

不同行程下水蒸汽太赫兹传输特性

邓 琥^{1,2}, 尚丽平^{1,2}, 张泽林¹, 刘泉澄¹

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010;
2. 特殊环境机器人技术四川省重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 太赫兹波具有独特的性质和应用, 却存在大气衰减等物理上的限制。由于太赫兹波在大气传输中主要衰减来自水蒸汽, 文中采用太赫兹时域光谱技术, 通过构建不同行程的太赫兹时域光谱系统(0.5 m、1 m、2 m、3 m), 在 0.1~2.0 THz 频率范围内, 分别对不同湿度的空气进行太赫兹时域光谱测量, 获得了 25 个水吸收峰和 10 个太赫兹窗口。结果表明: 随着传输行程或湿度的增加, 吸收谱带被展宽、太赫兹窗口被压缩, 为超宽谱太赫兹波的潜在应用提供依据。

关键词: 太赫兹; 水蒸汽; 传输特性

中图分类号: O434.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)03-0979-06

Transmission characteristics of water vapor based on different transmission distance

Deng Hu^{1,2}, Shang Liping^{1,2}, Zhang Zelin¹, Liu Quancheng¹

(1. College of Information Engineer, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
2. Robot Technology Used for Special Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621010, China)

Abstract: Terahertz waves have unique properties and applications, but there are physical limitations such as atmospheric attenuation and so on. Since the main attenuation of terahertz transmission in the atmosphere comes from water vapor, terahertz time-domain spectroscopy was used to conduct terahertz time-domain spectroscopy measurements in different air humidity at the frequency range of 0.1–2.0 THz by building terahertz time-domain spectroscopy system with different stroke (0.5 m, 1 m, 2 m, 3 m), respectively. 25 absorption of water and 10 windows of THz waves were obtained. The results show that: with the increase of transmission itinerary or humidity, absorption band is broadened and terahertz window is compressed. The study provides the basis for the potential applications of ultra-broadband terahertz waves.

Key words: terahertz; water vapor; transmission characteristics

收稿日期: 2014-07-17; 修订日期: 2014-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(11176032); 四川省教育厅青年基金(12ZB337);
极端条件物质特性联合实验室基金(12zxjk05, 13zxjk02)

作者简介: 邓琥(1980-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光谱传感及太赫兹技术研究。Email: denghu@swust.edu.cn

0 引言

太赫兹波(Terahertz, THz)及其技术已经被证明在通信^[1]、材料物性表征^[2]、雷达^[3]、安全^[4]、大气与环境监测^[5]、医学诊断^[6]等领域有着广泛的应用前景,但还存在一些物理上的限制,比如大气衰减^[7-8]。由国内外研究可知^[9-10],THz 在 0.1~2.0 THz 频率范围内存在 0.557、0.753、0.988、1.098、1.163、1.208、1.230、1.411、1.603、1.670、1.717、1.762、1.798、1.868、1.926 THz 的水吸收峰;同时,在 0.21、0.35、0.41、0.68、0.85、0.93、1.03、1.35、1.49、1.98 THz 附近存在着相对透明的窗口。但是,目前仍缺乏在不同的传输行程上对水蒸汽 THz 吸收情况的相关研究,因此,文中采用太赫兹时域光谱技术(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)^[11-12],分析 THz 在不同行程、不同湿度时的水蒸汽传输特性,为了评估 THz 的潜在应用提供依据。

1 实验装置

1.1 不同行程的太赫兹时域光谱系统

太赫兹时域光谱系统光路原理如下:飞秒激光器(MaiTai HP)所产生的飞秒脉冲经分束镜后分为两束,透射光作为探测光、反射光作为泵浦光;泵浦光聚焦到 THz 发射器中产生 THz 辐射,THz 辐射在不同行程的大气中传输后聚焦到 THz 探测器,然后由控制器采样并在计算机软件中显示时域光谱信号。不同行程的太赫兹时域光谱系统光路如图 1 所示。(HS-2000D)测量密封罩内湿度;同时密封罩上留有

