



装备科技译著出版基金

空间微波技术学术著作丛书

# Terahertz Techniques

# 太赫兹技术

[德] Erik Bründermann [德] Heinz-Wilhelm Hübers [英] Maurice FitzGerald Kimmitt 著

刘丰 朱忠博 崔万照 席晓莉 赵卫 译

刘丰 崔万照 审校



Springer



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

# 太赫兹技术

**Terahertz Techniques**

[德] Erik Bründermann Heinz - Wilhelm Hübers

[英] Maurice FitzGerald Kimmitt

著

刘丰 朱忠博 崔万照 席晓莉 赵卫 译

刘丰 崔万照 审校

国防工业出版社

· 北京 ·

# 著作权合同登记 图字:军-2014-054号

## 图书在版编目(CIP)数据

太赫兹技术 / (德)布伦德曼, (德)胡贝尔, (英)金米特著; 刘丰等译. —北京: 国防工业出版社, 2016. 2

书名原文: Terahertz Techniques

ISBN 978-7-118-10298-7

I. ①太… II. ①布… ②胡… ③金… ④刘…  
III. ①电磁辐射—研究 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 246709 号

Translation from English language edition:

*Terahertz Techniques*

by Erik Bründermann Heinz – Wilhelm Hübers Maurice Kimmitt

Copyright © 2012 Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer

Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Berlin Heidelberg 授权国防工业出版社独家出版发行。

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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$  字数 402 千字

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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

## 中文版序

太赫兹技术的研究是一个快速发展的领域,过去的许多年里在太赫兹新技术领域里涌现出大量有价值的技术突破和科学发现。未来太赫兹技术在商业上的应用,例如,安全防卫、生物医学、工业作业,其重要性将更加突出。随着中国太赫兹领域研究的推进,该领域研究者快速增加,推出一本全面而详细的中文太赫兹教科书显然非常有意义。这本书主面向研究生,同时也可作为初涉太赫兹领域研究人员的入门资料,读者还可以在本书的参考文献中找到很多有用的信息。

我们感谢国防工业出版社和译者对翻译出版本书的中文版付出的辛勤工作。最后我们希望本书的读者能从本书有所受益。

## 译者序

太赫兹(Terahertz, THz)频段作为电磁波谱中的占据要害位置的中间频段,桥接了光域中的红外频段及微波域中的毫米波频段;太赫兹科学作为一门跨学科的新兴交叉学科,衔接了宏观电磁波理论和微观量子理论;太赫兹技术作为21世纪科研界热门课题,其进展将会极大地改变人类的生活。

太赫兹频段比传统微波频段频率高约4个数量级,其带来的超大带宽和独特的频率特性,在基础物理科学和材料科学、天文学、瞬态动力学、生物医学、超高速通信、高分辨率成像、穿透成像、安全检查、无损检测等研究领域具有重要的研究价值和广泛的应用前景。世界各国对太赫兹技术的研究倾注了极大的关注,美国、日本、欧盟等多个国家地区将太赫兹技术列为战略科技发展方向,我国科研工作者也非常关注这个领域,广大从事微波/毫米波领域以及光学领域研究的学者已经分别从自己的视角对这个领域开展了探索,目前研究工作正在不断深化,开展该领域技术具有前瞻性战略意义。

目前,国内外太赫兹技术研究者主要致力于研究探索太赫兹辐射源技术、太赫兹探测技术、工作在太赫兹频段的各种元器件及其在太赫兹波操控中的应用以及各种太赫兹波应用技术。对于国内希望了解这个领域以及正在进行相关领域研究的人员而言,本书对太赫兹技术的基础原理、关键器件设备、典型应用等方面进行了系统而全面的介绍,是一本适用性广、综合性强、时效性高的专业书籍。本书详实介绍了太赫兹技术发展不同阶段的重大事件和技术特点,太赫兹辐射的产生、探测和各种功能器件,还探讨了太赫兹技术应用的最新进展,突出了其与其他研究领域相结合产生的最新进步,使得读者能够举一反三,结合本专业领域技术与太赫兹技术进行思考和研究,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。

