

文章编号: 1672-8785(2013)06-0020-05

基于太赫兹时域光谱技术的水蒸气传输特性研究

周 逊^{1,2} 邓 琥³ 罗振飞^{1,2} 王 度^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900 ;

2. 中国工程物理研究院太赫兹科学技术研究中心, 四川 成都 610000 ;

3. 西南科技大学信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 为了评估太赫兹波在空间通信、雷达、遥感等方面的潜在应用, 需要研究太赫兹波在大气中的传输特性。由于 0.1~2 THz 的太赫兹波在大气中传输的主要衰减来自水蒸气, 采用太赫兹时域光谱技术 (THz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS), 在 2 m 长的太赫兹传输行程中对不同湿度的空气进行了透射光谱测量, 获得了水蒸气在 0.1~2 THz 频率范围内的吸收谱、传输率和弱衰减窗口。

关键词: 太赫兹时域光谱技术; 水蒸气; 吸收谱; 传输率; 窗口

中图分类号: O434.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.06.04

Study of Transmission Characteristics of Water Vapor Based on Terahertz Time-domain Spectroscopy

ZHOU Xun^{1,2}, DENG Hu³, LOU Zhen-fei^{1,2}, WANG Du^{1,2}

(1. Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China ;

2. Terahertz Research Center, CAEP, Chengdu 610000, China ; 3. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: To assess the potential applications of terahertz waves in space communication, radar and remote sensing, the transmission characteristics of terahertz waves in atmosphere should be studied. As the transmission attenuation of terahertz wave in the range from 0.1 to 2 THz are caused mainly by water vapor, the THz Time-Domain Spectroscopy (THz-TDS) is used to measure the transmission spectra of the air with different humidity in a 2 m long THz transmission path. The absorption spectra, transmission rate and weak attenuation widows of water vapor in the frequency range from 0.1 to 2 THz are obtained.

Key words: THz-TDS; water vapor; absorption spectrum; transmission rate; window

0 引言

太赫兹波是频率为 0.1~10 THz 的电磁辐射。太赫兹技术已经被证明在更加深入的物理研究以及实际应用中有着广阔的应用前景。由

于和通信、物质探测、成像、光谱、雷达、遥感、国土安全与反恐、高保密性数据通信传输、大气与环境监测、实时生物信息提取及医学诊断、工业检测等领域密切相关, 太赫兹技术已成为一

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11176032); 四川省教育厅科技项目 (12ZB337)

作者简介: 周逊 (1968-), 男, 四川成都人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为光电和信息技术。

E-mail: zcm.zky@sohu.com.

