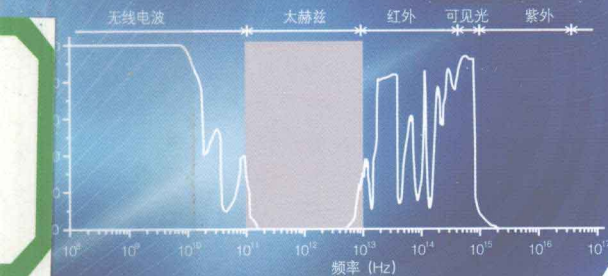


【美】Yun-Shik Lee 著
崔万照 等译
董士伟 李 韵 审校

太赫兹科学与技术原理

Principles
of Terahertz Science
and Technology



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer

著作权合同登记 图字:军-2011-156 号

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹科学与技术原理/(美)李允植(Lee, Y. S.)著;

崔万照等译. —北京:国防工业出版社, 2012. 8

书名原文: Principles of Terahertz Science and Technology

ISBN 978-7-118-08023-0

I. ①太... II. ①李... ②崔... III. ①电磁辐射-研究 IV. ①0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 157929 号

Translation from the English Language edition;

Principles of Terahertz Science and Technology by Lee, Yun-Shik

© 2009 Springer Science + Business Media, LLC ALL Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media, LLC 授权国防工业出版社出版。

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 × 960 1/16 印张 19½ 字数 348 千字

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 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)科学作为一门跨学科的新兴交叉科学,衔接了宏观经典电磁波理论与微观量子理论。太赫兹波由于其比微波高1个~4个数量级的带宽特性和比光波高的能量转换效率,在超高速率空间通信、超高分辨率武器制导、医学成像、物质太赫兹光谱特征分析、安全检查、材料检测等领域具有重要的研究价值和广泛的应用前景。世界上多个国家纷纷将太赫兹科学列为战略性科技方向:美国政府2004年就将太赫兹技术列为“改变未来世界的十大技术”之一;欧洲组织了跨国的多学科参与的大型合作太赫兹研究项目;日本2005年将太赫兹科学列为“国家支柱十大重点战略目标”之首。对于已在微波、毫米波以及光学科学领域具有很好的研究基础的我国研究者而言,深入开展太赫兹科学研究工作势在必行,因此大力发展太赫兹相关技术具有前瞻性战略意义。

目前,国内外太赫兹研究者主要致力于探究多种太赫兹源的研制、太赫兹波的探测和控制技术。对于国内希望从事太赫兹研究或者即将进行太赫兹研究的相关领域人员而言,本书对太赫兹科学的基础理论及相关应用课题进行基础而系统地介绍,是一本综合性强、适用性广、时效性高的太赫兹专业书籍。本书无疑涵盖了太赫兹科学发展的不同阶段的相关技术,不仅详尽地说明了主要的太赫兹技术,如太赫兹波的产生、探测和控制的基本原理,而且还讨论了太赫兹科学的最新发展,介绍其与各研究领域的技术结合所产生的新兴技术进步,可使读者能够举一反三,结合本专业领域技术与太赫兹科学技术进行思考与研究。这也是我们希望将本书翻译出来推荐给国内读者的主要原因。

本书既适合于具有一定电磁场与微波技术以及光学基础,并希望了解太赫兹科学技术理论基础的初级入门者,也适合于太赫兹领域相关研究者参考使用。

全书共分为8章,其中第1章由史平彦、崔万照翻译;第2章由王晓海、崔万照

翻译;前言、第3章和第8章由崔万照翻译;王瑞、王新波、李韵、张娜、胡天存分别完成第4~7章的翻译;崔万照、李韵对全书进行了统稿,董士伟、李韵对全书进行了仔细的审校。禹旭敏参加了译文的讨论工作,在此表示感谢。本书能够出版,得到了总装备部装备科技译著出版基金、国防预研基金(9140C5304020704)的资助,感谢中国空间技术研究院神舟学院西安分院、中国电子学会空间电子学分会、中国宇航学会空间电子学专业委员会的大力支持。译者在繁忙的工作之余,能够潜心研究,仔细推敲,乃至译成本书,译者特别感谢空间微波技术重点实验室所营造的环境。我们衷心希望本书能对从事太赫兹研究的广大同行有所帮助,促进我国太赫兹研究的发展,加速其在实际中的应用。

