

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我国国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业作出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

前 言

太赫兹 (THz) 科学与技术是一个应用前景广泛、发展极其迅速的交叉学科前沿领域。THz 波具有不同于微波、红外光以及 X 射线的特点, 其研究与应用涉及物理学、材料科学、生命科学、天文学、信息技术和国防安全等多个领域。THz 波在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、宽带移动通信、卫星通信和军用雷达等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景。现代电子学和光子学技术的发展, 对 THz 科学研究与技术开发起了极大的推动作用。THz 科学与技术的研究热潮目前正处于一个方兴未艾的时期。现在已经有从大学和科研院所分离出来的从事 THz 器件生产和 THz 应用系统开发的公司, 它们的出现标志着 THz 技术从实验室走向商业, 从学术研究走向应用。

本书主要以原始论文、尤其是以作者课题组的工作为基础, 对半导体 THz 辐射源与探测器的基本原理、模拟与设计、器件研制方法以及 THz 通信与成像应用等, 做了比较系统的阐述。我的老师雷啸霖院士、上海交通大学刘惠春教授、澳大利亚伍伦贡大学张潮教授、美国伦斯勒理工学院张希成教授、上海交通大学张杰院士、中国科学院上海高等研究院封松林研究员、中国科学院上海微系统与信息技术研究所王曦院士、中国科学院物理研究所杨国桢院士、电子科技大学刘盛纲院士、天津大学姚建铨院士和南京大学吴培亨院士等在科学研究过程中给予了作者长期的指导与帮助, 作者对他们表示衷心的感谢。

课题组成员在本书部分内容的资料准备以及科研项目完成过程中给予了作者有力的帮助, 他们分别是黎华、张戎、谭智勇、郭旭光、吕京涛、伍滨和、徐旭光、王长、王丰、徐公杰、韩英军、何晓勇、米贤武、张拥华、周其盛、冯伟、陈镇、周涛、陈钰琳、高少文、于莉媛、熊风、尹嵘和张真真等。全书的文字和数学公式均采用 Ctex 软件输入。张戎和徐旭光承担了部分录入工作, 王丰承担了部分图的编辑工作。作者对他们表示衷心的感谢。

本书的出版得到了中国科学院科学出版基金的资助。书中的研究工作得到了各类科研基金的支持, 主要包括: 973 项目“太赫兹重要辐射源、探测及应用的基础研究”; 863 项目“毫米波与太赫兹无线通信技术开发”; 国家自然科学基金重大项目“太赫兹电磁波段的物理、器件及应用研究”; 国家杰出青年基金“半导体太赫兹源、探测器及其物理研究”; 国家重大科学仪器设备开发专项项目“基于太赫兹技术的新一代危险品分析检测仪器开发”; 中国科学院重要方向性项目“太赫

兹成像关键技术研究”以及上海市基础研究重大项目“太赫兹频段辐射源、探测及其应用基础研究”等。作者对此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

曹俊诚

中国科学院太赫兹固态技术重点实验室
中国科学院上海微系统与信息技术研究所

2011年5月于上海

目 录

前言

第 1 章 THz 波产生、探测与应用概述	1
1.1 引言	1
1.2 THz 波的产生	1
1.3 THz 波的探测	3
1.4 THz 波的应用	5
1.5 小结	7
参考文献	8
第 2 章 THz 场与低维半导体的相互作用及高场电子运输	12
2.1 THz 场与异质结的相互作用	12
2.1.1 引言	12
2.1.2 THz 场作用下异质结的电子运输	12
2.1.3 THz 场作用下异质结的多光子辅助吸收	20
2.1.4 THz 场感生的异质结带间碰撞离化	23
2.1.5 小结	27
2.2 THz 场作用下量子阱的光吸收	27
2.2.1 引言	27
2.2.2 光场作用下量子阱中电子的哈密顿量	28
2.2.3 量子阱子带间泵浦-探测光吸收	30
2.2.4 量子阱子带跃迁的相干控制	34
2.2.5 THz 场作用下量子阱子带占据数和吸收	41
2.2.6 THz 场作用下量子阱带间光吸收	43
2.2.7 小结	52
2.3 THz 场作用下超晶格的光吸收	52
2.3.1 引言	52
2.3.2 准玻色表象及激子运动方程	52
2.3.3 THz 场作用下超晶格的光吸收与极化	55
2.3.4 小结	57
2.4 半导体高场电子运输	58
2.4.1 引言	58

2.4.2	多能谷半导体高场电子输运	58
2.4.3	非抛物半导体高场电子输运	61
2.4.4	多能谷非抛物带半导体的碰撞离化过程	64
2.4.5	小结	73
	参考文献	73
第 3 章	电子学 THz 振荡器与器件模拟	84
3.1	p 型量子阱 THz 负有效质量振荡器	84
3.1.1	引言	84
3.1.2	负有效质量半导体稳态输运	84
3.1.3	THz 电流振荡模式与频率	91
3.1.4	小结	94
3.2	基于带内反射点负微分电导的 THz 振荡器	94
3.2.1	引言	94
3.2.2	基于带内反射点的 THz 振荡器设计	95
3.2.3	带内反射点 THz 振荡器模拟	96
3.2.4	小结	98
3.3	隧穿注入渡越时间 THz 振荡器	99
3.3.1	引言	99
3.3.2	量子传输边界方法	99
3.3.3	器件的直流及小信号输运特性	103
3.3.4	小结	105
3.4	双势垒共振隧穿结构 THz 振荡器	105
3.4.1	引言	105
3.4.2	维格纳-泊松耦合模型	106
3.4.3	共振隧穿结构的 I - V 特性	107
3.4.4	共振隧穿结构的 THz 电流振荡	110
3.4.5	共振隧穿结构快速开关特性	112
3.4.6	小结	117
3.5	半导体器件的流体动力学模拟	117
3.5.1	引言	117
3.5.2	抛物性流体动力学平衡方程器件模拟	117
3.5.3	非抛物能带半导体器件模拟	119
3.5.4	多能谷非抛物能带半导体器件模拟	124
3.5.5	小结	127
	参考文献	127

