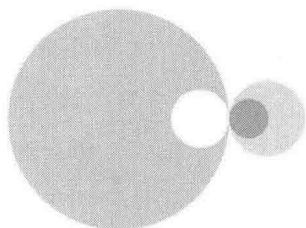
电话:(027)81321913
邮编:430223

录排:武汉正风天下文化发展有限公司
印刷:湖北新华印务有限公司
开本:710mm×1000mm 1/16
印张:17 插页:2
字数:286千字
版次:2017年6月第1版第1次印刷
定价:98.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



译者序

太赫兹波指的是频率为 $0.1 \sim 10$ THz 的电磁波 ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)。THz 是英文 Terahertz 的简写,其中 T 代表 Tera,Hz 代表 Hertz(赫兹)。Tera 这个词头表示 10^{12} ,中文译成太。所以,Terahertz 就翻译成太赫兹。这样的例子很多,比如 Terametre,简写成 Tm,称太米,代表 10^{12} 米,不过很少有人用。

对电磁波来说,不同谱段的命名与历史、习惯和行业紧密相关,缺乏严格的准则。光波是能被人类视觉感知的一段电磁波。以此为参照,将长波一端的叫红外,将短波一端的叫紫外。一个“外”字代表看不见,之后这些概念就逐渐延伸。红外向长波延伸,就出现了近红外、中红外、远红外、超远红外等;紫外向短波延伸,就出现了近紫外、中紫外、远紫外、极远紫外等。与此不同,X射线的命名并非源于与可见光的对比,而是因为发现它时不知道是什么,以 X 为代号,之后就以此命名了。无线电波是人们对电磁波有了深刻理解之后命名的,早期按波长的长短来加以区分,分为长波、中波、短波。这种方式后来就更准确了,所以有了米波、分米波、厘米波、毫米波的叫法。像太赫兹波这样,用频率来命名电磁波的,还是孤例。 1 THz 对应的波长是 3 丝米 ($1 \text{ 丝米} = 100 \text{ 微米}$),因此有人建议应该将太赫兹波称为丝米波。这似乎更加规范,因为这更符合在波的前面加一个波长对应的长度单位来表示一段电磁波的习惯。这本书的英文名称是《Physics and Applications of Terahertz Radiation》,书中也用到 Terahertz wave。出于习惯,我们在译文中采用的是太赫兹辐射、太赫兹

波这样的术语。不过,也有人将太赫兹波称为太赫兹射线(T-Rays),如这本书的第6章。可是,太赫兹波还是称波为好。这是因为,相比红外波、可见光、紫外线和X射线,太赫兹波拥有更加显著的波动性。但是,为了忠实于原著,第6章的译文还是采用了太赫兹射线的说法。

从行业上来说,微波领域更愿意将太赫兹波称为亚毫米波,光学领域则更愿意称其为远红外或超远红外波。太赫兹波称谓的这种行业习惯其实反映了产生和探测太赫兹波的两种基本技术途径:一种源于毫米波技术向短波(高频)方向发展;另一种源于光学技术向长波(低频)方向延伸。本书第1章介绍的是如何将传统上用于红外波段的量子阱探测器向长波方向推移以便用于探测太赫兹波,第3章则介绍如何将传统上用于厘米与毫米波的场效应晶体管向短波方向移动以便用于发射或探测太赫兹波。第4章和第6章分别描述的是如何将红外和光学波段已发展成熟的半导体激光技术和参量振荡技术向长波方向推移来产生太赫兹波。

这是一本按主题来编撰的专业书,共有九章,分为三部分:太赫兹探测、太赫兹产生、太赫兹系统和应用。不同于教科书,这些章节之间在知识点上并没有严格的逻辑关系。各章由不同的作者撰写,因此使用的术语不尽一致。读者可根据自己的需要,单独阅读其中的任一章节来了解某一特定主题,不一定从头至尾阅读全书。

第一部分包括第1~3章,讲述了三种太赫兹探测器。第1章讲述的是量子阱光电探测器,重点讲述如何将这种探测器的响应波长向长波方向延伸。第2章讲述的是测辐射热计,探测灵敏度非常高。当太赫兹波非常弱以至于其他类型的探测器都无效时,测辐射热计往往是最后的选项。由于其使用成本太高(需要液氮、液氦双冷却),只有专业实验室在必须的时候才使用。第3章介绍的是场效应晶体管,属于固态电子器件,是在低频太赫兹波段探测/发射连续和准连续太赫兹波的常用器件。