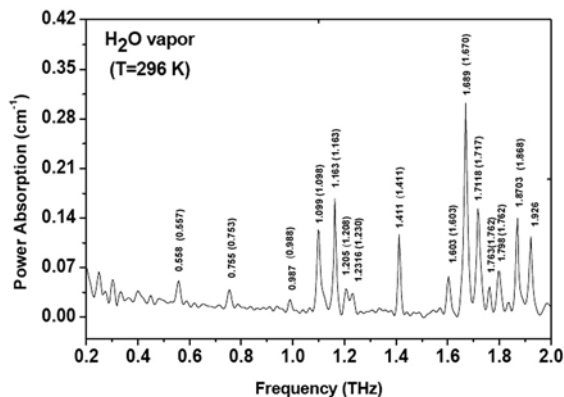


图 1 太赫兹波在水蒸气中的吸收系数

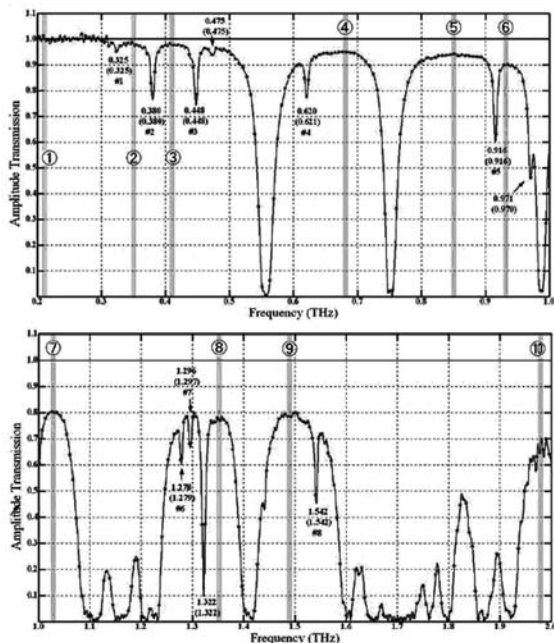


图 2 太赫兹波在水蒸气中的传输特性

个非常有吸引力的研究领域^[1-4]。太赫兹辐射具有独特的性质和应用,但还存在一些物理上的限制,比如大气衰减^[5]。太赫兹波在水蒸气中的吸收系数如图 1 所示^[6],在 0.557 THz、0.753 THz、0.988 THz、1.098 THz、1.163 THz、1.208 THz、1.230 THz、1.411 THz、1.603 THz、1.670 THz、1.717 THz、1.762 THz、1.798 THz、1.868 THz、1.926 THz 处存在吸收峰。太赫兹波在水蒸气中的传输特性如图 2 所示^[7],在 0.21 THz、0.35 THz、0.41 THz、0.68 THz、0.85 THz、0.93 THz、1.03 THz、1.35 THz、1.49 THz、1.98 THz 附近存在着相对透明的窗口。由图 1、图 2 可以看出,太赫兹波在水蒸气传输中存在

众多吸收峰和透明窗口。因此,本文将采用太赫兹时域光谱技术^[8,9](THz-TDS)分析太赫兹辐射的水蒸气传输特性。

1 实验装置

太赫兹时域光谱系统光路如图 3 所示。飞秒激光器产生的飞秒脉冲经分束镜后分为两束,其中透射光作为探测光,反射光作为泵浦光;泵浦光被聚焦到 THz 发射器中的光导天线 PCA 上后,在天线半导体材料的表面瞬间激发载流子,并通过偏置电压使载流子加速,产生瞬变的光电流,从而产生 THz 辐射;THz 辐射在大气中传输 2 m 后被聚焦到 THz 探测器中的 ZnTe 晶体上;探测光经延迟线后被聚焦到 THz 探测器中的 ZnTe 晶体同一位置上,携带 THz 信息的探测光经四分之一波片、透镜和渥拉斯顿棱镜后被聚焦到双眼光电探头上,光电探头输出信号到锁相放大器;锁相放大器输出一个一定频率的 TTL 电平,通过放大器放大后被作为偏置电压施加到光导天线,在锁相放大器采集信号时被作为参考信号进行锁相积分计算,然后由计算机采集显示信号。整个太赫兹时域光谱系统被密封罩密封,并用湿度传感器(HS-2000D)测量密封罩内的湿度。密封罩上留有 A 孔和 B 孔, A 孔中输入干燥空气, B 孔中输入潮湿空气。干燥空气由空压机(1B-580)和干燥机(ZW-15)串联产生,潮湿空气由加湿器产生。