第 4 章 THz 半导体负有效质量振荡器非线性动力学	135
4.1 引言	135
4.2 THz 负有效质量振荡器混沌动力学	135
4.2.1 直流偏置下的 THz 振荡	135
4.2.2 周期态和混沌态之间的转变	143
4.3 THz 负有效质量振荡器的场畴模式	148
4.4 THz 场作用下电流的庞加莱分支图	151
4.5 THz 场作用下电流的功率谱分支图	155
4.6 小结	158
参考文献	158
第 5 章 THz 场作用下微带超晶格非线性动力学	161
5.1 微带超晶格振荡器中时空电场畴和负微分电导	161
5.1.1 引言	161
5.1.2 微带超晶格中的电场畴和负微分电导	161
5.1.3 微带宽度和掺杂浓度的影响	166
5.1.4 小结	168
5.2 THz 场作用下微带超晶格中电流的时空同步和混沌	169
5.2.1 引言	169
5.2.2 电场畴与自维持电流振荡	170
5.2.3 同步振荡与电流抑制	171
5.2.4 THz 场作用下微带超晶格的混沌动力学	173
5.2.5 小结	177
5.3 THz 场与磁场作用下微带超晶格混沌动力学	177
5.3.1 引言	177
5.3.2 超晶格微带电子输运	178
5.3.3 超晶格微带中电子平均速度的演化	180
5.3.4 微带超晶格的混沌动力学特性	182
5.3.5 小结	187
5.4 THz 场作用下量子点超晶格中的混沌动力学	187
5.4.1 引言	187
5.4.2 量子点超晶格电子输运	188
5.4.3 速度-电场关系与弛豫频率	189
5.4.4 THz 场作用下量子点超晶格的混沌动力学	192
5.4.5 混沌区域与控制参数的依赖关系	197
5.4.6 小结	199

参考文献	199
第 6 章 石墨烯 THz 光电特性	203
6.1 引言	203
6.2 石墨烯多量子阱中的共振隧穿	203
6.2.1 石墨烯系统的传输矩阵方法	203
6.2.2 石墨烯多量子阱电子输运特性	206
6.3 石墨烯 pn 结在 THz 频段的三阶非线性光电导	212
6.3.1 石墨烯 pn 结带内和带间光电导理论模型	212
6.3.2 三阶非线性 THz 光电导	215
6.4 石墨烯在 THz 频段的五阶非线性光电导	217
6.4.1 石墨烯带间光电导理论模型	217
6.4.2 五阶非线性 THz 光电导	218
6.5 双层石墨烯纳米带的强 THz 光电导	220
6.6 小结	223
参考文献	223
第 7 章 THz 半导体量子级联激光器	227
7.1 引言	227
7.2 THz QCL 研究进展	227
7.3 THz QCL 原理与设计	231
7.3.1 THz QCL 基本原理	231
7.3.2 THz QCL 有源区设计	232
7.3.3 THz QCL 波导设计	238
7.3.4 THz QCL 功率增强设计	238
7.4 THz QCL 模拟方法	240
7.4.1 量子动力学方法	240
7.4.2 蒙特卡罗方法	242
7.4.3 率方程方法	247
7.5 四阱共振声子 THz QCL	248
7.5.1 热声子效应	248
7.5.2 粒子数反转与增益	251
7.5.3 I - V 特性	255
7.5.4 温度特性	260
7.6 三阱共振声子 THz QCL	266
7.6.1 多体效应	266
7.6.2 参数优化	273

7.6.3	声子阱的影响	283
7.7	一阱注入区共振声子 THz QCL	287
7.7.1	电场依赖关系	289
7.7.2	温度依赖关系	293
7.8	THz QCL 制备与测量	295
7.8.1	THz QCL 材料生长与表征	295
7.8.2	双面金属波导 THz QCL	300
7.8.3	半绝缘等离子体波导 THz QCL	302
7.8.4	光谱测量	305
7.8.5	功率测量	310
7.8.6	光束表征	313
7.9	小结	316
	参考文献	316
第 8 章	THz 半导体量子阱探测器	328
8.1	引言	328
8.2	THz QWP 探测原理	328
8.3	THz QWP 器件模拟	330
8.3.1	模拟方法概述	330
8.3.2	有源区能带计算	331
8.4	THz QWP 暗电流	335
8.4.1	暗电流模型	335
8.4.2	理论与实验的暗电流比较	339
8.5	THz QWP 光电流谱	340
8.5.1	光电流产生机制	340
8.5.2	光吸收系数	341
8.5.3	理论与实验的光电流谱比较	343
8.6	THz QWP 多体效应	344
8.6.1	包括多体效应的能带结构	344
8.6.2	考虑多体效应的光电流谱	346
8.7	THz QWP 光栅耦合	348
8.7.1	光栅耦合的基本考虑	348
8.7.2	光栅衍射理论	349
8.7.3	金属光栅设计与优化	351
8.8	THz QWP 制备与测量	354
8.8.1	THz QWP 制备	354