本书的3位原著者分别长期从事光电子学、电子学、高能物理学等方面的研究,故本书的一大特点是内容十分全面和均衡。不论读者原先是否具备电磁场/

微波技术基础抑或光学/光电子学基础,都可以很快入门到太赫兹世界,同时本书也适合太赫兹领域相关研究者参考使用。

《空间微波技术学术著作丛书》由中国空间技术研究院西安分院和空间微波技术国家重点实验室组织和选题。全书共7章,第1章由崔万照翻译,第2、3、4、6章由刘丰、赵卫翻译,第5章由朱忠博翻译,第7章由席晓丽、尹有为、宋忠国翻译,刘丰、崔万照对全书进行了统稿及审校。本书能够出版,得到了总装备部装备科技译著出版基金的资助,还得到了国防预研基金(9140C530404130C53193)、自然科学基金(11447164)、国家重点实验室开放基金(061Z651400)的支持,感谢中国空间技术研究院西安分院、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国电子学会空间电子学分会、西安理工大学自动化与电子工程学院的大力支持。译者在繁忙工作之余能够潜心研究、仔细推敲、乃至译成本书,要特别感谢空间微波技术国家级重点实验室、瞬态光学与光电子技术国家重点实验室所营造的良好环境。我们衷心希望本书能够对从事太赫兹技术领域研究的广大同行有所帮助,促进我国太赫兹技术的发展,并加速其在实际中的应用。

由于译者水平有限,译文中的问题在所难免,望读者批评指正。

译者

## 前 言

太赫兹频段可能是电磁波谱中最后一个被人类探索的频段,尽管如此,早在 20 世纪前期海因里希·鲁本斯(Heinrich Rubens)等学术先驱在太赫兹领域开展的研究就已经在早期物理学发展的进程里做出了显著的贡献。Rubens 及其同事测量了低至 6 THz 的黑体发射谱,这最终导致普朗克(M. Planck)发现了黑体辐射定理。几十年来,这个频段尽管已经在凝聚态物质研究中进行了有趣的应用,但仍一直是个新鲜的领域。然而,到了 20 世纪 70 年代,太赫兹频段在天文学研究中得到特别的关注,而直到那个时候,它仍被称为远红外频段或亚毫米波频段。随后,人们建造了大量精密的太赫兹望远镜,其中不乏许多空基和天基的观测器。在过去的几年中,太赫兹研究和发展得到格外的关注,这是由该频段辐射源、探测器、光学元件及其系统巨大的进步触发的。太赫兹技术现在已经处于商业应用的边缘,例如,在安防、生物医学、宽带通信、无损检测以及过程控制等领域中显示出良好的应用前景。

与太赫兹高速发展对应,太赫兹科学技术领域研究团队的数量也与日俱增。他们正在努力开发新的技术和装备来探索太赫兹频段,或者利用太赫兹仪器进行各种有意义的研究。然而,目前关于这个领域专著还很少,且现有书籍仅覆盖了某些方面。从我们日常教学工作来看,我们觉得急需一部全面介绍太赫兹研究所涉及的各个方面的书籍,其应该能够包含研究方法、仪器设备以及物理理论。这本书的核心来源于我们 3 位作者中 M. F. Kimmitt 早期编写的一部广泛流传的教材(《远红外技术》,1970),而现在这本扩充后的专著素材很新、很全面,旨在覆盖所有研究领域。本书关注的核心是现有的在  $0.3 \sim 10\text{THz}$  ( $30\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$ ) 广泛使用的各种技术和仪器,同时也包含了大量最新的发展,相信它们将会在未来成为标准技术。此外,在很多地方还给出了一些非常优秀的综述性参考文献,用于对特殊方向做出详细解读。书中的图表都是基于已发表的数据,读者可以参考原文献获得更深入和详细的信息。本书主要面向研究生及初涉该领域的学者,但是我们也希望广大活跃的太赫兹研究者可以将本书作为太赫兹技术研究中的介绍和参考,在其中找到对自己有用的信息。

