

## 碳类烟幕材料对太赫兹波的衰减特性

王启超,汪家春,赵大鹏,陈宗胜,董海龙,时家明

(脉冲功率激光技术国家重点实验室,安徽 合肥 230037)

**摘要:**为获得太赫兹波对碳类烟幕的穿透特性,采用压片法分别将不同比例混合的石墨粉和 KBr、碳黑粉和 KBr 进行压片,利用太赫兹时域光谱仪在 0.2~1.1 THz 频率范围内测试压片样品的太赫兹透射光谱,进而获得样品在该频率范围内的吸收系数。研究发现:随着频率的增大,样品的吸收系数均逐渐增大,且在同一频率处,其均随碳类粉末掺杂比例的增加而增大;与石墨相比,相同掺杂比例的碳黑样品具有更大的吸收系数。结果表明,太赫兹波具有较强的穿透石墨烟幕的能力,但其对碳黑烟幕的穿透能力较弱,利用碳黑有望进行太赫兹波段烟幕的研制。

**关键词:** 太赫兹波; 石墨; 碳黑; 吸收系数

中图分类号: O436.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0525001

## Extinction characteristic of terahertz wave by carbon smoke materials

Wang Qichao, Wang Jiachun, Zhao Dapeng, Chen Zongsheng, Dong Hailong, Shi Jiaming

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In order to acquire extinction characteristics of smokes for terahertz (THz) wave, graphite and carbon black powders were mixed respectively into KBr powder with some certain proportions, and the admixtures were pressed into tablets to measure the THz transmission spectrums using THz time-domain spectroscopy (THz-TDS) from 0.2 to 1.1 THz. At the same time, the THz signal was acquired from the pure KBr powder tablet, which was prepared with same method under same condition. Then, absorption coefficients of graphite and carbon black tablets were deduced based on material parameter estimation method. The result indicates that absorption coefficients of those tablets are enhanced with the increasing frequency and they are improved with the proportions of smoke powders at the same frequency. The absorption coefficient of tablet filled with carbon black powder is greater than it of graphite tablet. The final results demonstrate that THz wave has stronger penetration capacity through graphite smoke, and carbon black is a promising jamming material for THz detection.

**Key words:** THz wave; graphite; carbon black; absorption coefficient

收稿日期:2016-09-10; 修订日期:2016-10-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(2015AA0392);脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(SK2016ZR05)

作者简介:王启超(1989-),男,博士生,主要从事 THz 探测和系统设计方面的研究。Email:wqc\_wqc@126.com

导师简介:时家明(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事光电系统方面的研究。Email:s\_jiaming66@163.com

## 0 引言

烟幕作为一种人工产生的遮蔽物,能够有效提高武器系统的生存能力和突防能力,得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。在目标探测方面,由于烟幕的使用,使得传统的近红外、中远红外、激光等探测手段往往难以奏效,而太赫兹波良好的穿透能力使得对烟幕遮蔽下的目标的探测成为可能,但目前关于烟幕对太赫兹波的衰减特性研究相对较少。

太赫兹波是指频率在 0.1~10THz(波长在 30 μm~3mm)范围内的电磁辐射。由于太赫兹波具有独特的特性,使其在医学诊断、环境科学、信息通信、生物化学以及目标探测等领域有着广阔的应用前景<sup>[3-7]</sup>。

文中以石墨烟幕和碳黑烟幕为例,实验研究碳类烟幕对太赫兹波的衰减特性。然而,由于 THz-TDS 中太赫兹辐射源功率的限制,较远距离的烟幕透过特性测试存在一定的难度;同时,为获得较高光谱分辨率的测试结果,整个测试过程耗时较长,难以保证烟幕粒子长时间的空中悬浮。

