

半导体科学与技术丛书

半导体太赫兹源、 探测器与应用

曹俊诚 著



科学出版社

www.sciencep.com

半导体科学与技术丛书

半导体太赫兹源、探测器与应用

曹俊诚 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要论述了半导体太赫兹 (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。全书共分 11 章, 包括第 1 章 THz 波产生、探测与应用概述; 第 2 章 THz 场与低维半导体的相互作用及高场电子输运; 第 3 章电子学 THz 振荡器与器件模拟; 第 4 章 THz 半导体负有效质量振荡器非线性动力学; 第 5 章 THz 场作用下微带超晶格非线性动力学; 第 6 章石墨烯 THz 光电特性; 第 7 章 THz 半导体量子级联激光器; 第 8 章 THz 半导体量子阱探测器; 第 9 章 THz 波的传输; 第 10 章 THz 通信; 第 11 章 THz 成像。

本书适合从事 THz、红外、微波、天文和生物医学等领域的工程技术人员, 以及大专院校和科研院所相关专业的本科生、研究生和科研工作人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

半导体太赫兹源、探测器与应用/曹俊诚著. —北京: 科学出版社, 2012
(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-033402-2

I. ①半… II. ①曹… III. ①电磁波-半导体技术 IV. ①O441.4 ②TN3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 013554 号

责任编辑: 钱 俊 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 2 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 2 月第一次印刷 印张: 28 3/4

字数: 560 000

定价: **98.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有蚪

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《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、推动我们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输运	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输运	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 半导体高场电子输运	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射。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, Scaleri 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, 得到激射频率约为 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。外加磁场时最低激射频率为 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。其性能的不断提髙将大大推动 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化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, 性能要优于碰撞离化方式。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