8.8.2	THz QWP 测量	358
8.8.3	THz QWP 对 THz QCL 发射谱的表征	361
8.9	磁场调谐的 THz QWP	365
8.9.1	稀磁半导体的色散与吸收模型	365
8.9.2	磁场下吸收峰可调的 THz QWP	367
8.10	基于磁阻振荡的新型 THz 量子阱探测器	369
8.10.1	THz 场辐照下量子阱的磁阻振荡	369
8.10.2	新型 THz 量子阱探测器设计	371
8.11	小结	376
	参考文献	377
第 9 章	THz 波的传输	387
9.1	引言	387
9.2	THz 波在大气中的传输	387
9.3	THz 波在不同介质中的传输	389
9.4	THz 波在金属丝波导中的传输	393
9.5	小结	400
	参考文献	401
第 10 章	THz 通信	403
10.1	引言	403
10.2	THz 局域通信中的光子晶体反射器	403
10.2.1	光子晶体的 THz 波反射率	404
10.2.2	THz 波反射器	406
10.3	THz 波的调制	410
10.3.1	THz QCL 的直接调制	410
10.3.2	光子晶体对 THz 波的调制	411
10.4	基于 THz QCL 和 THz QWP 的无线通信演示	417
10.4.1	系统构成	417
10.4.2	器件制冷	417
10.4.3	文本传输	419
10.4.4	图片传输	420
10.4.5	音频传输	421
10.5	小结	424
	参考文献	424
第 11 章	THz 成像	429
11.1	引言	429

11.2 THz 成像分类与特点	430
11.3 基于 THz QCL 和 THz QWP 的探测与成像技术	431
11.3.1 THz QCL 的锁频技术	431
11.3.2 THz QCL 作为本振源的混频技术	431
11.3.3 THz QWP 阵列探测技术	432
11.4 基于 THz QCL 和 THz QWP 的成像实例	432
11.4.1 基于 THz QCL 的成像研究进展概述	432
11.4.2 基于 THz QCL 的主动扫描成像	433
11.4.3 基于 THz QWP 的被动成像	435
11.4.4 基于 THz QWP 的透射扫描成像	436
11.4.5 基于 THz QCL 和 THz QWP 的计算机断层成像	437
11.5 小结	439
参考文献	439

第 1 章 THz 波产生、探测与应用概述

1.1 引言

太赫兹(Terahertz, THz, $1\text{THz}=10^{12}\text{Hz}\sim 1\text{ps}\sim 300\mu\text{m}\sim 33\text{cm}^{-1}\sim 4.1\text{meV}\sim 47.6\text{K}$)波通常是指频率从 100GHz 到 10THz, 相应的波长从 3mm 到 $30\mu\text{m}$ 范围内, 介于毫米波与红外光之间, 频谱范围相当宽的电磁波^[1~9], THz 波也被称为 T 射线, 在电磁波谱中占有特殊的位置, 处于电子学向光子学的过渡区域, 其长波段与亚毫米波段相重合, 而短波段与远红外波段相重合。到目前为止, 电磁波谱中除 THz 波段以外的大部分波段都得到了广泛的研究和应用, 而 THz 波因缺乏有效的辐射产生和检测方法, 使得这一波段的电磁波未得到充分的研究和应用。因此, THz 波段也被称为电磁波谱中的“THz 空隙”, 是电磁波谱中有待进行全面而深入研究的最后一个频率窗口。2004 年美国 *Technology Review* 杂志 (www.technologyreview.com) 把 THz 技术列为改变未来世界的十大技术之一。

THz 技术正处于一个飞速发展的阶段, 正向深层次理论研究、器件研制以及应用系统研发等多方向迅速发展。THz 技术的核心是 THz 辐射源和探测器。人们用不同的方法来产生和探测 THz 辐射, 每一种方法都具有各自的特点。

1.2 THz 波的产生

THz 辐射源通常包括自由电子激光器、工作于 THz 频段的气体激光器、真空电子学 THz 源、超快激光泵浦光电导 THz 源、THz 量子级联激光器以及光子学 THz 辐射源和其他半导体电子学源等。

(1) 自由电子激光器。自由电子激光器是通过直接加速自由电子来实现激光辐射的。加速电子在有磁场作用下的周期性结构中运动, 当速度与光速接近的电子束通过偏转磁铁形成的扭转磁场时, 电子在洛伦兹 (Lorentz) 力的作用下, 通过自发辐射产生 THz 射线。自由电子激光器的激发频率随着入射电子能量的增加而增加, 频率覆盖了从远红外到 X 射线的宽广频谱, 波长主要取决于摇摆器的周期和电子束的能量。这种激光器具有高度可调、高能量和高效率的特点, 并且激射频率为电子能量的函数, 可以通过改变电子能量得到不同的激射波长。与其他 THz 辐射源相比, 自由电子激光器具有大功率、光束质量和波形结构优良、高效率和连续可调等优点^[10]。但是, 自由电子激光器价格昂贵、设备笨重, 不适合大规模的实际

应用。

(2) 气体激光器。光泵浦的气体分子激光器是一种能产生大功率、连续 THz 辐射的激光器^[11]。气体激光器主要是利用光栅调谐的泵浦激光注入到低压气体腔中产生 THz 波^[12]。气体激光器的原理是：通过光泵浦（一般泵浦激光为二氧化碳激光器，工作波长 λ 约为 $10\mu\text{m}$ ），在分子的振动/转动能级之间形成粒子数反转，从而产生受激辐射。这种激光器可以室温下工作。但是，气体激光器的激射频率依赖于所选择的气体，因此频率不可以连续调谐。另外，这种激光器价格昂贵、体积大、功耗大。