由于译者水平有限,书中难免有疏漏与欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

前言

近 20 年来,太赫兹技术已经足够成熟,到了全面总结和回顾相关的研究主题的时候了。许多不同的学科如超快光谱学、半导体器件制造和生物医疗成像涉及到太赫兹技术的最新发展。建立广大研究人员的公共交流平台使研究人员之间能够顺利的交流是一项艰巨的任务。而且,太赫兹领域快速发展,同时太赫兹技术处于过渡时期。直到最近,太赫兹研究工作主要关注于太赫兹的产生和探测,但关注点已经转移到实际应用上,如高速通信、分子光谱学、安全成像和医疗诊断等。

本书覆盖了广泛的主题和基础性问题。不同学科的研究人员已经帮助研发了新的太赫兹技术,以便到达下一个层次,即实际应用,技术需要相关的研究人员相互间的理解和交流。本书致力于实现为研究人员提供一般参考、搭起“太赫兹空隙”桥梁的共同目标。

我努力将太赫兹技术和科学的基础理论阐释给那些潜在的读者。本书主要介绍了太赫兹波的产生、探测和控制,还讨论了许多太赫兹波与物理、化学和生物系统相互作用的基本过程。不同领域的科学家和工程师认识到目前太赫兹空隙可逼近电磁频谱要归功于太赫兹源和探测技术的最新进展。许多研究人员正寻找将新技术与其专业和研究领域结合的途径。希望加入或将加入太赫兹研究的青年学者也将发现该领域由于存在许多障碍而具有挑战性,其中之一是缺乏综合性的介绍或指导。太赫兹技术的潜在用户应该具备太赫兹科学和技术的基本原理及实现技术的基础;我希望本书成为新入门学者介绍性的指导。

在本书的写作过程中,许多同事、朋友和学生给予我有价值的指正和引导。感谢所有的贡献者虽然是不可能的,但我真诚感谢那些本书中引用的工作。我必须感谢 Joe Tomaino、Andy Jameson 和 Jeremy Danielson 的有价值的建议。我感谢国家科学基金和亚历山大·冯·洪堡基金的资助。最后,感谢我的妻子 Jung-Hwa 以尽可能的方式给予我的支持。

Yun - Shik Lee

2008 年 9 月

V

目 录

第一章 引言	1
1.1 太赫兹频段	1
1.2 太赫兹的产生与检测	3
1.2.1 太赫兹源	3
1.2.2 太赫兹探测器	5
1.3 太赫兹应用	6
第二章 太赫兹与物质相互作用的基础理论	9
2.1 物质中的电磁波	9
2.1.1 波动方程	10
2.1.2 反射和透射	12
2.1.3 相干透射光谱	14
2.1.4 吸收和色散	16
2.1.5 等离子体频率	18
2.1.6 电偶极子辐射	18
2.1.7 自由空间中的准光传播	20
2.2 太赫兹辐射及元激发	24
2.2.1 电偶极相互作用的量子理论	24
2.2.2 类氢原子的能级	29
2.2.3 分子的旋转和振动模式	32
2.2.4 晶格振动	38
2.3 激光基础	41
第三章 宽带太赫兹脉冲的产生与检测	45
3.1 超快光学	45
3.1.1 线性色散媒质中的光脉冲传播	45
3.1.2 飞秒激光器	47

3.1.3	时间分辨的泵浦—探测技术	51
3.1.4	太赫兹时域光谱学	51
3.2	基于光电导天线的太赫兹发射器和检测器	52
3.2.1	光电导天线	52
3.2.2	偏置光电导天线产生的太赫兹脉冲	54
3.2.3	衬底透镜:准直透镜和超半球形透镜	59
3.2.4	大孔径光电导发射器的太赫兹辐射	61
3.2.5	基于光电导天线的分辨率太赫兹场测量	66
3.3	光整流	68
3.3.1	与非中心对称媒质的非线性光学作用	68
3.3.2	二阶非线性极化及极化率张量	71
3.3.3	光整流的波动方程	74
3.3.4	光学和太赫兹频段的色散	77
3.3.5	太赫兹频段电光晶体的吸收	79
3.4	自由空间电光采样	81
3.5	超宽带太赫兹脉冲	86
3.5.1	光整流和电光采样	87
3.5.2	光电导天线	89
3.6	电子加速器的太赫兹辐射	90
3.7	产生太赫兹脉冲的新技术	93
3.7.1	铌酸锂斜光脉冲的相位匹配	93
3.7.2	空气中的太赫兹产生	95
3.7.3	准相位匹配晶体的窄带太赫兹产生	96
3.7.4	太赫兹脉冲成形	98
第四章	连续波太赫兹源和探测器	104
4.1	光混频	104
4.2	差频产生和参量放大	109
4.2.1	差频产生的原理	109
4.2.2	双泵浦光束差频产生	111
4.2.3	光参量放大	115
4.3	远红外气体激光器	117