因此,文中采用“固化”烟幕方法,选取 KBr 为弥散基底,分别将石墨粉、碳黑粉与 KBr 按照一定比例均匀混合并压片,以混合压片为测试样品研究上述两种烟幕对入射太赫兹波的衰减特性。该方法可保证测试过程中烟幕的空间分布的一致性(不存在沉降)。利用 THz-TDS 在 0.2~1.1 THz 频率范围测试获得压片样品的太赫兹透射光谱,并基于材料光学参数的提取方法获得样品在上述频率范围内的吸收系数。通过两种烟幕材料对太赫兹波的吸收系数的比较分析以获得不同烟幕材料对入射太赫兹波的衰减特性。相关研究结果可为利用太赫兹波实现烟幕遮蔽条件下的目标探测以及太赫兹波段烟幕材料的研制提供参考。

## 1 测试系统与测试样品

### 1.1 测试系统

测试选用透射式 THz-TDS,其装置图如图 1 所示。该系统所使用的激光源为瑞士 OneFive 公司生产的 Origami 系列低噪声飞秒激光器,中心波长为 1 040nm,重复频率为 80 MHz,输出功率为 143.4 mW。

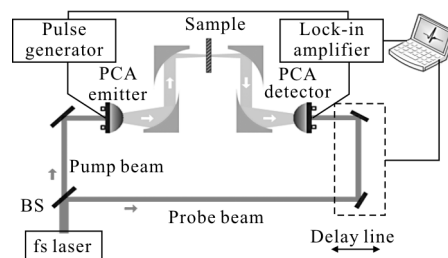


图 1 THz-TDS 装置图

Fig.1 Experimental setup of THz-TDS

飞秒激光通过分束器(BS)被分为泵浦光(Pump beam)和探测光(Probe beam)。泵浦光入射到太赫兹发射元件,通过光电导原理产生太赫兹辐射;探测光经过延迟线装置后到达探测器。太赫兹脉冲透过样品后会被吸收和色散效应所调制,其幅值和相位均会发生一定程度的变化。探测器记录太赫兹脉冲在不同时刻的电场强度,从而获得其时域信号,通过傅里叶变换获得其频谱分布<sup>[8-9]</sup>。

由于空气中的水蒸气对太赫兹波的吸收<sup>[10]</sup>,测试过程采取对样品仓加冲干燥氮气的方法使仓内相对湿度低于 3%,从而提高测试的准确性。

### 1.2 测试样品

实验选用 KBr 作为弥散基底材料,其在太赫兹波段无明显吸收峰;石墨粉购自上海 aladdin 公司,粒径为 2 000 目,纯度大于 99.95%,达到目前烟幕使用的石墨粉的指标要求;碳黑粉购自天津亿博瑞化工有限公司,型号为 F900A。将石墨粉和碳黑粉均分别按照 0.6wt% 和 1wt% 的比例与 KBr 充分混合并压片,压片样品分别记为 G1、G2 和 CB1、CB2。同时,选取纯 KBr 进行压片,几种样片均在 300 个标准大气压下压制,其表面无裂缝,且两平面平行。由于 KBr 易潮解,加之水分对太赫兹波的强烈吸收,压片前将 KBr 置于干燥箱内充分干燥。经测量,样品 G1、G2、CB1、CB2 和 KBr 的厚度分别为 0.88、0.89、0.88、0.98 和 0.71 mm,直径均为 35mm。部分样品实物图如图 2 所示。

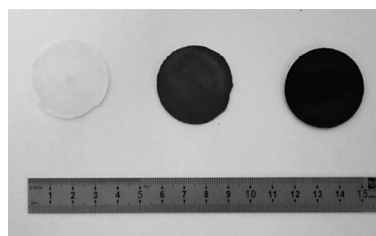


图 2 部分压片实物图

Fig.2 Photos of some pressed tablets

## 2 材料光学参数提取原理

材料的光学参数是用来表征材料宏观光学性质的物理量,一般包括复折射率,吸收系数,复介电常数等。通常,材料的复折射率可表示为:

$$\tilde{n}(\omega)=n(\omega)-i\kappa(\omega) \quad (1)$$

式中: $n(\omega)$ 为实折射率,可描述材料的色散情况; $\kappa(\omega)$ 为消光系数,用于描述材料的损耗。

利用 THz-TDS 实际测量得到的是太赫兹脉冲电场随着时间的演化,通过时域信号的傅里叶变换获得其频谱分布。为便于光学参数的提取,要求被测样品的两平面保持平行,如图 3 所示。图中,介质 1 和介质 3 为空气, $E_{\text{THz}}(\omega)$ 为入射的太赫兹脉冲,经过厚度为  $d$  的样品后产生一系列透射波和反射波, $E_{\text{tm}}(\omega)$ 和  $E_{\text{rm}}(\omega)$ 分别为第  $m$  个透射波和反射波。

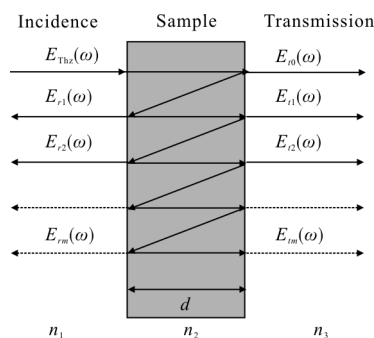


图 3 太赫兹波在平板型介质中的传播示意图

Fig.3 Schematic diagram of THz wave propagation in parallel plate medium

测试过程中,太赫兹脉冲垂直入射。利用测得的样品信号和参考信号的频域谱即可得到不同频率下样品的复透过率(包括振幅透过率和相位延迟)<sup>[11-12]</sup>:

$$\tilde{H}(\omega)=\frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)}= \frac{\tilde{n}(\omega)}{\tilde{n}(\omega)+1} e^{-j\frac{\omega d}{c}(\tilde{n}(\omega)-1)} FP(\omega)=\rho(\omega)e^{-j\varphi(\omega)} FP(\omega) \quad (2)$$

式中: $E_{\text{sam}}(\omega)$ 和  $E_{\text{ref}}(\omega)$ 分别为样品信号和参考信号的频域谱; $FP(\omega)$ 为样品内多次反射产生 Fabry-Perot 标准具效应所引起的结果,在样品较厚时,反射波的光程较大,此时不考虑二次回波, $FP(\omega)=1$ <sup>[12]</sup>; $\rho(\omega)$ 和  $\varphi(\omega)$ 分别为样品信号和参考信号的振幅比和相位差; $\omega$ 为角频率; $c$ 为真空中的光速。

在真空近似(样品前后两侧的折射率均为 1)的前提下,样品的实折射率  $n(\omega)$ 和消光系数  $\kappa(\omega)$ 可分别表示为<sup>[13]</sup>:

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

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

吸收系数  $\alpha(\omega)$ 和消光系数  $\kappa(\omega)$ 之间存在以下关系:

$$\alpha(\omega)=2\omega\kappa(\omega)/c \quad (5)$$

## 3 结果与讨论

利用 THz-TDS 分别测试获得五种压片样品的太赫兹时域谱,如图 4 所示。可以看出:(1)对于样品 G1 和 G2,其厚度相差较小,相同种类掺杂样品的时域信号的峰值与掺杂比例成反比,即掺杂比例越高,其对太赫兹波的衰减越强;(2)样品 G1 和 CB1 具有相同的厚度和掺杂比例,但两者对太赫兹脉冲的衰减情况不尽相同,说明不同种类烟幕材料的消光特性有所不同。