(3) 真空电子学 THz 源。回旋管是目前工作在毫米波及 THz 频段典型的真空电子学器件^[6]，功率可达千瓦以上。回旋管基于电子在磁场中的回旋谐振受激辐射机理，是一种快波器件，不需要传统微波、毫米波真空电子学器件所必需的慢波系统，可实现高频、大功率输出。在磁约束核聚变研究的推动下，回旋管的研究在毫米波及 THz 低频段进展迅速。回旋管在远程探测、高分辨雷达和 THz 辐射与物质的相互作用研究方面具有广阔的应用前景。

(4) 光电导 THz 源。其基本原理为：在光电导半导体材料（如 GaAs 等）表面沉积金属，制成偶极天线电极结构，当飞秒激光照射在电极之间的光电导半导体材料时，会在其表面瞬时（ 10^{-14}s 量级）产生大量自由电子-空穴对，这些光生载流子在外加直流电场或内建电场作用下被加速，并由于光生载流子的复合，在光电导半导体材料表面会形成变化极快的光电流，从而产生向外的电磁辐射脉冲。辐射的电磁波强度在远场情况下与电流的时间微分成正比，频率在 THz 波段^[13, 14]。影响辐射的主要因素有半导体材料电子的有效质量、光生载流子寿命、最大迁移率和材料的击穿电场。增大外电场可得到更强的 THz 辐射，制作大孔径的光电导天线可以提高 THz 辐射的效率。目前应用较多的是大面积光导天线、Grischkowsky 型偶极天线^[15] 和螺旋形天线。

(5) THz 半导体量子级联激光器 (quantum cascade laser, QCL)。常规半导体激光器是通过半导体材料导带中的电子和价带中的空穴的复合来实现激射，其激射波长完全由半导体材料的能隙决定。大多数半导体激光器只能工作在近红外和可见频段，窄带隙的铅盐材料最低频率也只能到 15THz ^[16]。最早的能产生 THz 辐射的半导体激光器是掺杂的锗/硅激光器^[17]。该器件需要在液氮温度下工作，转换效率低，只能脉冲工作，因此限制了其实际应用。QCL 从根本上改变了这一激射机制。QCL 是一种只有电子参与的单极型激光器。电子从较高的能量状态跃迁到较低的能量状态，发射出光子。其激射波长取决于由量子限制效应决定的量子阱两个激发态之间的能级差，与半导体材料的能隙无关。在半导体带间激光二极管产生之前，Lax^[18] 于 1960 年就提出了子带间激光器的概念。当时的设计是在强磁场下采用光泵浦锗晶体，从而实现导带或者价带中朗道 (Landau) 能级之间的粒子数

反转。1983年, Ivanov 和 Vasiley^[19] 首次在实验上实现了这种激光器的激励。1994年, Bell 实验室的 Faist 等^[20] 首次实现了工作于中红外波段的 QCL。2002年, 意大利的 Köhler 等^[21] 成功研制出世界上第一个 THz QCL, 其频率为 4.4THz, 功率约为 2mW。2003年, Scarlari 等^[22] 报道了由束缚态向连续态跃迁的 THz QCL; 美国麻省理工学院 (MIT) 的胡青课题组^[23] 利用声子共振散射和双面金属波导结构, 得到激励频率约为 3.0THz 的 QCL。随后, 刘惠春课题组^[24] 和曹俊诚课题组^[25] 等也先后成功研制了 THz QCL。目前, THz QCL 最大输出功率达到 250mW, 最低工作频率可以达到 1.2THz^[26], 最高工作温度达 186K。外加磁场时最低激励频率为 0.68THz, 最高工作温度可达 225K^[27]。THz QCL 的研制成功是半导体固态 THz 辐射源发展的一个里程碑。THz QCL 具有能量转换效率高、体积小、轻便和易集成等优点。其性能的不断将大大推动 THz 技术的应用。

(6) 电子学 THz 辐射源。最为典型的是耿氏振荡器^[28~30], 它具有极窄的线宽。耿氏振荡器作为电子转移器件, 其最高频率由电子能谷散射的弛豫时间决定。类似的还有共振隧穿二极管^[31]、渡越时间振荡器^[32, 33]、布洛赫 (Bloch) 振荡器^[34] 和冷等离子体振荡器^[35] 等。渡越时间振荡器按照载流子不同注入方式可分为碰撞离子振荡器和隧穿注入振荡器。隧穿注入方式可以降低器件的噪声, 提高共振频率, 性能要优于碰撞离子方式。渡越时间振荡器的振荡频率与器件长度有关系, 减小长度可提高振荡频率。这类 THz 源主要基于半导体技术和微细加工技术, 具有结构紧凑等特点。耿氏振荡器作为实验室信号源以及超导-绝缘体-超导 (superconductor-insulator-superconductor, SIS) 混频接收机的本振源, 得到了广泛的应用。

其他光子学 THz 源主要包括基于非线性效应的差频发生器^[36] 和参数振荡器 (parametric oscillation)^[37] 等。

1.3 THz 波的探测

THz 辐射源的低功率输出和 THz 频率范围内较大的热辐射背景噪声等因素对 THz 探测器的探测灵敏度等性能提出了很高的要求^[8]。早在 1960 年, THz 探测器就已经出现。当时主要采用液氮冷却的测辐射热仪 (bolometer) 和光电导探测器。有关 THz 探测器的发展可以参看 Richards^[38] 和 Haller^[39] 的综述文章。1984 年, 科学家发明了微机械的硅测辐射热仪^[40], 为后来的红外室温焦平面探测器阵列^[41] 技术奠定了基础。近来, 这种焦平面阵列探测器已经成功地应用于 THz 实时成像系统^[42]。对于 THz 辐射的探测, 目前主要采用傅里叶 (Fourier) 变换光谱探测法、时域光谱 THz 探测法、外差式探测法和 THz 半导体量子阱探测器直接探测法等。这些探测方法各有其特点。