第二部分包括第4~6章,讲述了三种太赫兹发生器。第4章讲述的是量子级联激光器。因为该激光器尺寸非常小,如果解决了室温工作等问题,或许是未来最有前途的太赫兹源之一。第5章讲述的是自由电子激光器,这是一种原理上能覆盖整个太赫兹波段的辐射源,输出的能量也足够大,面临的主要

问题是如何小型化和紧凑化。实际上,以往的自由电子激光器就能辐射太赫兹波,只是没有在意去收集它,而是作为废料丢弃了。第6章讲述的是光学参量振荡器,是非线性光学中的一种成熟技术,设法将其中的差频光频率调整到太赫兹波段,就构成一种基于非线性光学的太赫兹辐射源。

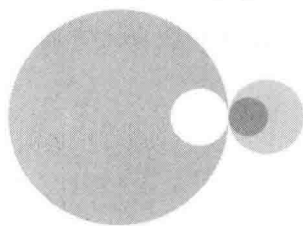
第三部分包括第7~9章,讲述了太赫兹器件、系统和应用。第7章讲述的是几种太赫兹功能器件。与其他波段相比,太赫兹波段的功能器件很不完善,这一短板在很大程度上限制了太赫兹波的应用。这一章从菲涅尔透镜、巴比涅补偿器、人工电磁材料出发,探讨了实现太赫兹透镜、偏振器、滤波器等功能器件的技术途径。第8章讲述的是太赫兹时域光谱系统,这种基于飞秒激光产生和探测太赫兹辐射的系统,能够实现太赫兹时域谱的测量,再经傅里叶变换后可得到太赫兹频域谱。这是太赫兹技术中的一个经典系统,可用于材料甄别、品质评判、基础研究等广泛的领域。第9章讲述的是太赫兹技术的另一个重要应用领域:基于连续太赫兹波成像的人体安检系统,可广泛应用于机场、火车站、地铁等公共场所。实际上,这种系统在工业无损检测方面也有重要的应用。

本书可作为相关专业高年级本科生、研究生、科研和工程技术人员深入了解太赫兹物理及应用的参考书。

参加翻译的人员有刘劲松、王可嘉、杨振刚、丁岚和张景。王可嘉翻译了第4和第5章,杨振刚翻译了第9章,丁岚翻译了第2和第3章,张景翻译了第7和第8章。刘劲松翻译了第1和第6章,并对全书进行了统稿。朱丽君女士承担了秘书和联络工作。项飞荻、胡江胜、顾新杨、刘昌明、李虎泉、魏旭立、王威、金琪和代冰等九位博士研究生分别参与了第1~9章的翻译工作。

刘劲松

2016年11月28日于喻园

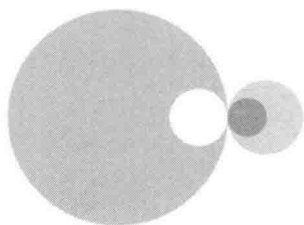


前 言

《太赫兹辐射物理及应用》涵盖了太赫兹辐射和应用的最新进展。本书分为三部分:太赫兹探测、太赫兹产生、太赫兹系统和应用。这三部分完整地向读者介绍了太赫兹辐射的产生和探测中的物理问题,由器件与元件构成的系统及其在不同领域的应用。如果需要,也可单独阅读本书的任一章节来加深对某一特定主题的理解,而无需阅读全书。

太赫兹探测这部分从三种物理机制出发来讲述探测器的最新进展,包括:光子探测、热辐射探测和光整流。首先,从异质结物理入手介绍基于量子阱的光电探测器,这些器件已用作红外探测器,采用一些技术使其扩展到更低光子能量便能实现太赫兹波的探测。然后,从多个角度来介绍辐射热测试器,包括器件物理基础和具体特性,尤其是太赫兹探测所需的特性和连接方式。最后,从基础物理出发介绍基于场效应晶体管的光整流器件,分为共振型和非共振型两类,对其特性进行了深入分析。

太赫兹产生这部分讲述了基于量子级联激光器、自由电子激光器和非线性光学三种方式的太赫兹辐射源,它们在器件尺度和工作原理上存在很大差异。以多量子阱结构为核心的量子级联激光器,有望发展成一种小型紧凑的太赫兹辐射源。自由电子激光器可以辐射太赫兹波,这需从相对论电子物理的视角去理解。作为实际例子,介绍了 Frascati 自由电子激光实验及其在减小装置尺寸方面的努力。对基于非线性光学的太赫兹辐射器,重点介绍了紧凑调频源,包括基本原理和内腔 OPO 系统。