4.4	P 型锗激光器	119
4.5	微波倍频	121
4.6	量子级联激光器	123
4.6.1	发射激光和级联效应	124
4.6.2	预期发展	125
4.7	反向波振荡器	125
4.8	自由电子激光器	128
4.8.1	工作原理	129
4.8.2	自由电子激光器设备	130
4.9	热探测器	131
4.9.1	测辐射热探测器	131
4.9.2	热电探测器	135
4.9.3	Golay 探测器	137
4.10	外差接收机	138
第五章	太赫兹光学	141
5.1	固体在太赫兹频段的介质特性	141
5.2	太赫兹光学材料	143
5.2.1	聚合物	143
5.2.2	介质和半导体	145
5.2.3	导体	149
5.3	光学部件	150
5.3.1	聚焦元件	150
5.3.2	抗反射涂层	151
5.3.3	带通滤波器	152
5.3.4	极化	154
5.3.5	波片	155
5.4	太赫兹波导	157
5.4.1	矩形波导理论	157
5.4.2	空金属管	159
5.4.3	介质光纤	160
5.4.4	平行金属板	162

5.4.5	金属线波导	164
5.5	太赫兹频段人工材料	169
5.5.1	超介质材料	169
5.5.2	光子晶体	173
5.5.3	等离子体学	179
5.6	太赫兹极化声子	188
第六章	原子和分子的太赫兹光谱学	192
6.1	Rydberg 原子的操控	192
6.2	旋转光谱学	196
6.2.1	旋转跃迁的基本原理	196
6.2.2	高分辨率光谱	198
6.2.3	大气和天体光谱学	199
6.3	生物分子	207
6.3.1	液体水	208
6.3.2	小生物分子的常规模式	210
6.3.3	大分子动力学	220
第七章	T 射线成像	229
7.1	引言	229
7.2	宽带太赫兹脉冲成像	231
7.2.1	幅度和相位成像	231
7.2.2	实时 2D 成像	233
7.2.3	T 射线层析成像	235
7.3	连续波太赫兹辐射成像	240
7.3.1	光栅扫描成像	240
7.3.2	用微测辐射仪照相机的实时成像	245
7.4	用于安全的毫米波成像	247
7.4.1	主动成像	248
7.4.2	被动成像	250
7.5	T 射线成像的医疗应用	253
7.5.1	人体组织的光学特性	253
7.5.2	癌症诊断	254

7.5.3	皮肤烧毁的反射成像	257
7.5.4	龋齿的检测	258
第八章	凝聚物质的太赫兹频谱学	259
8.1	半导体的带内跃迁	259
8.1.1	本征半导体的能带结构	259
8.1.2	光载流子动力学	260
8.1.3	杂质态	263
8.1.4	半导体纳米结构:量子阱、量子线、量子点	265
8.2	强关联电子系统	273
8.2.1	常规超导体中的准粒子动力学	274
8.2.2	高温超导体的低能激发	278
参考文献		287
索引		297

第一章 引言

太赫兹 (THz) 辐射是频率介于微波和红外波段之间的电磁辐射。太赫兹辐射是不可见的,但是由于其与远红外频谱重合,我们可以感受到太赫兹辐射产生的热量。自然形成的太赫兹辐射充满了我们日常生活的空间,然而高效、微型太赫兹源及探测器等技术性难题是造成这部分电磁频谱利用率很低的主要原因。实用技术的缺乏导致太赫兹频段被称为“太赫兹空隙”。近 20 年来,这个技术空隙已经在迅速地缩小。光学技术在太赫兹的高频段取得了巨大进步,与此同时微波技术向太赫兹的低频段延伸。本章简要介绍太赫兹辐射的基本特性及其与物质的相互作用,为后续章节讨论太赫兹科学与技术的进展奠定基础。