系统测量过程如下: (1) 系统上电运行,预热半小时,确保进入系统的飞秒脉冲稳定,平均

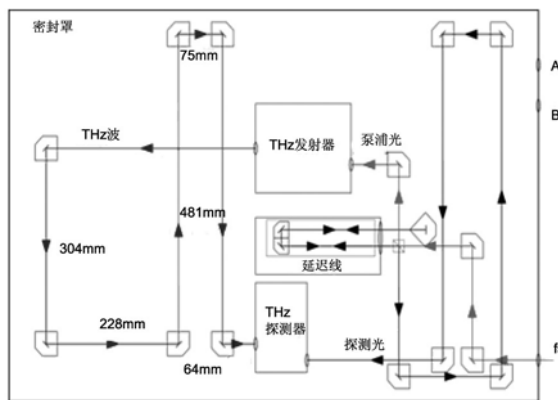


图 3 太赫兹时域光谱系统的光路图

功率为 100 mW。(2) 向密封罩内填充干燥空气, 当湿度传感器显示湿度为 0% 时测量时域光谱, 测量结果作为参考信号。(3) 向密封罩内填充潮湿空气, 当湿度传感器稳定在某一湿度时测量该湿度下的时域光谱, 测量结果作为样品信号。(4) 调整干燥空气和潮湿空气的填充时间, 重复多次测量, 将不同湿度下的时域光谱作为样品信号。

2 结果与讨论

2.1 测量条件

飞秒激光器的中心波长为 800 nm; 进入系统的飞秒脉冲的平均功率为 100 mW; 环境温度为 19.4 °C; 光导天线的偏置电压为 100 V; 偏置电压频率为 9.803 kHz; 锁相放大器的时间常数为 30 ms。

2.2 参考信号测量结果

如图 4 所示, 参考信号的扫描时间为 120

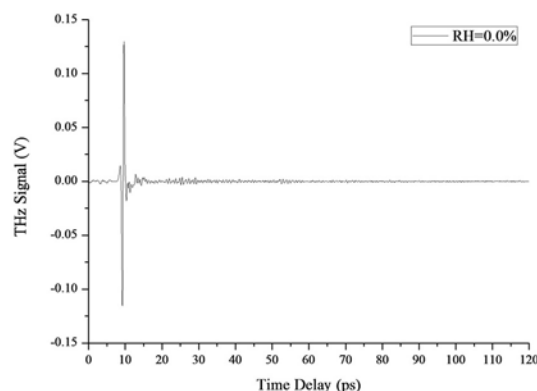


图 4 参考信号的时域光谱图

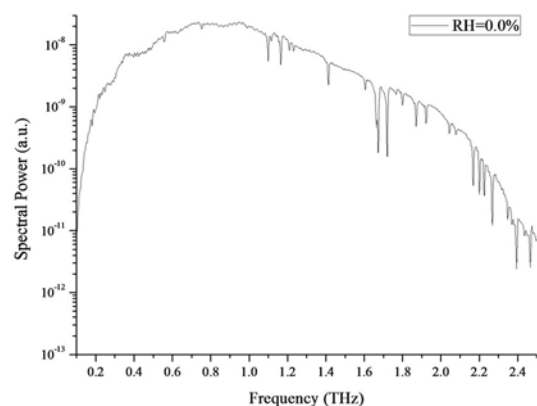


图 5 参考信号的频域光谱图

ps, 对应 8.3 GHz 的频率分辨率; 参考信号的测量数据点为 2929 个, 对应的延迟时间步进为 0.041 ps; 单次扫描时间为 112 s。参考信号经快速傅里叶变换后成为频域参考信号, 如图 5 所示。

2.3 不同湿度水蒸气的测量结果

采用太赫兹时域光谱系统分别对湿度为 19.8%、44.4%、64.4%、79.1% 的空气进行测量, 时域光谱如图 6 所示, 频域光谱如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知, 随着空气湿度的升高, 太赫兹时域光谱的峰值逐渐降低, 透射得到的太赫兹能量逐渐衰减。