目录

第 1 章 量子阱光电探测器 /1

1.1 光电导和光电二极管的基本原理 /2

1.1.1 探测器的性能参数 /2

1.1.2 太赫兹波段的相关问题 /5

1.2 半导体量子阱 /5

1.2.1 量子阱 /6

1.2.2 掺杂 /8

1.3 子带跃迁 /9

1.3.1 吸收谱线与选择定则 /9

1.3.2 多体效应 /11

1.4 多量子阱系统中的输运 /12

1.4.1 发射-捕获模型 /12

1.4.2 动力学模型 /14

1.4.3 隧穿电流 /15

1.5 量子阱探测器 /16

1.5.1 优化设计 /16

1.5.2 光耦合 /17

1.5.3 工艺状况 /18

1.5.4 量子级联探测器 /19

1.6 量子点探测器 /21

1.6.1 量子点制备 /21

1.6.2 量子点中的跃迁 /22

1.6.3 量子点探测器 /23

1.6.4 太赫兹 QDIP /25

参考文献 /25

第2章 太赫兹测辐射热计 /32

2.1 热辐射探测 /32

2.1.1 测辐射热计原理 /33

2.1.2 电热模型 /34

2.1.3 噪声源 /39

2.1.4 品质因数 /41

2.1.5 综合讨论 /43

2.1.6 测温计材料 /45

2.2 冷却型太赫兹测辐射热计 /50

2.2.1 通论 /50

2.2.2 冷却型测辐射热计实例 /52

2.3 非冷却型太赫兹测辐射热计 /57

2.3.1 标准热红外测辐射热计在太赫兹传感中的应用 /57

2.3.2 修改了电阻的吸收金属层的测辐射热计 /62

2.3.3 太赫兹天线耦合测辐射热计 /63

2.4 结论 /70

参考文献 /71

第3章 太赫兹等离子体场效应晶体管 /74

3.1 简介 /74

3.2 场效应晶体管的太赫兹发射实验 /75

3.3 场效应晶体管的太赫兹探测实验 /80

3.3.1 高频模式 /81

3.3.2 低频模式 /85

3.3.3 非共振探测情况 /85

3.3.4 硅 FET 实现太赫兹探测 /88

3.3.5 室温成像 /89

3.3.6 外加磁场的影响 /90

3.4 双光栅栅极 FET 探测 /91

3.5 总结 /93

参考文献 /93

第4章 量子级联激光器 /99

4.1 背景 /99

4.2 量子阱和量子力学隧道效应 /100

4.3 QCL 激光产生条件 /103

4.4 量子级联激光器中的增益 /103

4.5 有源区域设计 /105

4.6 波导设计和损耗 /106

4.7 实验激光器结果范例 /110

4.8 太赫兹量子级联激光器的未来需求 /113

4.9 总结 /115

参考文献 /116

第5章 基于相对论电子的太赫兹源：工作原理和 ENEA 实验 /119

- 5.1 电子和光子相互作用 /119
- 5.2 自由电子激光器机理 /121
 - 5.2.1 自发辐射 /122
 - 5.2.2 增益 /124
- 5.3 紧凑型 FEL /127
- 5.4 ENEA Frascati FEL 设备 /129
 - 5.4.1 契伦科夫 FEL 实验 /130
 - 5.4.2 紧凑型波荡器 FEL 实验 /132
 - 5.4.3 Smith-Purcell 光栅实验 /138
- 5.5 紧凑型先进太赫兹源 /140
- 参考文献 /143

第6章 太赫兹射线的物理机制与应用 /146

- 6.1 光参量放大中的腔内太赫兹产生 /147
- 6.2 非线性介质、模式匹配和调谐 /149
- 6.3 系统设计 /151
- 6.4 装置性能和太赫兹特性 /153
- 6.5 增益和阈值计算 /155
- 6.6 太赫兹输出特性 /156
- 6.7 太赫兹光束质量 /157
- 6.8 线宽压缩 /159
- 6.9 腔内太赫兹参量放大技术在远程谱中的应用 /163
- 6.10 ICTPO 在远程太赫兹谱中的应用潜力 /165
- 6.11 基于 OPO 源的太赫兹光谱仪 /167
- 6.12 结论 /168

