

# THz 技术在大气探测领域的应用研究进展

李书磊, 刘磊, 高太长, 黄威

(解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101)

**摘要:** THz 波的频段范围(0.1~10 THz)及其特性使 THz 波具有较高的空间分辨率及大气参数灵敏性, 同时 THz 辐射在地球辐射平衡中的重要作用决定了其在大气探测领域有重大的研究价值和广阔的应用前景。介绍了 THz 技术在大气探测领域的应用现状, 重点分析介绍了 THz 波遥感探测大气水汽廓线、温度廓线、卷云的微物理参数及大气微量气体成分的原理、特性及存在的问题, 最后对 THz 波大气探测技术的研究提出几点建议和展望, 并指出了当前 THz 波大气探测技术的研究前沿和研究热点。

**关键词:** THz 辐射; 大气探测; 温湿廓线; 卷云; 微量气体成分

**中图分类号:** P412 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1125001

## Research progress of THz technology application in the atmospheric sounding field

Li Shulei, Liu Lei, Gao Taichang, Huang Wei

(Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

**Abstract:** The range of THz frequency (0.1–10 THz) and its characteristics enable THz wave to have a higher spatial resolution and atmospheric parameter sensitivity. Moreover, the important role of THz radiation playing in the earth's radiation balance determines that THz radiation has great research value and broad application prospects in the atmospheric sounding field. The research progress of THz technology application in the atmospheric sounding field was presented, as well as the analysis of the principles, characteristics and existing problems of THz wave remote sensing for the atmospheric humidity profiles, atmospheric temperature profiles, cirrus clouds microphysical parameters and atmospheric trace gas composition. In the last section, several suggestions were put forward for THz wave atmospheric sounding technology research and the frontier and hotspot issues of the research were pointed out.

**Key words:** THz radiation; atmospheric sounding; temperature and humidity profiles; cirrus clouds; trace gas

收稿日期: 2016-03-15; 修订日期: 2016-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(41205125)

作者简介: 李书磊(1991-), 男, 硕士, 主要从事大气探测、云检测方面的研究。Email: snlee@163.com

## 0 引言

THz 波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波,该波段位于微波和红外波段之间。在微波领域,该波段也被称为亚毫米波,而在红外领域,该波段也被称为远红外波。长期以来,由于有效产生源和灵敏检测技术的限制,对 THz 波的电磁辐射性质了解非常有限,因此 THz 波段的应用技术发展缓慢。然而,THz 波的特殊性质使其在通信、材料检测、雷达、大气探测、医药科学、国土安全等基础研究领域有重大的研究价值和广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

THz 辐射在地球辐射平衡中担任着重要角色,如地气系统约 50% 的长波辐射频率低于 19.5 THz,温室效应基本发生在 THz/远红外频段,自由对流层的晴空冷却发生在 THz/远红外频段等。此外,对流层上部的水汽辐射反馈也发生在 THz/远红外频段<sup>[2]</sup>。THz 辐射所独有的这些特性,预示着它在大气探测领域拥有巨大的应用潜力。

文中主要介绍了 THz 技术在大气探测领域的主要应用、研究现状、主要原理及目前存在的主要问题,并对 THz 波大气探测技术的研究提出了几点建议和展望。

## 1 THz 技术在大气探测领域的研究现状

近年来,随着 THz 关键技术的发展,人们对该波段电磁辐射性质的认识逐渐深入,并意识到 THz 技术在大气探测领域的巨大应用潜力。然而,由于 THz 辐射通过地球大气层时存在严重衰减,对探测器性能的发挥影响很大,从而影响了 THz 技术在大气探测领域的发展。目前,THz 技术主要应用于星载、球载探测仪器被动遥感和临边探测领域,地基探测仪器有待进一步发展。

目前,国际上有多家研究机构开展 THz 大气探测技术研究,如美国的 NASA、欧洲的 ESA、日本的 NICT、德国的 DLR 等,已发射多个 THz 波段的探测器对地球的水汽、臭氧等大气组成成分进行探测。最早将 THz 技术应用于地球大气遥感测量可以追溯到前苏联于 1974 年发射的 Cosmos 699 卫星,搭载了探测频率约 300 GHz 制冷辐射热计,第一次从远红外意义上实现了 THz 波对地对太空的观测<sup>[3]</sup>。美