(1) 傅里叶变换光谱探测法。傅里叶变换光谱方法是常用的中远红外频谱测量

方法。目前傅里叶变换光谱仪覆盖了从红外到 THz 波段很宽的频率范围。傅里叶变换光谱仪是基于迈克耳孙 (Michelson) 干涉仪研制而成的。通过连续改变干涉仪内一个镜面的位移, 测量得到的干涉图样包含了光源的频谱特性。对于红外及 THz 波段的光谱测量, 光源常常采用电磁辐射范围很宽的高温黑体 (如白炽硅碳棒等), 探测器则采用各种热辐射计。为了降低热噪声的影响, 热辐射计需要在低温下工作。傅里叶变换光谱仪使用的热辐射探测计是热效应探测器, 是非相干的, 因此不能记录 THz 辐射的位相信息。

(2) 时域光谱 (time-domain spectroscopy, TDS) THz 探测法。对脉冲 THz 信号, THz TDS 方法^[43] 是一种非常有效的探测手段。THz TDS 实验系统基于泵浦-探测技术, 主要由超快飞秒激光系统、扫描延迟线系统、THz 发射和探测系统、准直光学系统、数据获取和电子识别系统组成。在探测过程中, 飞秒激光被分为两束, 一束用来产生 THz 辐射, 另一束作为探测参考光束, 并被 THz 脉冲电场调制, 采用光电二极管进行信号检测^[44]。其中, THz 探测有两种采样方式, 分别是光电导采样方式和电光采样方式。光电导采样方式使用载流子寿命较短的材料。当 THz 波束照射在材料上时, 在超快探测激光波束的激励下, 很短的时间内材料中产生高密度电子-空穴对, 并形成与 THz 脉冲瞬时电场成正比的电流输出。通过改变探测参考光束的时间延迟, 可以得到整个 THz 电场随时间的变化情况。电光采样方式使用电光晶体作为 THz 脉冲的接收元件, 利用晶体的泡克耳斯 (Pockels) 效应, 即 THz 电场对探测光脉冲的偏振状态进行调制, 实现对 THz 波的探测^[43]。典型的 THz TDS 探测系统的探测频率范围为几个太赫兹。THz TDS 探测法能对 THz 电场的位相随时间变化等信息进行相干测量, 因此在 THz 光谱和成像等方面具有广阔的应用前景^[1~3]。

(3) 外差式探测法。在对 THz 波的探测中, 当需要更高的频谱分辨率时, 可以采用其他的窄带探测方法, 如外差式探测法等。外差探测技术是一种全息探测技术, 可探测电场的振幅、频率和相位等信息。它具有选波性能良好、偏振鉴别能力良好、信噪比损失小和探测器内部噪声低等特点。外差式探测系统需要一个本征 THz 振荡源。待测信号与本征 THz 信号混频, 对信号频率进行向下搬移, 然后再对搬移后的低频信号进行放大和测量。超导 (superconductor insulator superconductor, SIS) THz 探测器和热电子辐射热计 (hot electron bolometer, HEB) 是典型的外差式探测器。超导 SIS 混频技术是 20 世纪 80 年代初兴起的低噪声检测技术, 也是目前 THz 射电天文和大气物理研究的核心技术。SIS 探测器以光子辅助隧穿机制为理论基础, 探测频率范围为 0.1~1.2THz, 需要在液氮温度下工作。关于 SIS 探测器的综述性文献可参看文献 [45]。HEB 是近几年发展起来的一种高灵敏度探测器。与 SIS 技术相比, HEB 在探测 1THz 以上的辐射时其性能有更好的表现。目前 HEB 可探测的最高频率约为 5THz。

(4) THz 半导体量子阱探测器 (quantum-well photodetector, QWP)。全固态半导体 THz QWP^[46~48] 因为其响应速度快、工艺成熟、体积小和易集成等优点引起了人们的广泛兴趣^[8]。THz QWP 是红外量子阱探测器向 THz 波段的延伸, 中红外 QWP 的理论和工艺都较为成熟, 为 THz QWP 的发展奠定了重要的基础。2004 年, 刘惠春等^[46] 在传统的红外 QWP 材料体系 GaAs/AlGaAs 的基础上, 率先研制出了能在 THz 波段工作的量子阱探测器, 其峰值探测波长为 42 μm (对应频率为 7.1THz)。同年, Graf 等^[47] 设计了基于量子级联结构的 THz QWP, 其峰值探测波长为 84 μm (对应频率为 3.57THz), 工作温度为 10~50K, 10K 时的探测响应率为 8.6mA/W。THz QWP 是一种非常有应用前景的 THz 探测器^[46]。随着材料生长技术和器件工艺的发展, THz QWP 的器件性能^[8, 49] 必将得到进一步提高。

(5) 量子点单光子探测器。它可用于 THz 波的探测, 其灵敏度要比热辐射探测仪高约 1000 倍, 但是探测速度较慢, 约为 1ms^[50]。量子点单光子探测器是采用 GaAs/AlGaAs 量子点与金属单电子晶体管耦合, 吸收一个光子会有 $10^6 \sim 10^{12}$ 个电子通过量子点, 而普通探测器仅有几个电子^[51]。量子点单光子探测器可应用于光子计数成像系统^[52], 不过它需要在外加磁场下工作。