本书得益于在我们自己的太赫兹研究经历中与许多同行的长期合作和讨论,由于人数太多不便全部列出,我们在这里一并表示感谢。同时对我们现在工作的以及我们曾工作过的支持我们进行太赫兹研究的单位表示感谢。我们特别感谢我们的夫人以及孩子,感谢他们在写作期间持续的支持和无尽的耐心,特别感谢 Mhairi Kimmitt 认真校对全书。

德国 波鸿

德国 柏林

英国 布莱特灵西

Erik Bründermann

Heinz – Wilhelm Hübers

Maurice Kimmitt

# 目 录

|                     |    |
|---------------------|----|
| 第 1 章 绪论            | 1  |
| 1.1 太赫兹频谱范围         | 1  |
| 1.2 太赫兹研究的历史        | 5  |
| 1.2.1 20 世纪早期的研究    | 7  |
| 1.2.2 1920 年—1940 年 | 8  |
| 1.2.3 1940 年—1950 年 | 10 |
| 1.2.4 1950 年—1960 年 | 11 |
| 1.2.5 1960 年—1970 年 | 13 |
| 1.2.6 1970 年—1980 年 | 14 |
| 1.2.7 1980 年—1990 年 | 15 |
| 1.3 更加关注太赫兹的原因      | 17 |
| 第 2 章 太赫兹频段的光学理论    | 22 |
| 2.1 高斯波束基础          | 23 |
| 2.2 高斯波束的传输         | 27 |
| 2.3 高斯波束的耦合         | 32 |
| 2.4 材料对辐射的吸收和谐振效应   | 35 |
| 2.5 物质与太赫兹波的非线性相互作用 | 39 |
| 2.6 偏振光             | 40 |
| 2.7 斯托克斯参量          | 41 |
| 2.8 啁啾              | 42 |
| 第 3 章 太赫兹光学器件       | 46 |
| 3.1 引言              | 46 |

|        |                              |    |
|--------|------------------------------|----|
| 3.2    | 反射与吸收 .....                  | 47 |
| 3.3    | 用于透波窗口、滤波器和透镜的材料 .....       | 48 |
| 3.3.1  | 聚乙烯(PE) .....                | 48 |
| 3.3.2  | 聚丙烯(PP) .....                | 49 |
| 3.3.3  | 聚苯乙烯 .....                   | 49 |
| 3.3.4  | 聚四氟乙烯(PTFE, 特氟纶) .....       | 50 |
| 3.3.5  | 聚4-甲基-1-戊烯(PMT, TPX) .....   | 50 |
| 3.3.6  | Tsurupica(Picarin) .....     | 50 |
| 3.3.7  | 聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET, Mylar) ..... | 50 |
| 3.3.8  | 聚对二甲苯 .....                  | 50 |
| 3.3.9  | 荧光金 .....                    | 51 |
| 3.3.10 | Zitex .....                  | 51 |
| 3.3.11 | 晶态石英 .....                   | 51 |
| 3.3.12 | 蓝宝石(Sapphire) .....          | 52 |
| 3.3.13 | 硅(Si)、锗(Ge) .....            | 53 |
| 3.3.14 | 金刚石 .....                    | 53 |
| 3.3.15 | 碱卤化物 .....                   | 54 |
| 3.3.16 | KRS-5 .....                  | 55 |
| 3.3.17 | 材料选择 .....                   | 55 |
| 3.4    | 窗口 .....                     | 56 |
| 3.5    | 滤波器 .....                    | 57 |
| 3.5.1  | 黑色聚乙烯(PE)吸收滤波器 .....         | 58 |
| 3.5.2  | 碱卤化物滤波器(Yoshinaga 滤波器) ..... | 58 |
| 3.5.3  | 散射滤波器 .....                  | 59 |
| 3.5.4  | 剩余射线滤波器 .....                | 59 |
| 3.5.5  | 谐振栅网滤波器 .....                | 60 |
| 3.5.6  | 厚金属平板滤波器 .....               | 62 |
| 3.5.7  | 冷滤波器 .....                   | 63 |
| 3.6    | 抗反射膜层 .....                  | 64 |
| 3.7    | 透镜 .....                     | 65 |