国 NASA 于 1991 年发射的大气上层观测卫星 UARS 上搭载临边探测器(MLS),探测器辐射计的频段中心频率为 63 GHz、183 GHz 与 205 GHz,第一次测定了同温层中的臭氧、水汽等分子含量随大气压力变化的廓线<sup>[4]</sup>。2001 年瑞典、加拿大、法国、芬兰合作发射的极轨卫星 Odin 上搭载了 4 波段的 THz 辐射计,可同时用于天文及高层大气研究,探测目标包括温度、O<sub>3</sub>、ClO、N<sub>2</sub>O、HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O、CO、NO 以及 H<sub>2</sub>O 与 O<sub>3</sub> 的同位素等,是第一个将 THz 波应用于临边探测的星载探测器<sup>[5]</sup>。2004 年 NASA 发射的极轨卫星 AURA 上搭载 5 个探测频率分别为 118 GHz、180 GHz、240 GHz、640 GHz、2.52 THz 的辐射计,可探测 2.5~62.5 km 高度的 H<sub>2</sub>O、O<sub>3</sub>、HCl、N<sub>2</sub>O、CO、SO<sub>2</sub> 等大气成分、温湿廓线、冰云以及检测气候变化等<sup>[6]</sup>。2009 年日本 JAXA 与 NICT 合作发射的临边探测器 SMILES 有 3 个探测波段,探测频率为 625~650 GHz,可用于探测 O<sub>3</sub> 及其同位素、HCl、ClO、HOCl、BrO 等大气组成成分、冰云、对流层上部与平流层上部的水分等,同时可反演气温、气压廓线<sup>[7]</sup>。德国宇航中心遥感技术研究所研制的球载太赫兹临边探测器(TELIS)自 2008 年起已进行了 4 次放球实验,探测器采用三通道临边探测方式:499~503 GHz、450~660 GHz 和 1790~1870 GHz,用于探测大气温湿廓线及微量气体成分等<sup>[8]</sup>。

## 2 THz 波大气探测技术的原理、特性及存在的问题

THz 波具有瞬态性、宽带性、相干性、低能性、透视性、方向性好、能穿透云层、可以全天候工作等特点,THz 波的这些特性使 THz 技术在大气探测方面拥有巨大的应用价值。如 THz 波可以探测尺度较小的粒子,可以监测沙尘天气;THz 波由于兼顾了微波的穿透能力与红外的敏感性,可用于探测卷云的微物理特性;THz 波对因人类活动而排放的含氯、氮、硫和氟等废气有特殊的敏感性,可用于臭氧层的大气环保监控。

### 2.1 水汽廓线的遥感

目前业务上主要通过微波、红外辐射遥感大气水汽廓线,然而微波虽具有一定的穿透云层、小雨、冰雪等被测物体以及不受太阳辐射影响的能力,但微波被动反演的精度较差。高光谱红外仪器分辨率

高,能够获得精细的大气状态信息,但其难以穿透云层,仅能得到云顶以上高度的有效信息,中低层精度大大降低<sup>[9]</sup>。而 THz 波兼具两者的优势,是遥感观测水汽的最佳频段。

大气对太赫兹辐射的吸收衰减主要来源于两部分——线谱吸收和连续吸收。其中,水汽分子的转动跃迁是线谱吸收主要部分,是对 THz 辐射吸收衰减的主要原因。连续吸收的机理目前尚存在争议,主流观点认为连续吸收主要是由水-水分子(热碰撞导致的自展宽)及水-其他分子(如氮气、氧气等气体分子)之间的碰撞造成的,而太赫兹频段独有的纯转动能级之间的跃迁也可能会给连续吸收带来不同于其他频段的新的特点。连续吸收的机理和影响有待进一步研究<sup>[10]</sup>。