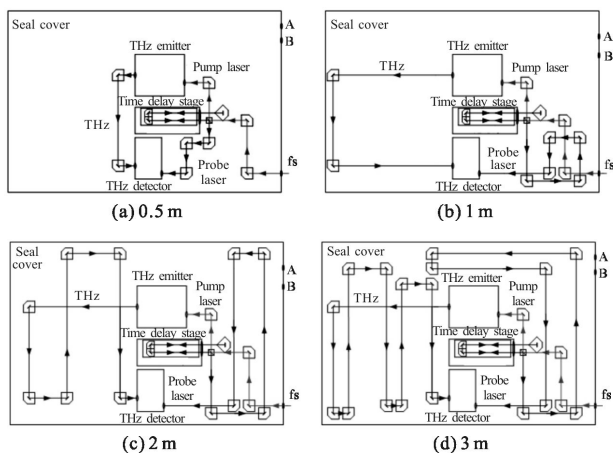


图 1 不同行程的太赫兹时域光谱系统光路图

Fig.1 Optical path scheme of THz-TDS system based on different transmission distance

太赫兹时域光谱系统被密封罩密封,并用湿度传感器 A 孔和 B 孔,A 孔中输入干燥空气,B 孔中输入潮湿空气。干燥空气是由空压机(IB-580)和干燥机(ZW-15)串联产生,潮湿空气是由加湿器产生。

1.2 数据处理原理

数据处理采用 T.D.Dorney 和 L.D.Duvillaret 等人^[13]提出的太赫兹时域光谱技术提取被测对象光学常数的模型。

复折射率 $\tilde{n}=n+i\kappa$ 可描述样品的宏观光学性质。其中, n 为实折射率,描述样品的色散特性。 κ 为消光系数,描述样品的吸收特性。消光系数与吸收系数之间的关系为:

$$\alpha=2\omega\kappa/c \quad (1)$$

当利用太赫兹时域光谱技术测量物质的光谱时,首先获得通过自由空间或者通过参考样品的 THz 时域波形,即参考波形。然后测量 THz 脉冲经过(透过或者反射)样品之后的时域波形,即信号波形。分别对参考波形和信号波形进行傅里叶变换得到参考频谱 $R(\omega)e^{-j\phi_r(\omega)}$ 和信号频谱 $S(\omega)e^{-j\phi_s(\omega)}$ 。在真空近似即真空中样品前后介质折射率均为 1 和弱吸收近似即 $n \cdot \kappa$ 的情况下,通过信号频谱与参考频谱的比较计算:

$$\frac{S(\omega)}{R(\omega)}=T(\omega) \cdot e^{-j\phi(\omega)} \quad (2)$$

由公式(2)获得 $T(\omega)$ 和 $\phi(\omega)$ 后,再根据公式(3)、(4)和(5)计算折射率、吸收系数和消光系数。

$$n(\omega)=1+\phi(\omega) \cdot \frac{c}{\omega d} \quad (3)$$

$$\alpha(\omega)=\frac{2}{d} \ln \left[\frac{4n(\omega)}{T(\omega) \cdot (1+n(\omega))^2} \right] \quad (4)$$

$$\kappa(\omega)=\ln \left[\frac{4n(\omega)}{T(\omega) \cdot (1+n(\omega))^2} \right] \cdot \frac{c}{\omega d} \quad (5)$$

式中: n 为样品的折射率; α 为样品的吸收系数; d 为样品的厚度; c 是真空中光速; ω 为圆频率。

2 结果与讨论

2.1 测量条件

飞秒激光器中心波长:800 nm;进入系统的飞秒脉冲平均功率:100 mW;环境温度:19.4 °C;光导天线偏置电压:100 V;偏置电压频率:9.803 kHz;锁相放大器时间常数:30 ms;湿度范围:0%~80%。