|            |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------|
| 3.8        | 反射镜 .....             | 66        |
| 3.9        | 光管 .....              | 68        |
| 3.10       | 光汇聚器及 Winston 锥 ..... | 69        |
| 3.11       | 起偏器和偏振态变换器 .....      | 71        |
| 3.12       | 分束器 .....             | 74        |
| 3.13       | 衰减器 .....             | 75        |
| 3.14       | 吸收器和吸收材料 .....        | 76        |
| 3.15       | 透镜-天线系统 .....         | 77        |
| 3.16       | 波导和喇叭天线 .....         | 81        |
| 3.17       | 光子带隙材料和超材料 .....      | 82        |
| <b>第4章</b> | <b>太赫兹波源 .....</b>    | <b>91</b> |
| 4.1        | 引言 .....              | 91        |
| 4.2        | 热发射 .....             | 92        |
| 4.3        | 实际热辐射源 .....          | 94        |
| 4.3.1      | 碳晶灯 .....             | 94        |
| 4.3.2      | 等离子体辐射源 .....         | 94        |
| 4.4        | 气体激光器 .....           | 97        |
| 4.4.1      | 电激励气体激光器 .....        | 97        |
| 4.4.2      | 光激励气体激光器 .....        | 99        |
| 4.5        | 块状半导体激光器 .....        | 106       |
| 4.5.1      | 锗激光器 .....            | 107       |
| 4.5.2      | 光学激励硅载施主产生激射 .....    | 112       |
| 4.6        | 量子级联激光器 .....         | 114       |
| 4.6.1      | 运转原理 .....            | 114       |
| 4.6.2      | 性能 .....              | 117       |
| 4.7        | 光混频产生太赫兹辐射 .....      | 121       |
| 4.7.1      | 低温生长砷化镓 .....         | 122       |
| 4.7.2      | 肖特基二极管 .....          | 122       |
| 4.7.3      | 金属-绝缘体-金属二极管 .....    | 123       |
|            |                       | XI        |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 4.7.4      | 光电二极管                   | 124        |
| 4.8        | 谐波产生                    | 125        |
| 4.9        | 返波振荡器                   | 128        |
| 4.10       | Smith-Purcell(史密斯-帕塞尔)源 | 131        |
| 4.11       | 回旋管                     | 134        |
| 4.12       | 基于相对论电子的太赫兹源            | 136        |
| 4.12.1     | 电子储存环产生相干同步加速辐射         | 138        |
| 4.12.2     | 直线加速器产生相干同步加速辐射         | 141        |
| 4.12.3     | 自由电子激光器                 | 141        |
| 4.13       | 参量振荡器                   | 145        |
| <b>第5章</b> | <b>探测器</b>              | <b>150</b> |
| 5.1        | 简介                      | 150        |
| 5.1.1      | 探测器的制冷                  | 151        |
| 5.2        | 探测器理论                   | 153        |
| 5.2.1      | 探测器参数                   | 153        |
| 5.2.2      | 探测器参数间的关系               | 154        |
| 5.2.3      | 过量噪声来源                  | 158        |
| 5.3        | 热探测器                    | 159        |
| 5.3.1      | 高莱探测器                   | 162        |
| 5.3.2      | 热释探测器                   | 164        |
| 5.3.3      | 热电堆                     | 168        |
| 5.3.4      | 功率计                     | 169        |
| 5.3.5      | 半导体测辐射热计                | 172        |
| 5.3.6      | 超导测辐射热计                 | 175        |
| 5.3.7      | 室温下的微型测辐射热计             | 178        |
| 5.4        | 光电导探测器                  | 179        |
| 5.4.1      | 非本征锗探测器                 | 184        |
| 5.4.2      | 铋化铟探测器                  | 187        |
| 5.4.3      | GaAs 探测器                | 191        |