参考文献 /169

第7章 太赫兹波的调控 /173

7.1 衍射光学 /173

7.1.1 设计透镜 /174

7.1.2 太赫兹衍射光学的实例 /176

7.2 偏振控制 /177

7.2.1 基本理论 /177

7.2.2 巴比涅补偿器 /178

7.2.3 人工电介质 /178

7.2.4 太赫兹波段的偏振控制实例 /179

7.3 太赫兹滤波器 /181

7.3.1 EBG 的基本理论 /182

7.3.2 实现可调谐太赫兹滤波器 /185

7.4 超材料和表面等离子体共振 /189

7.5 总结 /192

参考文献 /193

第8章 太赫兹时域光谱的原理和应用 /197

8.1 引言 /197

8.2 太赫兹时域光谱的原理 /199

8.3 短电磁脉冲的产生和探测 /200

8.4 TDS 装置的特点 /202

8.4.1 带宽 /202

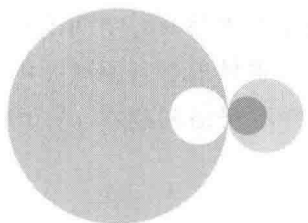
8.4.2 频率分辨率 /203

8.4.3 空间分辨率 /204

8.4.4 TDS 装置的信噪比 /204

8.4.5	典型的信号和装置	/206
8.5	从太赫兹时域光谱测量中提取光学参数的原理	/207
8.5.1	时阈测量	/208
8.5.2	透射测量的光谱	/209
8.5.3	反射测量的光谱	/210
8.6	太赫兹时域光谱的应用实例	/211
8.6.1	亚波长(约 $\lambda/100$)薄膜分辨	/211
8.6.2	太赫兹域的超材料	/215
8.7	太赫兹时域光谱的不确定性和精度	/218
8.8	与 FTIR 测量的比较	/221
8.9	结论	/222
	参考文献	/223
 第9章 太赫兹安检系统和安全性注意事项 /227		
9.1	前言	/227
9.2	安全威胁和伦理问题	/228
9.3	物理原理	/228
9.4	对以往主题的回顾(2006—2010)	/229
9.5	接近市场可商用化系统的回顾	/230
9.5.1	77 GHz 相控阵雷达	/230
9.5.2	反射阵列	/230
9.6	新进展	/230
9.6.1	高频雷达	/230
9.6.2	量子级联激光器	/231
9.6.3	冷却的测辐射热计	/231
9.6.4	光子的产生	/231
9.6.5	空气击穿相干探测	/231

9.6.6	CMOS	/232
9.6.7	硅锗	/232
9.7	太赫兹安全性	/232
9.7.1	简介	/232
9.7.2	主要实验数据	/234
9.7.3	太赫兹频段 EMR 与生物材料之间的相互影响机制	/235
9.7.4	曝光标准、支撑数据和实验局限	/236
9.7.5	DNA“解链”和 Fröhlich 假设	/238
9.7.6	太赫兹 EMR 的安全性	/240
9.8	结论	/241
	参考文献	/242



第 1 章

量子阱光电探测器

摘 要 半导体光电子学发展到现今,商用系统已经可以实现整个红外波段的产生及探测。在更低的频段,半导体主宰了电子学和微波领域。人们也期望半导体能在关联红外与微波的太赫兹波段发挥重要作用。作为所有带隙结构元件的基本单元,量子阱为成功开发红外探测器提供了可能性。本章的前几节讲述半导体量子阱和子带跃迁的基本物理图像,之后讨论它们如何用于量子阱红外及太赫兹探测器。最后几节介绍最新进展,包括量子点探测器作为半导体红外探测器的发展前景。

关键词 量子阱,半导体,红外探测器,太赫兹探测器,量子点,子带跃迁,带隙

在红外探测和成像系统中有多种技术手段。在半导体领域,HgCdTe 光电导探测器是针对单像素探测器最普遍的商用手段。在需要大面积焦平面阵列进行高速操作时,基于 GaAs/AlGaAs 的量子阱光电探测器相比基于 HgCdTe 的而言,具备一定的优势。带间探测器难以应用于波长大于 $25\ \mu\text{m}$ 的场合,此时量子阱仍然是一种可行的选择,这归功于它们依靠几何结构,而不是材料组分来操控频率的能力。

太赫兹频段是最近才得到开发的电磁波波段,可通过光学或电子学的许多手段加以实现。历史上,半导体光电子学首先发展于可见和近红外波段,随后朝更长(以及更短)的波长发展。在长波方面,当波长处在 $25\sim 40\text{ }\mu\text{m}$,极化光学声子起作用时,遇到了一些阻碍。此后的波段习惯上称为太赫兹波,延伸到 1 THz 的频率($300\text{ }\mu\text{m}$ 波长)。