另外, 肖特基 (Schottky) 二极管也可用于 THz 辐射的探测。目前已成功利用 2.5THz 的平面肖特基器件完成太空观测实验^[53]。不过, 肖特基二极管在探测灵敏度方面不及 SIS 探测器。

1.4 THz 波的应用

THz 波之所以引起人们的广泛关注, 是因为它具有不同于微波、红外光以及 X 射线等电磁波的特点。THz 波的研究与应用涉及物理学、材料科学、生命科学、天文学、信息技术和国防安全等多个领域。它在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、宽带移动通信、卫星通信和军用雷达等方面具有广阔的应用前景。THz 波的主要应用包括以下几方面。

(1) THz 波谱分析。在自然界中, 许多现象都与 THz 频段有关。室温下气相分子的碰撞频率约为 1THz; 气态和固态等离子体以 THz 频率振动; 温度为 10K 的黑体, 其黑体辐射谱峰值对应 THz 频率; 半导体微结构的许多特征能量, 如半导体中的受主、施主及激子束缚能、光学声子能量、超导能隙、电子-声子相互作用以及各种隧穿机制等在能量尺度上都在 THz 波段。人们可以通过 THz 光谱来研究超导材料或者高温、高密度等离子体的聚集效应, 探测等离子体中密度的空间分布。许多有机分子的转动和振动能级相联系的偶极跃迁能量与 THz 电磁波光子能量相当, 呈现出强烈的 THz 吸收、色散及特征指纹谱特性, 所以可以利用 THz 电磁波来识别有机分子。物质的 THz 光谱包含许多决定其特性的重要信息, 如水、氮气、氧气、

一氧化碳和二氧化碳等,在 THz 频段具有很强的特征吸收线。THz 波还可以用于研究物质的化学组分、波谱特性以及量子相互作用过程等^[54]。利用 THz 波谱技术可以对毒品^[55, 56]和爆炸物进行识别和检测^[57],并且根据发射谱还可探测出化学组分的空间分布。例如,在 $5\sim 120\text{cm}^{-1}$ 波数爆炸物 RDX(环三次甲基三硝胺,俗称黑索金)具有 7 个特征峰。高功率的 THz 辐射还可以激发起物质内部原子及分子的非线性动力学过程,从而能够在分子水平上研究物质的非线性特性^[58]。THz-TDS 系统是一种相干测量技术,可同时获得 THz 脉冲的振幅和相位信息,而无须借助于克拉默斯-克勒尼希(Kramers-Kronig)关系进行后期处理,这一特点在研究瞬态相干动力学问题时具有很大的优势^[59, 60]。

(2) THz 成像。相对于可见光和 X 射线,THz 成像具有非常强的互补特征,特别适合于可见光不能透过,而 X 射线成像的对比度又不够的场合。THz 成像最早是在 1995 年实现的^[61],并且已经被用于物理和医学等方面的研究。THz 辐射强度测量能够达到大于 10^{10} 的高信噪比^[62],使得 THz 波非常适用于如情报、安检、刑侦、生物和医学中的各种成像应用。采用反射型成像技术,还可以实现 THz 断层扫描(computed tomography, CT)成像。THz CT 的非破坏性和非接触性对研究珍贵艺术作品和古生物化石样品等很有价值。透过艺术品的表面对内部实现可视化,从而能够在无需接触或破坏易损样品的情况下获得有价值的信息。THz 成像技术对人们的吸引力还源于其对相位敏感的光谱成像能力,利用这一点可以实现材料鉴别和功能性成像^[15, 63]。THz 波还可以用于无水介电物质的成像,虽然这些材料对这个波段是不吸收的,但可以用折射后的相位信息对不同材料进行分辨。

(3) THz 通信。THz 电磁波是很好的宽带信息载体,THz 频段可提供的带宽比微波宽得多,特别适合于卫星间及局域网的宽带移动通信。THz 波通信具有定向性好、传输信息容量大和传输更安全等众多优点。同时,THz 电磁波的光子能量约为可见光光子能量的四百分之一,因而利用 THz 电磁波做信息载体比用可见光或近中红外光能量效率高得多。人们在这方面开展了很多有益的工作^[65, 66]。THz 雷达是近年来 THz 波应用的一个重要发展方向。与微波雷达相比,从技术原理上看,THz 雷达可探测到更小的目标,实现更精确的定位,具有更高的分辨率和更强的保密性,有望成为未来高精度雷达的发展方向^[67],并在军事装备和国防安全等方面发挥巨大作用^[13, 14]。

(4) THz 生物和医疗诊断。THz 波在生命科学研究和医疗诊断领域具有重要的应用价值。由于很多生物大分子和 DNA 分子的旋转及振动能级大都处于 THz 波段,生物体对 THz 波具有独特的响应,因此可利用 THz 辐射进行疾病诊断和对生物体的探测。在医疗诊断方面,由于 THz 波的光子能量低,不易产生有害的电离,因而 THz 波适合于对生物组织进行活体检查。THz 辐射对水分子很敏感,并且有可能区分束缚水分子和自由水分子,所以通过探测生物体中的水分子可以区别健

康组织和病态组织,有望在癌症诊断方面取得突破^[68]。基因分析是一个活跃的研究领域,很多蛋白质和 DNA 的集团振动能量处于 THz 波段,所以 THz 波可用来揭示生物分子的构象信息。THz 光谱技术以及成像技术也被用于研究 DNA 碱基序列和细胞结构等,例如,可以利用 THz TDS 技术对 DNA 分子结构、生化试剂和酶的特性进行研究^[69, 70]。另外,利用 THz 辐射直接检测基因物质(如 DNA 和 RNA)的结合状态,可以实现在生物芯片技术中基因分析的无标记工作方式^[71]。相信在不久的将来,在突破一些技术瓶颈以后,将会产生一批用于疾病诊断的 THz 医疗仪器,这将带来巨大的商业机会。