根据 HITRAN 数据库的光谱线数据,在此波段内水汽约有 16 000 条吸收线<sup>[11]</sup>,水汽对 THz 辐射有明显的吸收,对 THz 辐射衰减严重,因此 THz 波段的大气辐射被水汽辐射所表征。利用 THz 辐射接收器接收来自天空的辐射能量,经过定标校准,处理成观测目标在某频率上的亮温,通过一定的反演方法可进一步得到水汽、大气湿度廓线等参量。

目前探测水汽的 THz 仪器主要为临边探测仪器,其中 Odin/SMR 使用频段 541~558 GHz 的 A1 通道和频段 486.1~503.9 GHz 的 A2 通道遥感水汽廓线<sup>[5]</sup>;EOS AURA/MLS 使用 190 GHz 的 R2 辐射计探测水汽 183 GHz 吸收谱线进而反演水汽廓线<sup>[6]</sup>;MASTER 使用频段 199~207 GHz 的通道 A 探测水汽;SOPRANO 的 497.50~504.75 GHz 的 A 波段探测水汽<sup>[12]</sup>。临边探测方式水平探测范围有限,不能获得全球水汽分布,被动探测与临边探测方式相比,不仅可以获得全球水汽分布,而且探测平台资源、技术要求相对较低,随着 THz 波探测仪器技术的发展,通过被动探测方式遥感水汽廓线将受到各国研究人员的广泛关注<sup>[13]</sup>。美国和欧洲都明确提出发展地球同步轨道 THz 波大气探测技术的计划,而国内也在静止气象卫星风云四号的规划中提出亚毫米波探测的构想,这必将带动国内相关载荷设计技术和应用技术的发展<sup>[14]</sup>。

## 2.2 温度廓线的反演

目前,卫星遥感、临边探测大气温度廓线主要通过 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的特征吸收线光谱反演,其中 CO<sub>2</sub> 的吸收

线主要通过红外波段振动-转动带探测,O<sub>2</sub> 吸收线主要通过位于微波波段的转动吸收带,此外还可以探测 O<sub>2</sub> 的塞曼效应反演大气温度廓线。

在 THz 波段,CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 有多条特征吸收线,目前已广泛应用于温度廓线反演的氧气 118 GHz 吸收带即位于 THz 波段。通过探测 THz 波谱区域内 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 的特征吸收线,可以反演大气温度廓线。相较于其他波段,THz 波反演温度廓线可以提供更高的空间分辨率或减小天线孔径尺寸。

针对反演通道的选择问题,郭杨等<sup>[14]</sup>基于权重函数所对应的峰值层方法选取 0.1~1 THz 波段范围内的 118 GHz 波段附近 3 个通道与 425 GHz 波段附近 8 个通道共 11 个通道作为未来 THz 遥感仪器遥感大气温度的候选通道。Blackwell 等<sup>[15]</sup>比较了用 118.75 GHz 和 424.76 GHz 通道反演大气温度的效果。结果表明,高空间分辨率的 425 GHz 通道反演效果不如 118.75 GHz 的通道,而在有云时,与红外通道结合 425 GHz 反演效果较好,且更利于检测云。SOPRANO 临边探测器采用 730.8~732.25 GHz 的 D 通道与 952~955 GHz 的 F 通道反演温度廓线<sup>[12]</sup>。而关于 1~10 THz 波段范围内的反演通道选取国内外相关研究较少,有待进一步研究验证。

## 2.3 卷云微物理参数的遥感

卷云对地球大气系统的辐射收支起到调节和控制作用,其辐射强迫效应是影响全球气候和辐射平衡最不确定的因子之一,然而定量描述卷云对气候变化的影响非常困难。因此卷云微物理参数的探测是目前研究全球气候变化时的一个亟需解决的热点问题<sup>[16]</sup>。卷云所处的位置、复杂的产生机制以及较小的光学厚度等都给其观测带来了很大的困难,目前探测卷云参数主要通过微波、激光和红外方法。卷云中冰晶粒子的半径一般在 10~2 000 μm,而微波仅对大粒子(约 1 000 μm)敏感,激光只对小粒子(约 50 μm 以下)敏感,且激光能量衰减严重,难以穿透光学厚度大于 3 的卷云。红外波段只适用于半透明的卷云,且只对有效粒子半径小于 80 μm 的卷云粒子敏感。