1.1 太赫兹频段

“太赫兹辐射”是特指这个频段最常用的术语,与微波、红外辐射和 X 射线类似。采用频率单位命名一个频段是非常罕见的。然而由于“太赫兹”已经成为该领域的象征性符号,因此本书中我们将广泛使用该术语。另一个可选的、似乎更妥当的术语是“T 射线”,其中“T”代表太赫兹,这个术语最初来源于成像技术,将在第七章讨论 T 射线成像技术及其应用时采用该术语。

直至最近,几个不同领域的研究人员各自对太赫兹技术进行了研究。实际上,不同的委员会学者会使用不同的单位描述太赫兹辐射的频谱。本书中,我们使用太赫兹 (10^{12} Hz) 作为通用的单位,如有需要也将使用其他一些单位。常用的单位及其在 1 THz 时的转换关系如下:

- 频率: $\nu = 1 \text{ THz} = 1000 \text{ GHz}$
- 角频率: $\omega = 2\pi\nu = 6.28 \text{ THz}$
- 周期: $\tau = 1/\nu = 1 \text{ ps}$
- 波长: $\lambda = c/\nu = 0.3 \text{ mm} = 300 \mu\text{m}$
- 波数: $\bar{k} = k/2\pi = 1/\lambda = 33.3 \text{ cm}^{-1}$
- 光子能量: $h\nu = \hbar\omega = 4.14 \text{ meV}$
- 温度: $T = h\nu/k_B = 48 \text{ K}$

式中: c 为真空中的光速, h 为普朗克常数, k_B 为波尔兹曼常数。物理学家倾向于采用 μm 和 meV 分别作为光子波长及能量的单位; 化学家通常采用 cm^{-1} 作为波数的单位; 工程师则采用 mm 和 GHz 分别作为波长和频率的单位。物理学中, 角波数 ($k = 2\pi/\lambda$) 通常简称为波数。本书中, 在不引起歧义的情况下我们采用该符号的简称。

- 毫米波 (Millimeter wave, MMW): $1\text{mm} \sim 10\text{mm}$, $30\text{GHz} \sim 300\text{GHz}$, $0.03\text{THz} \sim 0.3\text{THz}$
- 亚毫米波 (Submillimeter wave, SMMW): $0.1\text{mm} \sim 1\text{mm}$, $0.3\text{THz} \sim 3\text{THz}$
- 远红外辐射 (Far infrared radiation, Far-IR): $(25 \sim 40) \sim (200 \sim 350)\mu\text{m}$; $(0.86 \sim 1.5)\text{THz} \sim (7.5 \sim 12)\text{THz}$

- 亚太赫兹辐射: $0.1\text{THz} \sim 1\text{THz}$.

这些波段也可以通过其技术特征区分。毫米波辐射计和传感器是基于微波技术的固态电路,传统远红外应用基于光学和热敏器件。

1.2 太赫兹的产生与检测

研究人员利用光学和电子学的技术进步成果设计了许多不同类型的太赫兹源和传感器。宽带和连续波(Continuous - Wave, CW)太赫兹技术由于其辐射特性类似而归为一类,将在第三、四章讨论。本节从不同工作原理对太赫兹的产生与检测的技术方案进行简要介绍。

1.2.1 太赫兹源

采用非线性媒质对入射电磁波进行非线性频率变换是产生太赫兹辐射的方法之一(图 1.2)。光整流和差频产生(Difference Frequency Generation, DFG)都是二阶非线性光学处理过程。在该过程中,两个频率分别为 ω_1 、 ω_2 的光子与非线性晶体相互作用产生频率为 ω_r 的太赫兹光子,即: $\omega_r = \omega_1 - \omega_2$ 。宽频带(带宽约为 10THz)飞秒激光脉冲通过光整流形成宽带太赫兹脉冲,其脉冲形状与光脉冲的包络类似。两束 CW 光波束通过 DFG 产生了 CW 太赫兹辐射。基于微波技术的固态太赫兹源则利用二极管的强非线性 I - V 特性将入射微波信号转换为其在太赫兹频段的谐波。