|       |                          |     |
|-------|--------------------------|-----|
| 5.4.4 | 阻止杂质带探测器                 | 192 |
| 5.5   | 外差检波法                    | 194 |
| 5.5.1 | 外差检测理论                   | 196 |
| 5.5.2 | 肖特基二极管混频器                | 201 |
| 5.5.3 | 超导体-绝缘体-超导体混频器           | 207 |
| 5.5.4 | 热电子测辐射热计混频器              | 211 |
| 第6章   | 频谱研究方法                   | 217 |
| 6.1   | 引言                       | 217 |
| 6.2   | 光栅频谱仪                    | 221 |
| 6.3   | 傅里叶变换频谱仪                 | 225 |
| 6.3.1 | 色散傅里叶变换频谱仪               | 230 |
| 6.4   | 偏振干涉仪(Martin-Puplett干涉仪) | 231 |
| 6.5   | 法布里珀罗(F-P)干涉仪            | 234 |
| 6.6   | 时域频谱仪                    | 236 |
| 6.6.1 | 太赫兹脉冲产生和探测的简化模型          | 242 |
| 6.6.2 | 应用                       | 246 |
| 6.7   | 相干波源频谱仪                  | 248 |
| 6.7.1 | 基于倍频源的频谱仪                | 249 |
| 6.7.2 | 使用返波振荡器的频谱仪              | 250 |
| 6.7.3 | 基于可调谐太赫兹边带产生的频谱学         | 253 |
| 6.7.4 | 基于差频产生的频谱学               | 255 |
| 6.8   | 外差频谱学                    | 257 |
| 6.8.1 | 系统方面                     | 258 |
| 6.8.2 | 后端频谱仪                    | 260 |
| 6.8.3 | 外差频谱仪示例                  | 262 |
| 第7章   | 太赫兹成像                    | 264 |
| 7.1   | 引言                       | 264 |
| 7.2   | 成像基础                     | 267 |

|            |                    |     |
|------------|--------------------|-----|
| 7.3        | 类相机成像 .....        | 270 |
| 7.3.1      | 对比度形成 .....        | 270 |
| 7.3.2      | 直接探测器成像 .....      | 273 |
| 7.3.3      | 外差成像 .....         | 276 |
| 7.3.4      | 三维外差成像 .....       | 277 |
| 7.4        | 短距成像 .....         | 279 |
| 7.4.1      | 连续波及长脉冲波源成像 .....  | 280 |
| 7.4.2      | 基于光混频器的成像 .....    | 280 |
| 7.4.3      | 量子级联激光器成像 .....    | 281 |
| 7.4.4      | 连续波源实时成像 .....     | 282 |
| 7.4.5      | 光谱成像 .....         | 282 |
| 7.4.6      | 量子级联激光器的三维成像 ..... | 284 |
| 7.4.7      | 时域光谱成像 .....       | 286 |
| 7.4.8      | 基于时域光谱仪的光谱成像 ..... | 286 |
| 7.4.9      | 基于时域光谱仪的三维成像 ..... | 288 |
| 7.4.10     | 时域光谱仪的实时成像 .....   | 290 |
| 7.5        | 近场显微 .....         | 290 |
| 7.5.1      | 基于光阑的近场扫描显微镜 ..... | 291 |
| 7.5.2      | 无光阑近场扫描光学显微镜 ..... | 294 |
| 缩略语 .....  |                    | 299 |
| 符号 .....   |                    | 303 |
| 参考文献 ..... |                    | 306 |

### 1.1 太赫兹频谱范围

本书所考察的太赫兹 (THz) 频谱范围是  $0.3 \sim 10\text{THz}$  (与频率对应的波长为  $1\text{mm} \sim 30\mu\text{m}$ ), 这是既最令人兴奋, 又最令人沮丧的一段电磁频谱。令人兴奋的是从这段频谱的研究中, 人们能够获得大量的知识财富, 然而令人沮丧的是时至今日, 太赫兹技术的发展仍落后于与其相比频率更低和更高的频段。但是在介绍这些实际困难前, 先来看一个更小的问题——这段频谱最好的名称应该是什么?