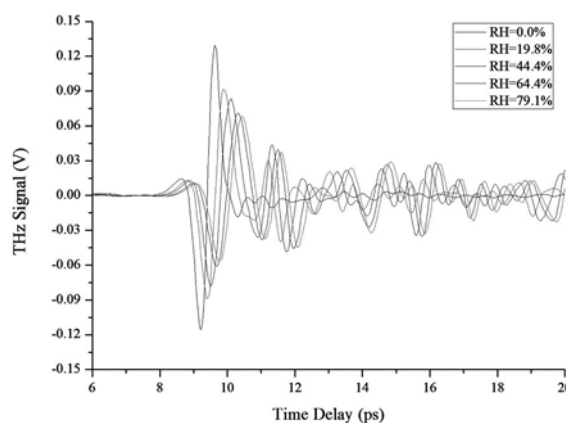


图 6 空气湿度分别为 19.8%、44.4%、64.4%、79.1% 时的时域光谱图

采用 Dorney 和 Duvillaret 等人提出的用于提取材料 THz 光学参数的物理模型处理测得的时域光谱数据^[10], 得到了空气湿度分别为 19.8%、44.4%、64.4%、79.1% 的太赫兹吸收谱, 如图 8 所示。由图 8 可知, 在 0.382 THz、0.449 THz、0.558 THz、0.622 THz、0.754 THz、0.918 THz、0.974 THz、0.990 THz、1.099 THz、1.116 THz、1.164 THz、1.209 THz、1.232 THz、1.282 THz、1.300 THz、1.323 THz、1.412 THz、1.544 THz、1.604 THz、1.668 THz、1.716 THz、1.765 THz、1.799 THz、1.870 THz、1.921 THz 处存在吸收峰。随着空气湿度的升高, 与图 2 相比, 出现了新的吸收频率, 如 0.382 THz、0.449 THz、0.622 THz、0.918 THz、0.974 THz、1.116 THz、1.282 THz、1.300 THz、1.323 THz、1.544 THz。