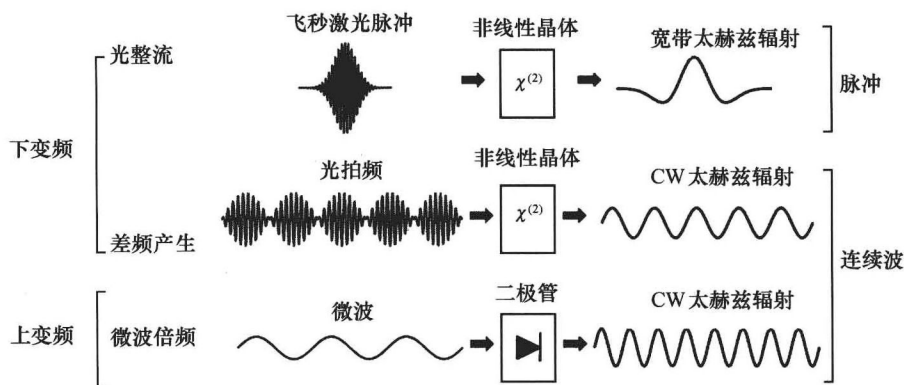


图 1.2 非线性媒质中的太赫兹产生

加速的电荷和时变的电流辐射电磁波(图 1.3)。太赫兹辐射可以通过激光束激励偏置光电导(Photoconductive, PC)天线产生。PC 天线由沉积在半导体基

底上的两个金属电极构成。照射到电极空隙的光束产生光载流子,静态偏置场加速自由载流子的运动。光电流随时间变化,其大小对应入射激光束强度。因此,飞秒激光脉冲形成宽带太赫兹脉冲。不同频率的两束激光混频形成光拍频并在拍频处产生 CW 太赫兹辐射,这种技术称为光混频。

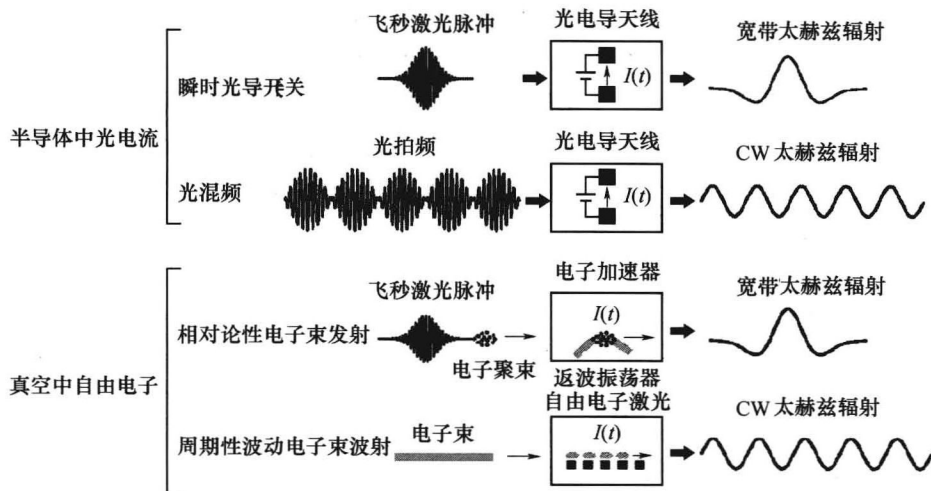


图 1.3 电子加速产生的太赫兹辐射

电子加速器采用相对论性电子产生极强的太赫兹辐射。飞秒激光脉冲触发电子源形成极窄的电子脉冲。当电子加速到某一相对论速度后,电子撞击进入金属目标或者在磁场作用下做圆周运动。通过这种瞬态电子的加速,产生了相干太赫兹辐射。

反向波振荡器 (Backward wave oscillator, BWO) 是实验室型仪器,而自由电子激光器 (Free - electron laser, FEL) 作为一种小规模电子加速器其体积非常大。尽管这两类仪器体积差别非常大,但其太赫兹产生机理相似。两类仪器均采用周期性结构使电子束波动: BWO 有一个金属栅,而 FEL 由一个磁体阵列组成。电子的周期性加速形成了 CW 太赫兹辐射。

激光作用需要粒子数反转的两能级量子系统 (图 1.4)。Far - IR 气体激光器利用分子旋转能级,其跃迁频率落入太赫兹频谱范围。P 型锗激光器为电泵浦固态激光器。浸入正交电磁场的热载流子形成两个朗道能级,激光作用依赖于两个朗道能级的粒子数反转。量子级联激光器 (Quantum Cascade Laser, QCL) 是半导体异质结构激光器,由不同的半导体层周期性交替组成。这些半导体纳米结构亚带之间的跃迁产生太赫兹光子。QCL 中电子经历连续的带间跃迁产生了相干太赫兹辐射。