多年来, 术语“远红外” (Far-infrared, FIR) 被用来描述从约  $20\mu\text{m}$  以上至最短的毫米波范围内的所有波长; 后来该波段又被称为亚毫米波 (submillimeter), 但是如果严格遵循这个定义, 把亚毫米波界定在  $1\text{mm}$  以内也不能完全令人满意。1978 年, Blaney 提议了一个准确, 但是冗长的名称“短毫米和亚毫米波波长范围”, 缩写成 SMSMR (short millimeter and sub-millimeter-wavelength range)<sup>[1]</sup>, 但是这个名称并未被广泛采用。“太赫兹”这个名字是相对较新引入的, 最初是与太赫兹时域频谱 (THz time-domain spectroscopy, THz TDS) 紧密相关, 但是现在已经被广泛接受, 用来方便地描述这段频谱, 不论从红外还是从微波方向逼近到这个频段都适用。虽然现在对于谁第一个提出术语“太赫兹”还存在疑问, 但是在 1974 年 J. W. Fleming 的文章<sup>[2]</sup>发表后, 这个名称似乎才被逐渐地接受和使用。

太赫兹频段研究中遇到的主要困难是在其大多数频率范围内地球大气的吸收率非常高, 这主要源于水汽的自旋振动能级, 高吸收导致太赫兹天文学和高层大气学只能通过高海拔天文台和浮空气球在极少数的可用“窗口”开展研究。图 1.1 给出了  $0.2 \sim 2.2\text{THz}$  的大气传输特性, 数据由位于智利北部安第斯山脉

上塞热察布鲁山的接收实验望远镜 (Receiver Lab Telescope, RLT) 测得, 该地海拔高度 5525m, 可以获得一些最好的太赫兹传输特性数据, 图示频谱为 2005 年 1 月通过分辨率为 3GHz 的傅里叶变换频谱仪 (Fourier-transform spectrometer, FTS) 获得的<sup>[3]</sup>。除安第斯山脉外, 唯有南极平原测得数据可与之比拟。在海拔 4100m 的南极平原最高点——冰穹 A, 中国极地研究中心和中国科学院牵头的堪称“英雄”式的实验观测到了特殊的太赫兹透射特性<sup>[4]</sup>。南极的大气非常稳定, 因此如果在冰穹 A 建立一个永久的观测点, 长期观测良好的太赫兹传输特性就会成为可能。然而逻辑上, 这个位置还是存在严重问题, 特别是在南极冬季时不可避免存在极低的水汽含量。

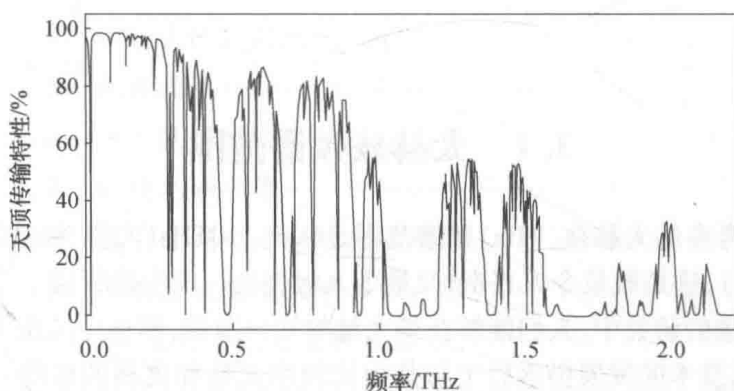


图 1.1 2005 年 1 月 24 日于塞热察布鲁山处测得大气顶部的传输特性(引自参考文献[5])

在高于图 1.1 所示的频段, 吸收增大得非常快, 这也是多年来大多数太赫兹研究仅限于实验室的原因。但是, 高空飞行实验室, 如柯伊伯机载观测站 (Kuiper Airborne Observatory, KAO), 和数量不断增多的轨道平台, 如欧洲空间局 (ESA) 的赫歇尔 (Herschel) 空间观测站, 使得天文学和空间科学发生了革命性巨变。然而, 地基太赫兹天文学无一例外, 如同从图 1.2 看到的那样, 高吸收率严重限制了实验室的实验。