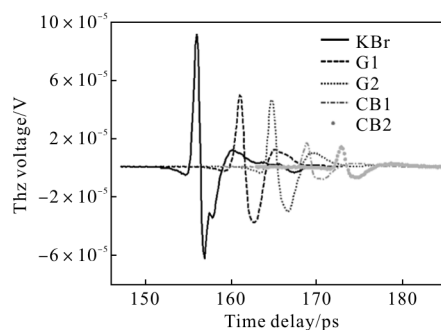


图 4 样品的太赫兹时域谱

Fig.4 THz time-domain spectrums of sample

通过对上述时域谱的傅里叶变换即可获得相应的频域谱分布。随后,利用公式(3)~(5)求得五种样品在 0.2~1.1 THz 频率范围内的吸收系数,如图 5 所示。可以看出:

- (1) 五种样品的吸收系数均随着频率的增大而增大,在考察频率范围内,其吸收系数均处于  $90\text{ cm}^{-1}$  以下;
- (2) 对于相同种类但掺杂比例不同的样品,掺杂比例越大,其对太赫兹波的衰减越强;
- (3) 在相同频率处,掺杂样品的吸收系数均大于

纯 KBr 样品,且不同样品的吸收系数相差较大。对于相同掺杂比例的样品,G1 的吸收系数约为 CB1 的 1/2,这说明碳黑压片样品对太赫兹波的衰减程度大于石墨压片样品。这主要是由于碳黑的电导率大于石墨,其载流子对太赫兹波电场能量存在较大吸收;加之初级碳黑颗粒之间存在较强的范德华力,颗粒之间会发生团聚,形成附聚的高级结构,进一步引起其对入射太赫兹波的衰减<sup>[14]</sup>。

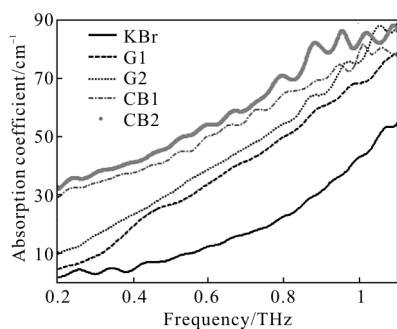


图 5 0.2~1.1 THz 频率范围内样品的吸收系数

Fig.5 Absorption coefficients of tablets in 0.2~1.1 THz

此外,对于 G1、G2、CB1 和 CB2 样品,其吸收系数中包含了 KBr 本身对太赫兹波的衰减。因此,取高掺杂比例的 G2 和 CB2 样品与纯 KBr 样品的吸收系数进行比较,获得石墨烟幕和碳黑烟幕的等效吸收系数,如图 6 所示。

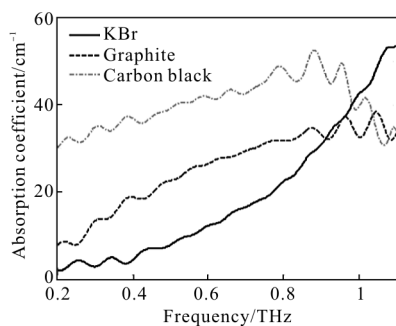


图 6 0.2~1.1 THz 频率范围内碳类烟幕和 KBr 的吸收系数

Fig.6 Absorption coefficients of carbon materials smoke and KBr in 0.2~1.1 THz

可以看出,在 0.2~1 THz 频率范围内,石墨烟幕和碳黑烟幕的吸收系数约为 KBr 的 2~3 倍,且在整个考察频率范围内,碳黑烟幕的吸收系数约为石墨烟幕的 2 倍。

然而,目前的烟幕材料主要针对中远红外和激

光探测,而太赫兹波对于常用的石墨烟幕的穿透性较好<sup>[15]</sup>,但由于碳黑烟幕的导电性和附聚结构,使得其对入射太赫兹波的衰减增强。因此,利用太赫兹波有望实现石墨烟幕遮蔽下目标的有效探测,而其对碳黑烟幕的穿透性欠佳,这也为研制太赫兹波段烟幕材料提供了参考和借鉴。