2.2 测量步骤

不同行程的太赫兹时域光谱系统测量步骤如下:

(1) 系统上电预热半小时后,确保进入系统的飞秒脉冲稳定,且入射平均功率为 100 mW。

(2) 通过密封罩上的 A 孔向密封罩内填充干燥空气,当湿度传感器显示湿度为 0%时测得该行程下的 THz 时域光谱作为参考信号。

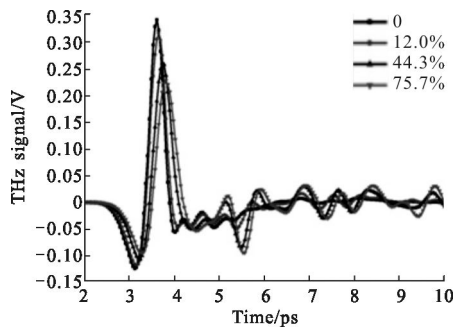
(3) 通过密封罩上的 B 孔向密封罩内填充潮湿空气,当湿度传感器稳定在某一湿度时测得该行程下的 THz 时域光谱作为样品信号。

(4) 调整干燥空气和潮湿空气的填充时间,重复多次测量,可获得测得该行程下不同湿度的 THz 时域光谱作为样品信号。

(5) 按图 1 调整太赫兹时域光谱系统行程,重复(1)~(4)步,获得不同行程、不同湿度的 THz 时域光谱信号。

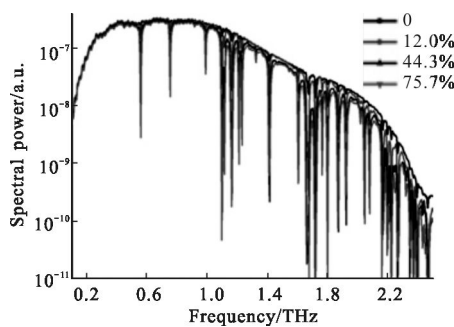
2.3 太赫兹波在 0.5 m 行程和不同湿度下的传输特性

采用太赫兹时域光谱系统如图 1(a)所示,按照测量步骤,分别对 0.5m 行程下湿度为 0%、12.0%、44.3%、75.7% 空气进行测量,获得其传输特性如图 2 所



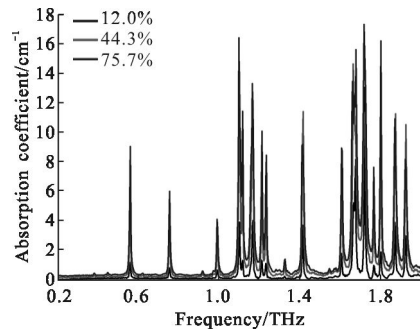
(a) 时域光谱

(a) Time-domain spectroscopy



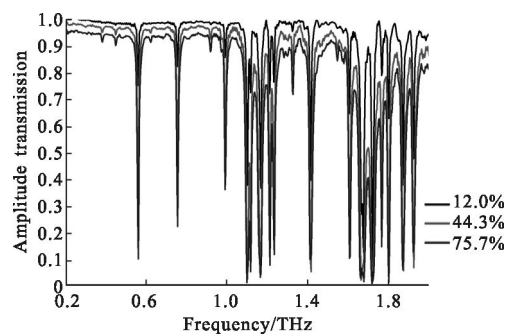
(b) 频域光谱

(b) Frequency domain spectroscopy



(c) 吸收系数

(c) Absorption coefficient



(d) 传输率

(d) Transfer rate

图 2 太赫兹波在 0.5 m 行程和不同湿度下的传输特性

Fig.2 Transmission characteristics of terahertz waves based on 0.5 m transmission distance and different humidity