THz 波长和典型的卷云粒子尺寸处于同一量级,因此在测量卷云粒子微物理参数方面 THz 波占有优势。日本国家信息和通信技术研究所(NICT)研究了 0~5 THz 频段卷云的光学特性和云效应,使用辐射传输模型分析了 THz 光谱对于冰水路径和粒

子尺寸的敏感性。研究表明:THz 波对尺寸大于 $100\ \mu\text{m}$ 的粒子很敏感,并且 THz 观测可以潜在地测量小到 $10\ \mu\text{m}$ 的粒子<sup>[13]</sup>。由于 THz 辐射通过大气层时存在严重衰减,因此,目前主要通过星载临边探测方式对卷云进行遥感。第一个用于全球卷云遥感的星载探测器 AURA/MLS 的 2.52 THz R5 通道以临边探测的方式探测 15 km 以上卷云的云底高、粒子尺寸、冰水含量等微物理特性<sup>[6]</sup>;SMILES 通过频段为 624.32~625.52 GHz 通道 A 以临边探测的方式遥感卷云<sup>[7]</sup>。然而,临边探测难以获得卷云的水平分布特性进而无法获得卷云参数的三维数据,因此不能动态研究卷云的形成过程,难以满足模式要求的水平分布范围和水平分辨率的需求。因此,需要发展多平台被动遥感探测方式<sup>[13]</sup>。

被动遥感卷云参数主要是利用卷云的辐射效应。卷云粒子尺寸、冰水路径对 THz 辐射的影响可由大气层顶的辐射光谱特征表示。晴空大气层顶的 THz 辐射主要来自对流层中、低层水汽辐射。卷云存在时,由于其对 THz 辐射的吸收很小且存在散射作用,故此时亮温值低于晴空大气层顶的亮温值,可以认为卷云的存在降低了大气向上的 THz 辐射。利用辐射接收器被动接收来自大气发射的辐射能量,与晴空辐射值差值处理成目标卷云的亮温,通过一定的反演方法可进一步得到卷云粒子尺寸、冰水路径等参量。K.Franklin Evans 等<sup>[17]</sup>针对 THz 波被动遥感卷云微物理参数的方法进行了理论研究,结果表明 THz 遥感卷云方法对半径 10~1000  $\mu\text{m}$  范围的冰晶粒子敏感,并基于研究结果提出部分可用通道,但该模型并未对冰晶粒子的非球形形状造成的误差进行评估。

美国 NASA 于 1998 年在 T-39 飞机上搭载了基于傅里叶变换的远红外机载光谱仪,用于被动遥感卷云的微物理参数,并将反演结果与热红外高光谱干涉仪进行对比,证明了 THz 波在反演卷云粒子尺寸和冰水路径方面比红外辐射具有优势。这是第一次 THz 波被动遥感卷云的实验<sup>[18]</sup>。THz 被动遥感技术在探测卷云微物理参数方面展现了巨大优势,随着 THz 技术水平的提高进一步发展,机载、星载 THz 被动遥感技术将成为探测卷云微物理参数的有效方法。

## 2.4 大气微量气体成分的观测

大气微量气体成分是指浓度在 1~20 ppmv 范围内的气体组成成分,其观测在地球科学研究和环境

监测中具有非常重要的意义。微量气体中自由基的观测通常是所有微量气体观测中最困难的,如原子氧、羟基、ClO、HCl、HF 等。其中工业氟氯碳化物对臭氧层具有严重破坏作用,主要氯化物的全球分布信息及廓线信息是各国关注的重点<sup>[19]</sup>。