本章讲述量子阱探测器的基本物理原理,并着重于与太赫兹科学相关的问题。由于量子阱技术与中红外有着深厚的渊源,同时器件的物理原理并不完全依赖于工作频率,所以本章讨论的太赫兹频段并不严格限制在 $1\sim 10\text{ THz}$ 范围,也包含了一些短波长器件。

1.1 光电导和光电二极管的基本原理

为了规范命名和缩写,先来回顾一下红外光电探测的基本内容,包括基本物理量和公式。更多的内容参见文献[1]。

1.1.1 探测器的性能参数

对任何光电探测器来说,它都能产生与照射它的光能量成正比的电信号。根据产生电信号的类型,光电探测器可分为光电导(photoconductor, PC)和光电二极管(photodiode, PD)。光电导可以看成是阻值随光照而改变的电阻,这种探测器通常置于固定的偏压下,而流过的电流(光电流)即为探测信号。光电二极管是在两个触头之间产生电压(光电压)作为光输入的响应,无需外加偏压,可直接测量。光电导探测器在红外传感方面应用广泛,因此是我们讨论的重点。

设温度为 T_{obj} 的不透明物体辐射出的光功率为 P ,入射到面积为 A 的探测器上,接收到的功率谱密度满足普朗克辐射定律:

$$\frac{dP}{d\nu} = \frac{A}{4F^2 + 1} \frac{2\pi h\nu^3}{c^2 (e^{\frac{h\nu}{k_B T_{\text{obj}}}} - 1)} \quad (1.1)$$

式中: F 为最后一个光学元件的焦距与其直径的比。

光功率 P 可以通过在光学带宽内对功率谱密度积分而求得。理想的线性光电导探测器能够产生电流 $I(P) = \mathcal{R}P$, 其中, $\mathcal{R}$ 为探测器的灵敏度。

如果每个打到探测器上的光子都以 η 的概率被吸收(内量子效率),对于每个被吸收的光子有 g 个电子注入回路(光电导增益),基于光功率 P 对应光

子通量 $\frac{P}{h\nu}$, 得到灵敏度为

$$\mathcal{R} = \frac{p\eta}{h\nu} g \quad (1.2)$$

光电导增益 g 与量子效率 η 是光电导的基本参数, 它们共同决定了探测器的灵敏度, 而灵敏度则决定了给定光功率下所产生电流的大小。

在实际情况下, 成像系统中的探测器接收到的光功率源于两部分: 信号功率 $P_s(T_{\text{obj}})$, 来自成像物体; 背景功率 $P_b(T_b)$, 来自物体后的场景和光。两者共同形成温度为 T_b 的黑体背景。因此, 流过光电导的总电流为

$$I = \mathcal{R} [P_s(T_{\text{obj}}) + P_b(T_b)] \quad (1.3)$$

对于理想的光电导, 不存在暗电流。在非理想情况下, 当置有偏压时, 即使无光照也会有暗电流 $I_d(T_{\text{det}})$ 流过, 取决于探测器的温度 T_{det} 。此时, 总电流应该修正为

$$I = I_s + I_b + I_d = \mathcal{R} P_s(T_{\text{obj}}) + \mathcal{R} P_b(T_b) + I_d(T_{\text{det}}) \quad (1.4)$$

将电流变为电压, 以上关系式就适用于光电二极管。

光电探测器的另一问题是噪声, 它关系到能被探测到的最低光能量。对理想的光电二极管来说, 处于黑体辐射下的唯一噪声源自光子通量本身的随机性, 导致在光电流中产生散粒噪声。对光电导来说, 热效应会导致电子的捕获与激发, 造成产生-复合噪声。噪声会形成噪声电流 $i_n(P)$, 在文献 [1] 中有大量叙述, 此处不再赘述。

等效噪声功率 NEP(noise equivalent power) 是描述光电探测噪声特性的有效参数, 定义为得到信噪比 1 所需的信号功率:

$$i_n(\text{NEP}) = I_s(\text{NEP}) \quad (1.5)$$

根据探测器的工作条件可定义光电导的多种 NEP 值。

(1) 信号-噪声极限(signal-noise limited, SL)探测。此时, 信号足够强 ($I_s \gg I_b, I_d$), 以至于可假定式(1.4)中的 $I \approx I_s$, 这对应于被成像物体非常热或占据了大部分视场的两种情况。

(2) 背景极限(background-limited, BL)探测。电流主要来自光学背景 ($I_b \gg I_s, I_d$), 因而在式(1.4)中有 $I \approx I_b$, 这对应小物体在温暖背景中成像时的情况。

(3) 暗电流极限(dark-current limited, DL)探测。如果背景非常冷, 暗电