示,不同湿度下太赫兹窗口传输率如表 1 所示。分析结果可知:在空气湿度 12.0%、44.3%、75.7%时各 THz 窗口的平均传输率分别为 98.4%、96.0%、92.3%;在 0.5m 传输行程下 THz 损耗较少;随着湿度的增加,吸收谱带逐渐展宽,THz 传输率逐渐降低。

表 1 0.5 m 行程下不同湿度时太赫兹窗口传输率 (单位: %)

Tab.1 Transfer rate of terahertz waves based on 0.5 m transmission distance and different humidity(Unit: %)

| Humidity /% | Window/THz | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.21 | 0.35 | 0.41 | 0.68 | 0.85 | 0.93 | 1.03 | 1.35 | 1.49 | 1.98 |
| 12 | 100 | 99.3 | 99.0 | 98.6 | 99.3 | 99.0 | 98.3 | 99.5 | 98.8 | 92.1 |
| 44.3 | 98.2 | 97.3 | 97.3 | 96.2 | 97.4 | 96.8 | 95.8 | 97.3 | 93.7 | 89.7 |
| 75.7 | 94.6 | 94.7 | 94.3 | 92.9 | 94.4 | 94.2 | 92.8 | 92.6 | 90.3 | 82.2 |

2.4 太赫兹波在 1 m 行程和不同湿度下的传输特性

采用太赫兹时域光谱系统如图 1(b)所示,按照测量步骤,分别对 1 m 行程下湿度为 0%、12.1%、42.3%、75.9%空气进行测量,获得其传输特性如图 3 所示,不同湿度下太赫兹窗口传输率如表 2 所示。分析结果可知:在空气湿度为 12.1%、42.3%、75.9%时各 THz 窗口的平均传输率分别为:97.7%、95.1%、87.5%;与 0.5 m 传输行程相比,各窗口 THz 传输率降低。

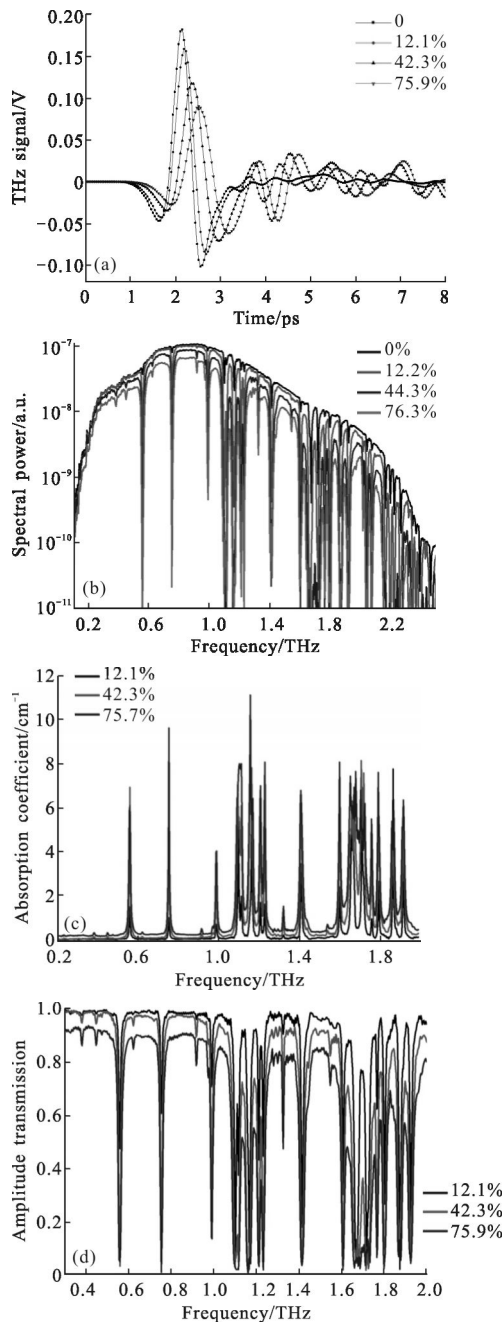


图 3 太赫兹波在 1 m 行程和不同湿度下的传输特性

Fig.3 Transmission characteristics of terahertz waves based on 1 m transmission distance and different humidity