在 THz 波段,大气中的许多微量气体分子具有特征吸收线,利用它们固有的辐射和吸收光谱特征可以识别出这些组分,确定其中大部分气体包括羟基自由基在内的多种大气成分的浓度,并反演出微量气体垂直廓线,实现大气环境监测。此外,THz 波对因人类活动而排放的含氯、氮、硫和氟废气有特殊的敏感性,可用于臭氧层的大气环保监控。近十年来基于飞秒激光发展起来的 THz 时域光谱技术不仅能直接测定分子的转动光谱,还可以测定混合气体的化学组成和各组分的浓度,能够对自由基和反应活性分子进行有效的探测和分析。THz 时域光谱技术还可以用于研究多种其它气体和蒸汽的转动光谱及分子碰撞引起的谱线展宽,如卤甲烷、氨气等。Jacobsen 等<sup>[20]</sup>利用 THz 时域光谱技术与数字信号处理技术对  $\text{NH}_3$  和  $\text{H}_2\text{O}$  混合气体进行了有效化学识别。

目前,临边探测器 Odin、AURA、MASTER、SOPRANO 等<sup>[12]</sup>均有用于探测微量气体的通道,根据与地基遥感 MIRA-2、RAMAS 等获得的数据对比可以得出,THz 遥感方式能探测其他波段很难探测的卤族元素且具有更高的精度,如 MLS 的 R4 辐射计 SMILES 的 A 与 B 频段与 SOPRANO 的 B1 频段都能探测 HCL,其单扫描线的反演误差可小于 10%。ClO 在 500~1000 GHz 具有较强的密集发射谱线,能被临边探测器所探测,反演误差可小于 10%。BrO 的谱线很弱,很难探测,目前能提供 BrO 全球平流层分布的探测器很少。EOS/MLS、SMILES、MASTER、SOPRANO 可探测 BrO 位于 624.7 GHz、650 GHz、498 GHz 的弱谱线<sup>[3-8]</sup>。

## 3 结论与展望

THz 波独特的性质使其在大气遥感中具有广泛的应用前景。THz 波对研究地球大气环境特性有着不可替代的作用,可为遥感大气环境参数提供新的途径。随着 THz 相关设备和技术的不断进步,THz 光谱分辨率不断提高,可探测距离不断加大,必将带

动 THz 波大气探测技术在理论和实验及应用研究方面取得突破性进展。目前以及将来一段时间可能的研究热点主要有:

(1) THz 辐射传输模式的改进及验证。THz 辐射大气传输特性的研究是 THz 波大气探测技术应用的基础, 目前可用于 THz 波段的辐射传输模式如 MPM (Millimeterwave Propagation Model)、ATM (Atmospheric Transmission at Microwaves)、Moliere (V5) (Microwave Observation Line Estimation and Retrieval, version 5)、AMATERASU (Model for Atmospheric Terahertz Radiation Analysis and Simulation)、ARTS (the Atmospheric Radiative Transfer Simulator) 等, 然而各个模式的精确性和适用性有较大差异, 因此亟需建立通用性强、精确度高的 THz 辐射传输模型, 并进行 THz 辐射大气传输实验, 对辐射传输模式进行验证并加以改进。

(2) THz 波反演大气参数的通道选择与试验。THz 波段带宽较宽, 可利用频谱范围广, 频谱资源丰富, 充分考虑波段范围内的各气体组分的特征吸收线是充分利用此频段的前提。可开展针对不同测量需求的反演通道及反演理论准确性研究, 并对 THz 波遥感大气参数和红外、微波等方法的结果进行对比试验, 对探测通道进行优化, 作为未来遥感仪器的候选通道。

(3) 用于大气探测的 THz 辐射源和 THz 波灵敏检测器的研发。改进 THz 仪器设备工艺水平, 为 THz 波大气探测仪器的构成和改进提供基础。THz 有效辐射源和灵敏检测器技术一直是制约 THz 技术应用的主要因素, 立足于需求牵引改进 THz 仪器水平, 将为 THz 技术的应用提供更大可能, 使得 THz 技术在大气探测领域的应用范围更加广泛。

参考文献:

[1] Yao Jianquan, Wang Jingli, Zhong Kai, et al. Study and outlook of THz radiation atmospheric propagation [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(10): 1582-1588. (in Chinese)  
姚建铨, 汪静丽, 钟凯, 等. THz 辐射大气传输研究和展望 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10): 1582-1588.