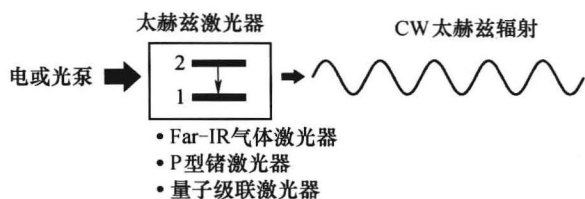


图 1.4 激光器产生的太赫兹辐射

1.2.2 太赫兹探测器

太赫兹探测方案可分为两大类:相干探测技术和非相干探测技术。两者的本质区别是相干探测测量场的幅度及其相位,而非相干检测仪测量场的强度。相干探测技术与太赫兹产生技术息息相关,因为它们具有相同的基本原理和关键器件。特别是,光学技术中采用同一光源同时作为产生和探测之用。

图 1.5 给出了常用的相干探测方案。自由空间电-光(Electro-Optic, EO)采样利用 Pockels 效应测量时域宽带太赫兹脉冲的实际电场,该采样与光整流密切相关。太赫兹场在非线性光学晶体中感应产生双折射,其大小与场幅度成正比。整个波形由弱光信号检测器测量的场致双折射决定,该场致双折射是太赫兹与光脉冲相对时延的函数。

采用 PC 天线的探测法也可以测量时域的宽带太赫兹脉冲。在不存在偏置场的情况下,当探测光脉冲注入光载流子时,太赫兹场在光电导带隙感应出电流。感应的光电流大小与太赫兹场的幅度成正比。通过测量光电流随太赫兹脉冲与光信号检测器之间时延的变化,可在时域映射得到太赫兹脉冲形状。

宽带太赫兹的产生和探测混合装置将测量样品所引起的太赫兹脉冲幅度和相位的变化,所获得的信息足以同时确定样品的吸收和色散特性。上述技术被称为太赫兹时域谱(Time-Domain Spectroscopy),或简称为太赫兹-TDS。

光混频利用光电导开关测量 CW 太赫兹的辐射。在这种情况下,光电流表现出正弦特性,它由光拍频和太赫兹辐射间的相对相位决定。

外差探测采用的非线性器件被称为“混频器”。肖特基二极管通常被用作混频器。混频器的关键过程为下变频,即太赫兹信号 ω_s 与参考辐射处的固定频率 ω_{LO} 的混频。混频器产生差分频率的输出信号,即“中频” $\omega_D = |\omega_s - \omega_{LO}|$ 。输出信号的幅度与太赫兹幅度成正比。不同于光学技术,外差探测通常被用于探测非相干辐射。