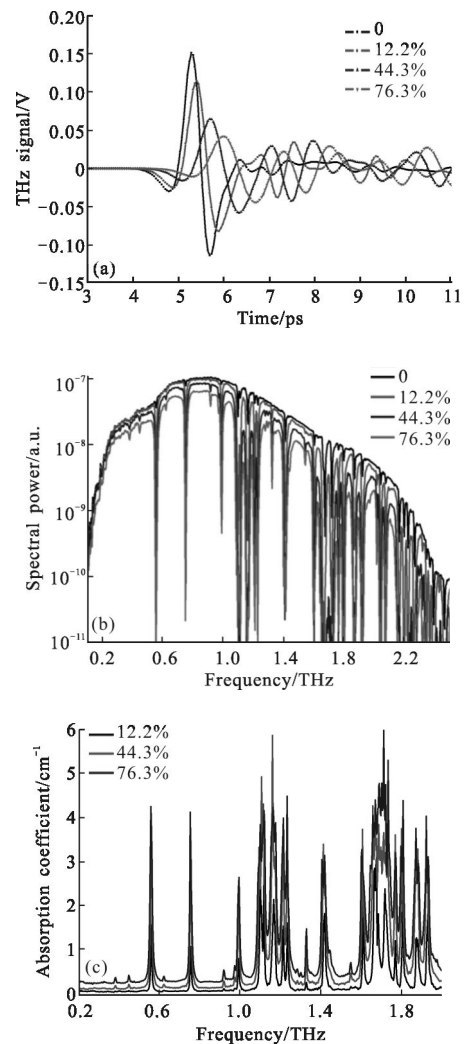
表 2 1 m 行程下不同湿度时太赫兹窗口传输率 (单位: %)

Tab.2 Transfer rate of terahertz waves based on 1 m transmission distance and different humidity (Unit: %)

| Hu- mid- ity /% | Window/THz | | | | | | | | | |
|--------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.21 | 0.35 | 0.41 | 0.68 | 0.85 | 0.93 | 1.03 | 1.35 | 1.49 | 1.98 |
| 12.1 | 99.2 | 98.9 | 99.0 | 98.7 | 97.7 | 97.8 | 97.6 | 98.0 | 95.8 | 94.6 |
| 42.3 | 99.5 | 98.9 | 98.7 | 96.8 | 97.3 | 95.8 | 93.1 | 91.8 | 89.9 | 89.4 |
| 75.9 | 91.6 | 92.9 | 93.4 | 89.5 | 90.2 | 88.5 | 85.6 | 81.8 | 83.5 | 77.8 |

2.5 太赫兹波在 2 m 行程和不同湿度下的传输特性

采用太赫兹时域光谱系统如图 1(c)所示,按照测量步骤,分别对 2 m 行程下湿度为 0%、12.2%、44.3%、76.3%空气进行测量,获得其传输特性如图 4



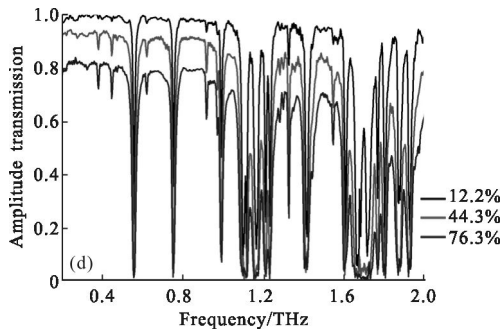


图4 太赫兹波在 2 m 行程和不同湿度下的传输特性

Fig.4 Transmission characteristics of terahertz waves based on 2 m transmission distance and different humidity