## 4 结论

文中采用“固化”烟幕方法,将不同比例混合的碳类烟幕材料和 KBr 进行压片,测试了压片样品在 0.2~1.1 THz 频率范围内的太赫兹透射光谱,获得了压片样品在上述频率范围内的吸收系数。对比结果表明,在相同频率处,不同样品的吸收系数均随碳类烟幕材料的掺杂比例的增加而增大;相同掺杂比例的石墨压片样品对太赫兹波的吸收系数小于碳黑压片样品。因此,利用“大气窗口”内的太赫兹波有望实现石墨烟幕遮蔽条件下的远距离目标探测,同时,利用碳黑烟幕可对入射太赫兹波进行遮蔽。

## 参考文献:

- [1] Shen Yueguo, Lv Xuliang, Wang Zhanfeng, et al. Theoretical and experimental study on relative extinction coefficient of smoke particles to laser beams with different wavelengths [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 11(2): 158-160. (in Chinese)  
申岳国, 吕绪良, 王占锋, 等. 烟幕颗粒对不同激光束的相对消光系数理论和实验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 158-160.
- [2] Liu Benli, Wang Hongxia, Zhu Youzhang, et al. Research on interference characteristics of smoke screen to laser[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 737-739. (in Chinese)  
刘本利, 王红霞, 竹有章, 等. 烟幕对激光的干扰特性研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(7): 737-739.
- [3] Jiang Ge, Cheng Binbin, Yang Chen, et al. Method for improving quality of 0.14 THz radar imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2913-2915.
- [4] Zhang X C, Xu Jingzhou. Introduction to THz Wave Photonics [M]. Berlin: Springer, 2007.
- [5] Liu Jia, Fan Wenhui. Investigation of various fabrics in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1538-1540. (in Chinese)

- 刘佳, 范文慧. 常见服装面料的太赫兹光谱研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1538-1540.
- [6] Matteo P, Douglas J Paul. Physics and Applications of Terahertz Radiation[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [7] Bao Rima, Dong Chen, Lan Xingying, et al. Content measurement of hydrocarbons in alkylate gasoline based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1823-1825. (in Chinese)  
宝日玛, 董晨, 蓝兴英, 等. 烷基化汽油中烃类物质含量的太赫兹时域光谱研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1823-1825.
- [8] Du Yong, Xia Yi, Tang Wenjian, et al. Investigation of sulfamethoxazole polymorphism with terahertz time-domain spectroscopical technique[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2919-2923. (in Chinese)  
杜勇, 夏懿, 汤文建, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的磺胺甲噁唑多晶型现象 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2919-2923.
- [9] Du Yu, Li Jingming, Zong Hehou, et al. Absorption spectrum studies on the RDX crystals with different granularity in terahertz frequency range [J]. *Journal of Electronic Science And Technology*, 2014, 12(2): 150-151.
- [10] Yang Y H, Shutler Alisha, Grischkowsky D. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 2-8.
- [11] Guo Lantao, Mu Kaijun, Deng Chao, et al. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 52-53. (in Chinese)  
郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 52-53.
- [12] Timothy D Dorney, Richard G Baraniuk, Daniel M Mittleman. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *J. Opt Soc Am. A*, 2001, 18(7): 3-8.
- [13] Yang Xiaojie, Li Xiangjun, Liu Jianjun. Error analysis of quartz glass terahertz optical parameter measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1828-1830. (in Chinese)  
杨晓杰, 李向军, 刘建军. 石英玻璃太赫兹光学参数测量的误差分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1828-1830.
- [14] Liu Dong, Yan Jianhua, Wang Fei, et al. Study on the optical properties of flame soot in the terahertz spectra Domain [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(12): 3186-3188. (in Chinese)  
刘冬, 严建华, 王飞, 等. 太赫兹波段火焰碳黑的光学特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3186-3188.
- [15] Wang Qichao, Wang Jiachun, Zhao Dapeng, et al. Research on transmission capacity of THz for smoke [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3697-3699. (in Chinese)  
王启超, 汪家春, 赵大鹏, 等. 太赫兹波对烟幕的透射能力研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3697-3699.