大气吸收强度是相当可观的, 在大约 8THz 时吸收强度达到最大值——超过  $2 \times 10^5 \text{ dB/km}$ <sup>[6]</sup>, 为了形象理解这些数字的含义, 可以想象这些频率的光波只有不到 1% 能够通过源与探测器之间 10cm 的路径。一方面, 因为在光路上存在一段不长的开放区域, 以致本书的一位作者曾尝试确定第一台高功率太赫兹激光器<sup>[7]</sup>发出的 9.1THz 的强谱线而没有成功; 另一方面, 著名宇宙论者 Fred Hoyle 爵士在其科幻小说《十月一号太迟了》也提到, 发射的火箭携带的有效载荷测量太阳的输出——“波长要比最短的无线电波短大约数百倍”, 该波长的辐射不能到达地球表面。在太阳半径 10 倍外的表观范围内能够观测到源

发射出的大功率相干信号,科学家建议在银河系内建立中继站以产生无发散的波束。

为了在整个太赫兹频段实现可以忽略的吸收衰减,光路上的气压要低于100Pa,这样的气压很容易通过回转真空泵获得。然而,如果有调谐辐射源可用,则在整个太赫兹频段内寻找某个频点实现大气压条件下中短路径长度的实验是有可能的。图1.2为典型实验室条件下的传输特性。

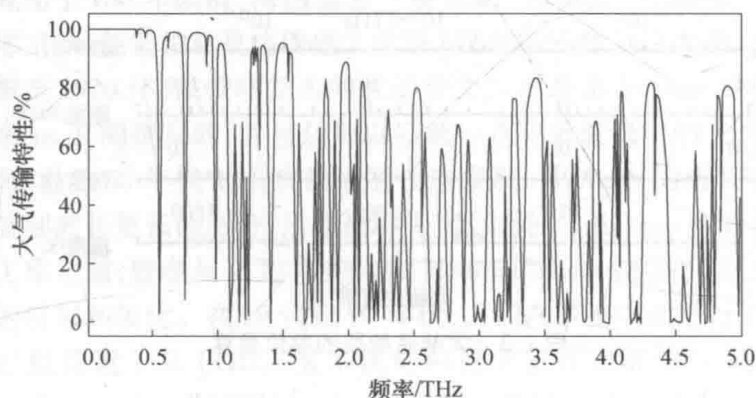


图1.2 气压1013hPa,相对湿度40%条件下1m路径的大气传输特性

如果从应用角度出发,在这个频谱内使用多种计量单位是比较方便的。例如,用电子伏特度量光子的能量对半导体研究有重要作用,还有以J. H. G. Kayser命名的单位——“凯塞(Kayser)”——厘米的倒数( $\text{cm}^{-1}$ ), Kayser在20世纪初期编译了庞大的化学谱目录,可以方便地描述频谱。图1.3描述了各个计量单位间的关系。在介绍始于19世纪90年代的太赫兹历史之前,先说明一下图1.3中的物理量大小和电子能量含义的关联性。在波长方面,30~300 $\mu\text{m}$ 的频段是一个桥梁,连接着至今仍然方便应用的开放光路技术和采用波导传输的最短波长。在30 $\mu\text{m}$ (10THz),系统设计与可见光及近红外频段几乎一样,均采用透镜、棱镜、反射镜等,通过衍射光栅或者迈克尔逊干涉仪获得频谱。但是在这个波长上,光学元件必须增大到避免衍射衰减和干涉效应的尺寸。在微波频段,波导的单模传输可以有效避免这些问题。尽管加工的波导使用频率上限大约为2THz,但是要把尺寸做到能传播短毫米或亚毫米波还是存在许多重要困难的。典型矩形波导工作波长为 $\lambda$ 时,单模传输的尺寸大约为 $\lambda/2$ 宽 $\lambda/4$ 高,这样异常小的横截面加工得足够均匀是很困难的,但这仍不是主要问题,电磁波沿波导传播时会在波导壁产生电流,当波导壁反射电磁波时需要表面电流,而随着电磁波频率的升高,只有接近波导表面的电子才有时间响应电磁波的变化,在电阻性的表面内,这里指的是壁电流流过的有效电阻即会随着频率的升高而增大,