所示、不同湿度下太赫兹窗口传输率如表 3 所示。分析结果可知：在空气湿度为 12.2%、44.3%、76.3% 时各 THz 窗口的平均传输率分别为：96.5%、87.4%、73.5%；与 0.5 m 和 1 m 传输行程相比，各窗口 THz 传输率逐渐降低。

表 3 2 m 行程下不同湿度时太赫兹窗口传输率 (单位：%)

Tab.3 Transfer rate of terahertz waves based on 2 m transmission distance and different humidity (Unit: %)

| Humidity /% | Window/THz | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.21 | 0.35 | 0.41 | 0.68 | 0.85 | 0.93 | 1.03 | 1.35 | 1.49 | 1.98 |
| 12.2 | 96.9 | 99.0 | 98.7 | 98.1 | 98.1 | 96.7 | 96.1 | 95.9 | 94.0 | 91.9 |
| 44.3 | 92.5 | 92.8 | 93.1 | 90.9 | 90.9 | 88.0 | 84.9 | 79.9 | 83.2 | 77.3 |
| 76.3 | 78.6 | 81.7 | 81.6 | 78.3 | 78.9 | 73.6 | 70.2 | 65.4 | 70.2 | 56.6 |

2.6 太赫兹波在 3 m 行程和不同湿度下的传输特性

采用太赫兹时域光谱系统如图 1(d)所示，按照测量步骤，分别对 3 m 行程下湿度为 0%、8.2%、42.3%、76.2% 空气进行测量，获得其传输特性如图 5

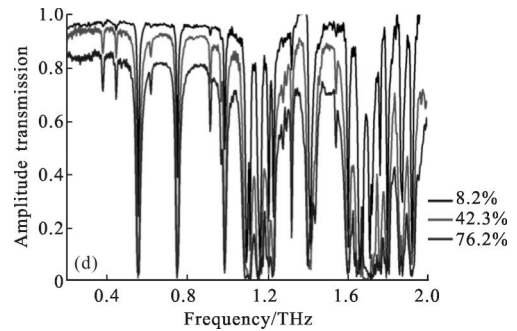
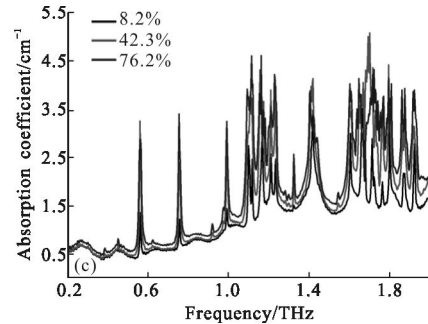
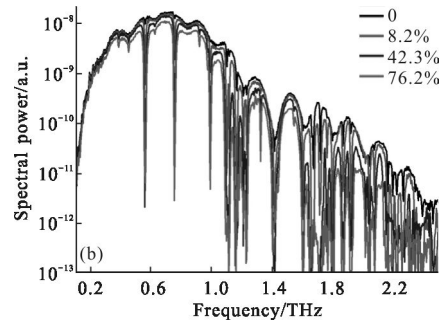
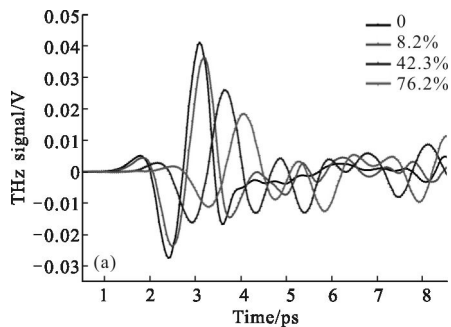


图5 太赫兹波在 3 m 行程和不同湿度下的传输特性

Fig.5 Transmission characteristics of terahertz waves based on 3 m transmission distance and different humidity

所示，不同湿度下太赫兹窗口传输率如表 4 所示。分析结果可知：在空气湿度为 8.2% 时各 THz 窗口的平均传输率为 95.7%；与 0.5 m、1 m 和 2 m 传输行程相比，各窗口 THz 传输率逐渐降低。