常用的非相干探测器为热敏元件,如辐射热探测器、Golay 探测器和热电器件。连接在散热器上的辐射吸收体是所有热探测器上都有一个单元。通过温

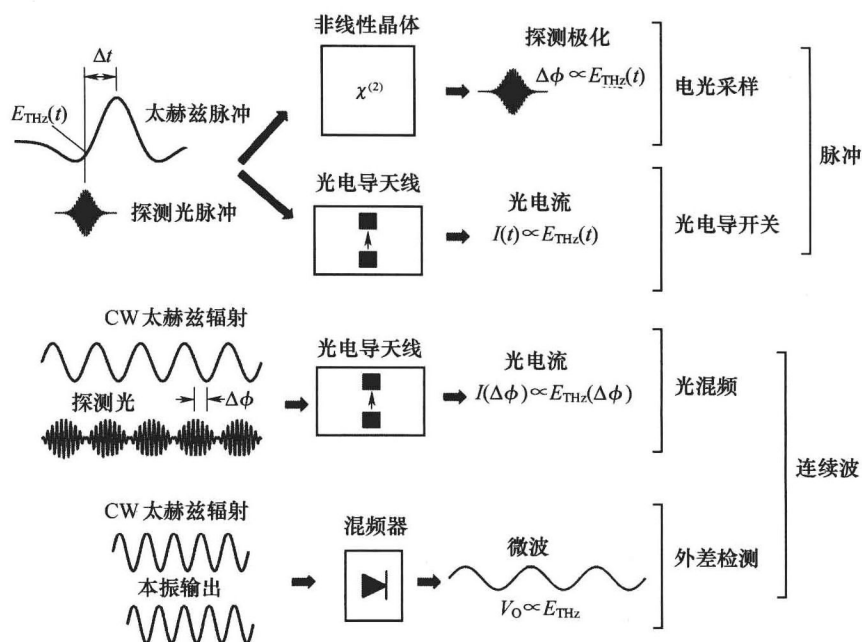


图 1.5 太赫兹辐射相干检测

度计测量吸收体上的温度升高来计量辐射的能量。热探测器的类型按照测量温度升高方法的不同来区分。通常,辐射热探测器工作在低温环境下,配备有由重掺杂半导体如 Si 或 Ge 制成的电阻温度计。光电探测器采用由温度变化引起自发电极化的热电材料制成。Golay 探测器通过吸收体后面密封室内的少量气体传送热量。光学反射测量法探测由压力增大引起的薄膜形变。这些热探测器可对很宽频段范围的辐射产生响应。由于辐射吸收体在温度测量时必须达到热平衡状态,因此非相干检测器的探测响应时间较典型的光学探测器慢。

1.3 太赫兹应用

太赫兹频谱区域聚集了无数的频谱特征,这些谱特征与基本的物理过程如分子的转动跃迁、有机化合物的大振幅振动、固体的晶格振动、半导体的带内跃迁、超导体的能带带隙相关。太赫兹应用充分利用了这些材料对太赫兹辐射响应的独有特性。

与邻近频段的无线电波和红外辐射相比,由于大气组成分子的旋转谱线,太赫兹波段呈现极高的大气不透明度(图 1.6)。特别地,水蒸气吸收是大气中太

赫兹衰减的主要过程。图 1.7 为水蒸气的高分辨率透射谱。实际设计太赫兹应用的工作方案时,水吸收是一个必须要考虑的重要因素。

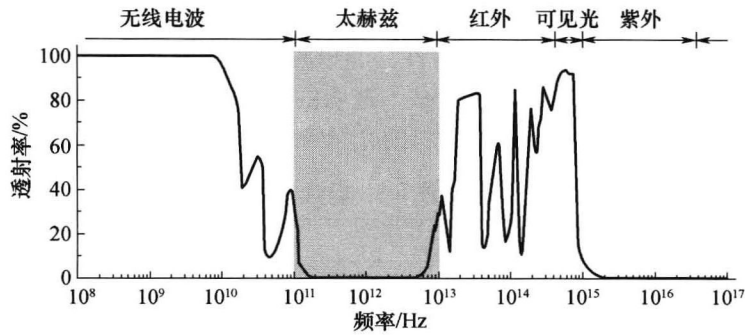


图 1.6 电磁波的大气透射谱

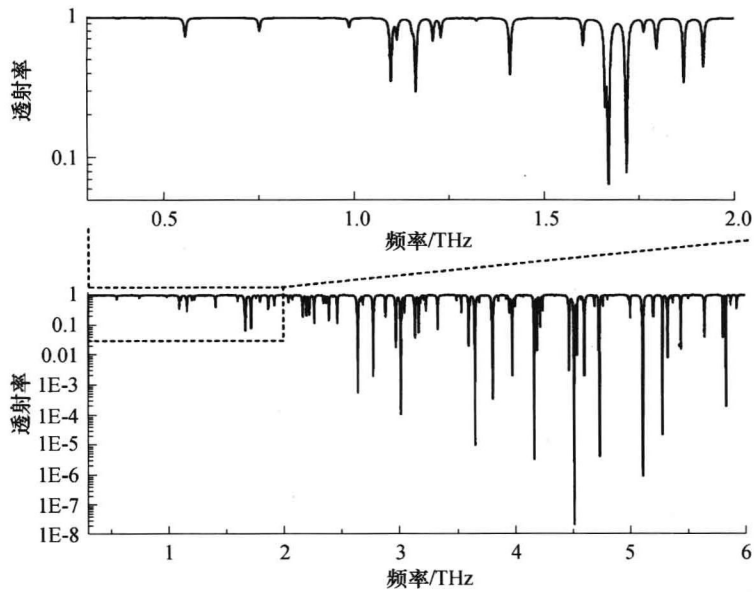


图 1.7 0.3THz ~ 6THz 水蒸气透射谱

每种分子的特征谱线结构可以用于鉴别未知样品。而且,谱线形状提供了分子碰撞微观机理的重要信息。高分辨率太赫兹频谱已用于监测地球大气和观察星际媒质的分子。

太赫兹频谱的有机分子和生物分子的光谱特征与其大幅度振动和分子间的相互作用相关。太赫兹频谱能够分析这些分子的动力学特性,因此它能够用于炸