(5) THz 环境与质量监测。THz 辐射能有效地探测物体的水含量^[72],因而能用于遥感和环境监测。THz 辐射还可用于污染物检测、生物和化学物质的探测、隐蔽物质检测以及食品工业的质量控制等。另外,对诸如火焰的热分析、塑料封装集成电路的引线图成像、聚合物内部的气泡以及陶瓷中的裂缝探测,THz TDS 成像都是极有前途的技术^[73]。THz 成像技术在安全检查以及产品质量控制等方面有望得到广泛的应用^[74~77]。TeraView(www.teraview.com)是一家专门从事 T 射线商业开发的高新技术公司,其主要市场在医药生产方面,为制药公司提供了一种全新的质量控制系统,确保药品里的活性成分配方的精确性。

(6) THz 射电天文探测。THz 频段是射电天文学极其重要的频段。THz 波段集中了宇宙大爆炸背景辐射的一半能量,是观测宇宙中冷暗天体(形成阶段)、早期遥远天体(如第一代恒星和星系,因为多普勒频移效应与星际尘埃辐射)、被尘埃遮掩的恒星和行星系统等天体(THz 波段消光弱)以及巨大气体和尘埃云(有丰富的分子谱线)的重要波段。与光学和近红外波段相比,THz 波有穿透星际尘埃的能力;与微波毫米波段相比,THz 波的探测则具有更高的空间分辨率。因此,THz 波段的天文观测在天体物理与宇宙学研究中具有不可替代的作用,对于理解宇宙状态和演化,包括早期宇宙演化、恒星和星系形成、行星及行星系统形成等,具有非常重要的意义。

1.5 小 结

THz 科学与技术是一个非常重要的、发展极其迅速的交叉学科前沿领域,目前正处于一个方兴未艾的发展时期^[78]。THz 技术为科技创新和国民经济的发展提供了一个非常诱人的机遇。现代材料科学与电子技术的进步,特别是纳米科学技术和微机械加工技术的发展,大大推动了 THz 科学与技术的研究与应用进程。THz 技术目前正向深层次理论研究、器件研制以及应用系统研发等多方向迅速发展,并正在推动新一代 IT 产业的兴起。可以预见,在不久的将来,THz 技术也将像光学、红外和微波等技术一样,给人类社会的诸多方面带来巨大影响。

参 考 文 献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology. *Nat. Mater.*, 2002, 1: 26.
- [2] Siegel P H. Terahertz technology. *IEEE T. Microwave Theory Tech.*, 2002, 50: 910.
- [3] Ferguson B, 张希成. 太赫兹科学与技术研究回顾. *物理*, 2003, 32: 286.
- [4] 曹俊诚. 太赫兹辐射源与探测器研究进展. *功能材料与器件学报*, 2003, 9: 111.
- [5] Cao J C. Interband impact ionization and nonlinear absorption of terahertz radiations in semiconductor heterostructures. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91: 237401.
- [6] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展. *中国基础科学*, 2006, 1: 7.
- [7] 曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器研究进展. *物理*, 2006, 35: 632.
- [8] 曹俊诚. 太赫兹半导体探测器研究进展. *物理*, 2006, 35: 953.
- [9] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. *Nat. Photonics*, 2007, 1: 97.
- [10] Carr G L, Martin M C, McKinney W R, et al. High-power terahertz radiation from relativistic electrons. *Nature*, 2002, 420: 153.
- [11] Inguscio M, Moruzzi G, Evenson K M, et al. A review of frequency measurements of optically pumped lasers from 0.1 to 8THz. *J. Appl. Phys.*, 1986, 60: R161.
- [12] Roser H P. Heterodyne spectroscopy for submillimeter and far infrared wavelengths. *Infrared Phys.*, 1991, 32: 385.
- [13] Froberg N, Mack M, Hu B B, et al. 500GHz electrically steerable photoconducting antenna array. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58: 446.
- [14] Hu B B, Froberg N, Mack M, et al. Electrically controlled frequency scanning by a photoconducting antenna array. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58: 1369.
- [15] Exter M V, Fattinger C, Grischkowsky D. High-brightness terahertz beams characterized with an ultrafast detector. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, 55: 337.
- [16] Tacke M. Lead-salt lasers. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2001, 359: 547.
- [17] Hübers H W, Pavlov S G, Shastin V N. Terahertz lasers based on germanium and silicon. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, 20: S211.
- [18] Lax B. [111] direct transition exciton and magnetoreflexion in germanium. *Phys. Rev. Lett.*, 1960, 4: 511.
- [19] Ivanov Y L, Vasiley Y B. Cyclotron resonance laser in p-Ge. *Sov. Tech. Phys.*, 1983, 9: 264.
- [20] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser. *Science*, 1994, 264: 553.
- [21] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor heterostructure laser. *Nature*, 2002, 417: 156.
- [22] Scalfari G, Ajili L, Faist J, et al. Far-infrared ($\lambda \simeq 87\mu\text{m}$) bound-to-continuum quantum-cascade lasers operating up to 90K. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82: 3165.
- [23] Williams B S, Kumar S, Callebaut H, et al. Terahertz quantum cascade laser at $\lambda \approx$