表 4 3 m 行程下不同湿度时太赫兹窗口传输率 (单位：%)

Tab.4 Transfer rate of terahertz waves based on 3 m transmission distance and different humidity (Unit: %)

| Humidity /% | Window/THz | | | | | | | | | |
|-------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.21 | 0.35 | 0.41 | 0.68 | 0.85 | 0.93 | 1.03 | 1.35 | 1.49 | 1.98 |
| 8.2 | 94.7 | 97.2 | 97.5 | 96.1 | 96.1 | 94.7 | 91.9 | 97.9 | 94.0 | 96.4 |
| 42.3 | 91.0 | 94.7 | 94.8 | 92.5 | 91.7 | 86.7 | 84.7 | 88.6 | 87.2 | 70.5 |
| 76.2 | 84.2 | 85.9 | 85.4 | 81.1 | 81.0 | 75.0 | 67.2 | 72.3 | 70.5 | 53.3 |

3 结 论

通过对水蒸汽传输特性的测量,获得了水蒸汽在 0.1~2 THz 频率范围内的吸收谱、传输率和弱衰减窗口。得到了从 0.1~2 THz 之间的 25 个吸收峰(0.382、0.449、0.558、0.622、0.754、0.918、0.974、0.990、1.099、1.116、1.164、1.209、1.232、1.282、1.300、1.323、1.412、1.544、1.604、1.668、1.716、1.765、1.799、1.870、1.921 THz),从 0.2~2 THz 之间的 10 个窗口。随着空气湿度的升高,太赫兹时域光谱峰值逐渐降低,各窗口的传输率降低,传输窗口被压缩。随着水蒸汽太赫兹传输行程的增加,各窗口的传输率逐渐降低,传输窗口被压缩。

参考文献:

- [1] Piesiewicz R, Jacob M, Koch M, et al. Performance analysis of future multigigabit wireless communication systems at THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor environments [J]. *IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 14(2): 421-430.
- [2] Kaindl R A, Carnahan M A, Hagele D, et al. Ultrafast terahertz probes of transient conducting and insulating phases in an electron-hole gas[J]. *Nature*, 2003, 423: 734-738.
- [3] Froberg N, Mack M, Hu B B, et al. 500 GHz electrically steerable photoconducting antenna array [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 58(5): 446-448.
- [4] Melinger J S, Yang Y, Mandehgar M, et al. THz detection of small molecule vapors in the atmospheric transmission windows[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6788-6807.
- [5] Corti T, Luo B P, Fu Q, et al. The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, (6): 2539-2547.
- [6] Pickwell E, Wallace V P. Biomedical applications of terahertz technology[J]. *J Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(17): 301-310.
- [7] Pardo J R, Cernicharo J, Serabyn E. Atmospheric transmission at microwaves (ATM): an improved model for millimeter /submillimeter applications [J]. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2001, 49(12): 1683-1694.
- [8] Wang Rongrong, Wu Zhensen, Zhang Yanyan, et al. Transmission characteristics of terahertz signal in fog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2662-2667. (in Chinese)
王蓉蓉, 吴振森, 张艳艳, 等. 太赫兹波段信号在雾中的传输特性研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2662-2667.
- [9] Xin X, Altan H, Saint A, et al. Terahertz absorption spectrum of para and ortho water vapors at different humidities at room temperature[J]. *J Applied Physics*, 2006, 100(9): 094905-1-4.
- [10] 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.
- [11] Auston D H, Cheung K P, Valdmanis J A, et al. Cherenkov radiation from femtosecond optical pulses in electro-optic media[J]. *Physical Review Letters*, 1984, 53(16): 1555.
- [12] Fattinger C, Grischkowsky D. Point source terahertz optics[J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 53(16): 1480-1482.
- [13] 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 - Optics Image Science and Vision*, 2001, 18(7): 1562-1571.