[2] Paul B Hays, Hilary E Snell. Atmospheric remote sensing in the terahertz region [C]//First International Symposium on

Space Terahertz Technology, 1990: 482-491.

[3] Peter H Siegel. THz instruments for space [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(11): 2957-2965.

[4] Waters J W, Read J W, Froidevaux L, et al. The UARS and EOS microwave limb sounder (MLS) experiments [J]. *Atmospheric Sci*, 1999, 56(2): 194-218.

[5] Baron P, Richard P, de la Noe J, et al. Studies for the Odin sub-millimeter radiometer: Retrieval methodology [J]. *Canadian Journal of Physics*, 2002, 10(80): 341-356.

[6] Wu D L, Pickett H M, Livesey N J. Aura MLS THz observations of global cirrus near the tropopause [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(10): L15803.

[7] Inatani J, Ozeki H, Satoh R, et al. Submillimeter limb-emission sounder JEM/SMILES aboard the space station [C]// *Microvave Remote Sensing of the Atimosphere and Environment II*, 2000, 4152: 243-254.

[8] de Lange A, Birk M, de Lange G, et al. HCl and ClO in activated Arctic air: first retrieved vertical profiles from TELIS submillimeter limb spectra [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 10(5): 487-500.

[9] Liu Yang, Cai Bo, Ban Xianxiu, et al. Research progress of retrieving atmosphere humidity profiles from AIRS data [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(8): 890-896. (in Chinese)  
刘阳, 蔡波, 班显秀, 等. AIRS 红外高光谱资料反演大气水汽廓线研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(8): 890-896.

[10] Li Hanyu, Dong Zhiwei, Zhou Haijing, et al. Calculation of atmospheric attenuation of THz electromagnetic wave through line by line integral [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(6): 1445-1449. (in Chinese)  
李瀚宇, 董志伟, 周海京, 等. 太赫兹电磁波大气吸收衰减逐线积分计算 [J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(6): 1445-1449.

[11] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, 110(9-10): 533-572.

[12] Li Xiaoying, Chen Liangfu, Su Lin, et al. Overview of sub-millimeter limb sounding [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(6): 1335-1344.  
李小英, 陈良富, 苏林, 等. 亚毫米波临边探测发展现状 [J]. *遥感学报*, 2013, 17(6): 1335-1344.

[13] Jana Mendrok, Philippe Baron, Yasuko Kasaia. Studying the potential of terahertz radiation for deriving ice cloud microphysical information [C]//Remote sensing of clouds and

- the atmosphere XIII, 2008.
- [14] Guo Yang, Lu Naimeng, Gu Songyan. Channel selection of millimeter/submillimeter instrument for detecting temperature and humidity[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(6):716–723. (in Chinese)  
郭杨, 卢乃锰, 谷松岩. 毫米/亚毫米波遥感仪器大气温度和水汽探测通道选择分析[J]. 应用气象学报, 2010, 21(6): 716–723.
- [15] Blackwell W J, Staelin D H. Comparative performance analysis of passive microwave systems for tropospheric sounding of temperature and water vapor profiles [C]// Proceedings of SPIE, 1996, 2812: 472–478.
- [16] Shi Guangyu. Atmospheric Radiology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 302–318. (in Chinese)  
石广玉. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 302–318.
- [17] Franklin Evans K, Steven J Waiter, Andrew J Heymsfield, et al. Modeling of submillimeter passive remote sensing of cirrus clouds[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 37: 184–205.
- [18] Evans K Franklin, Evans Aaron H, Nolt Ira G, et al. The prospect for remote sensing for cirrus clouds with a submillimeter-wave spectrometer [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1999.
- [19] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Peking University Press, 2013: 6–28. (in Chinese)  
盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2013: 6–28.
- [20] Jacobsen R H, Mittleman D M, Nuss M C. Gas sensing using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(24): 2011–2013.