- 100 μm using metal waveguide for mode confinement. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83: 2124.
- [24] Liu H C, Wächter M, Ban D, et al. Effect of doping concentration on the performance of terahertz quantum-cascade lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87: 141102.
- [25] Cao J C, Li H, Han Y J, et al. Terahertz quantum cascade laser at 3.39THz. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25: 953.
- [26] Walther C, Fischer M, Scalfari G, et al. Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6THz. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91: 131122.
- [27] Wade A, Fedorov G, Smirnov D, et al. Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225K. *Nat. Photonics*, 2008, 3: 41.
- [28] Gunn J. B. Microwave oscillations of current in III-V semiconductors. *Solid State Commun.*, 1963, 1: 88.
- [29] Alekseev E, Pavlidis D. Microwave potential of GaN-based Gunn devices. *Electron. Lett.*, 2000, 36: 176.
- [30] Eisele H, Haddad G I. High-performance InP Gunn devices for fundamental-mode operation in D-band (110-170GHz). *IEEE Microw. Guided W.*, 1998, 8: 24.
- [31] Orihashi N, Suzuki S. One THz harmonic oscillation of resonant tunneling diodes. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87: 233501.
- [32] Lü J T, Cao J C. Steady-state and small signal analysis of terahertz ballistic tunnel transit-time oscillator. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2004, 16: 627.
- [33] Lü J T, Cao J C. Terahertz generation and chaotic dynamics in GaN NDR diode. *Semicond. Sci. Technol.*, 2004, 19: 451.
- [34] Schomburg E, Scheuerer R, Brandl S, et al. InGaAs/InAlAs superlattice oscillator at 147GHz. *Electron. Lett.*, 1999, 35: 1491.
- [35] Kersting R, Unterrainer K, Strasser G, et al. Few-cycle THz emission from cold plasma oscillations. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, 79: 3038.
- [36] Suhara T, Avetisyan Y, Ito H. Theoretical analysis of laterally emitting terahertz-wave generation by difference-frequency generation in channel waveguides. *IEEE J. Quantum Elect.*, 2003, 39: 166.
- [37] Imai K, Kawase K, Shikata J, et al. Injection-seeded terahertz-wave parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78: 1026.
- [38] Richards P L. Bolometers for infrared and millimeter waves. *J. Appl. Phys.*, 1994, 76: 1.
- [39] Haller E E. Advanced far-infrared detectors. *Infrared Phys. Techn.*, 1994, 35: 127.
- [40] Downey P M, Jeffries A D, Meyer S S, et al. Monolithic silicon bolometers. *Appl. Opt.*, 1984, 23: 910.
- [41] Rogalski A. Infrared detectors: status and trends. *Prog. Quant. Electron.*, 2003, 27: 59.
- [42] Lee A W, Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a mi-

- crobolometer focal-plane array. *Opt. Lett.*, 2005, 30: 2563.
- [43] 王少宏, 许景周, 汪力, 等. THz技术的应用及展望. *物理*, 2001, 30: 612.
- [44] Liu H, Chen Y, Bastiaans G J, et al. Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection spectroscopy. *Opt. Express*, 2005, 14: 415.
- [45] Carlstrom J E, Zmuidzinas J. *Millimeter and Submillimeter Techniques*. London: Oxford University Press, 1996.
- [46] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, et al. Terahertz quantum-well photodetector. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84: 4068.
- [47] Graf M, Scalari G, Hofstetter D, et al. Terahertz range quantum well infrared photodetector. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84: 475.
- [48] Schneider H, Liu H C. *Quantum Well Infrared Photodetectors: Physics and Applications*. Berlin: Springer, 2006.
- [49] Cao J C, Chen Y L, Liu H C. Effect of optical phonons on the spectral shape of terahertz quantum-well photodetectors. *Superlattice. Microst.*, 2006, 40: 119.
- [50] Komiyama S, Astafiev O, Antonov V, et al. Detection of single photons in the FIR-range. *Nature*, 2000, 405: 405.
- [51] Komiyama S, Astafiev O, Hirai H. A single-photon detector in the far-infrared range. *Nature*, 2000, 403: 405.
- [52] Ikushima K, Yoshimura Y, Hasegawa T, et al. Photon-counting microscopy of terahertz radiation. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88: 152110.
- [53] Gaidis M C, Picket H M, Smith C D, et al. A 2.5 THz receiver front end for spaceborne applications. *IEEE T. Microwave Theory Tech.*, 2000, 48: 733.
- [54] Kaindl R A, Carnahan M A, Hägele D, et al. Ultrafast terahertz probes of transient conducting and insulating phases in an electron-hole gas. *Nature*, 2003, 423: 734.
- [55] Watanabe Y, Kawase K, Ikari T, et al. Component spatial pattern analysis of chemicals using terahertz spectroscopic imaging. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83: 800.
- [56] Lu J Y, Chen L J, Kao T F, et al. Terahertz microchip for illicit drug detection. *IEEE Photonic. Tech. Lett.*, 2006, 18: 2254.
- [57] Shen Y C, Lo T, Taday P F, et al. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86: 241116.
- [58] Cavalleri A, Wall S, Simpson C. Tracking the motion of charges in a terahertz light field by femtosecond X-ray diffraction. *Nature*, 2006, 442: 664.
- [59] Dekorsy T, Auer H, Waschke C, et al. Emission of submillimeter electro-magnetic waves by coherent phonons. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74: 738.
- [60] Corson J, Mallozzi R, Orenstein J, et al. High-temperature superconductivity - electrons pair themselves. *Nature*, 1999, 398: 221.
- [61] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves. *Opt. Lett.*, 1995, 20: 1716.
- [62] Nagel M, Bolivar P H, Brucherseifer M, et al. Integrated THz technology for label-free