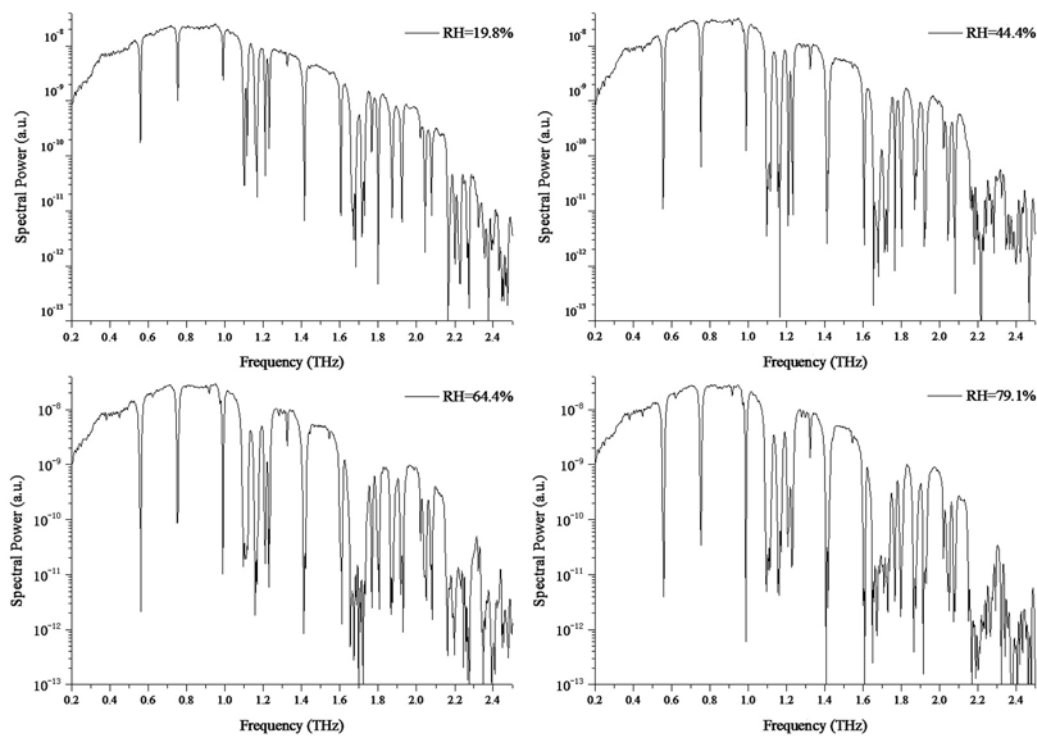


图 7 空气湿度分别为 19.8%、44.4%、64.4%、79.1% 时的频域光谱图

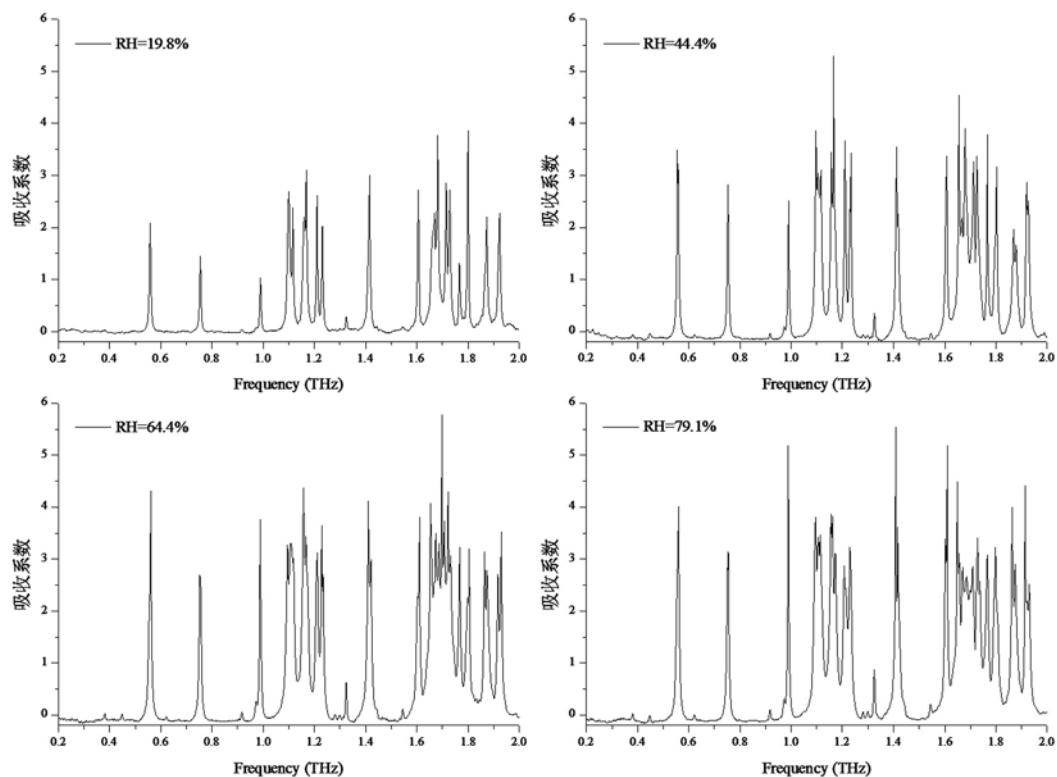


图 8 空气湿度分别为 19.8%、44.4%、64.4%、79.1% 时的吸收系数

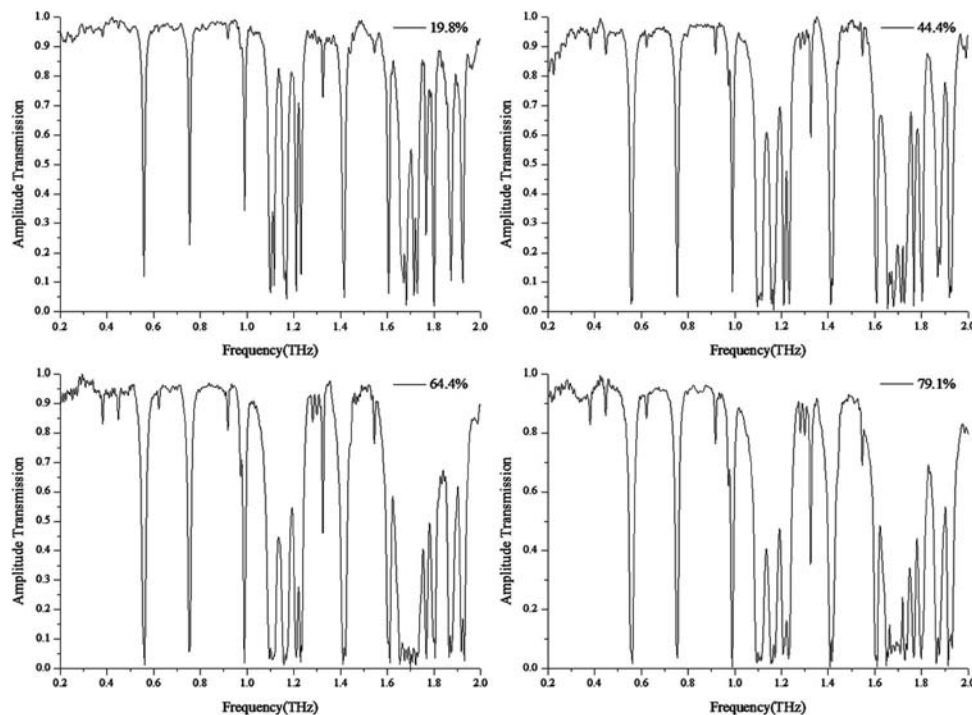


图 9 空气湿度分别为 19.8%、44.4%、64.4%、79.1% 时的传输率

图 9 为空气湿度分别是 19.8%、44.4%、64.4%、79.1% 的太赫兹振幅传输率 (样品光谱振幅与参考光谱振幅之比)。由图 9 可知, 太赫兹在水蒸气传输中, 在 0.21 THz、0.35 THz、0.41 THz、0.68 THz、0.85 THz、0.93 THz、1.03 THz、1.35 THz、1.49 THz、1.98 THz 附近存在着相对透明的窗口, 且随着空气湿度的升高, 各窗口的传输率降低。同时, 各吸收峰值处的吸收带宽增加, 进而压缩了传输窗口。

3 结论

通过对水蒸气传输特性的测量, 获得了水蒸气在 0.1~2 THz 频率范围内的吸收谱、传输率和弱衰减窗口。在 0.1~2 THz 之间得到了 25 个吸收峰, 在 0.2~1 THz 之间得到了 7 个窗口, 测量结果与国外的研究成果^[6,7]一致。结果表明, 随着空气湿度的升高, 太赫兹时域光谱的峰值逐渐降低, 各窗口的传输率降低, 传输窗口被压缩。

参考文献

- [1] Bradley F, 张希成. 太赫兹科学与技术研究回顾[J]. 物理, 2003, 32(5): 286-293.
- [2] 张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [3] 胡永生, 陈钱. 太赫兹技术及其应用研究的进展[J]. 红外, 2006, 27(1): 11-15.
- [4] 戚祖敏. 太赫兹波在军事领域中的应用研究[J]. 红外, 2006, 29(12): 16-21.
- [5] 许景周, 张希成. 太赫兹科学和技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [6] Xin X, Altan H, Saint A, Matten D, Alfano R. Terahertz Absorption Spectrum of Para and Ortho Water Vapors at Different Humidities at Room Temperature[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(9): 094905-1-4.
- [7] Yang Y H, Shutler A, Grischkowsky D. Measurement of the Transmission of the Atmosphere from 0.2 to 2 THz [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8830-8838.
- [8] Auston D H, Cheung K P, Valdmanis J A, Kleinman D A. Cherenkov Radiation from Femtosecond Optical Pulses in Electro-Optic Media[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 53(16): 1555-1558.
- [9] Fattinger C, Grischkowsky D. Point Source TeraHz Optics [J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 53(16): 1480-1482.
- [10] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Material Parameter Estimation with Terahertz Time-domain Spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2001, 18(7): 1562-1571.