

红外低发射率隐身涂层对太赫兹波的反射光谱研究

董海龙, 汪家春*, 曾宇润, 陈宗胜, 时家明

国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230000

摘要 为研究红外低发射率隐身涂层对太赫兹波的反射特性, 制备了红外低发射率隐身涂料, 测试了其可见光效果、红外热像图及红外发射率等特性参数。以土黄色红外低发射率涂料为测试样品, 利用透射式太赫兹时域光谱系统获得了样品在太赫兹波段的复折射率。分析了特征矩阵理论, 并利用特征矩阵理论计算了涂层厚度(0.3~0.5 mm)与入射角度(0°~60°)的变化对入射太赫兹波反射特性的影响。结果表明, 在相应厚度及入射角度范围内, 太赫兹波在 0.8 THz 频率下具有多个反射峰值, 最高值可达 90% 以上, 有利于实现太赫兹波对红外低发射率隐身涂层下金属目标的探测。此外, 涂层厚度变化对入射太赫兹波反射率具有较大影响, 涂层越厚, 太赫兹波的反射振荡越多, 反射峰值越大。入射角度对太赫兹波的反射特性具有一定的影响, 但整体影响不大, 有利于太赫兹波实现多角度目标的探测。最后, 以表面均匀涂覆 0.42 mm 厚涂料的金属板为测试样品, 实验测量了样品在 0.1~1.5 THz 频率范围内的反射特性, 并与部分理论计算结果进行对比。结果表明: 实验测量结果与理论计算结果在数值和趋势上较为吻合, 但也存在一定的偏差。究其原因, 主要由样品厚度和样品参数误差导致, 但依然可利用特征矩阵理论研究红外低发射率涂层对太赫兹波的反射光谱特性。

关键词 红外低发射率隐身涂层; 太赫兹波; 太赫兹时域光谱系统; 特征矩阵理论; 反射特性

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)10-3007-06

引言

红外隐身技术是利用红外伪装材料、红外烟幕等方式降低目标的红外辐射特性, 降低目标的可探测性, 从而达到红外隐身目的的一种隐身技术。针对红外成像探测, 可通过调整目标表面的红外发射率, 形成热红外迷彩效应, 与背景红外辐射相融合的方式, 实现目标的红外隐身。涂覆红外低发射率涂层是一种可降低目标表面红外发射率的有效手段, 经过几十年的发展, 已广泛应用于飞行器、军舰和坦克等军事目标中。

近十年来, 太赫兹雷达在研究和应用上得到蓬勃发展, 有望突破各种伪装材料的限制, 为探测隐身目标提供一种新的技术手段^[1-2]。与红外成像探测及激光雷达探测相比, 太赫兹雷达探测具有诸多探测优势, 在军事探测等领域具有广阔的应用前景: (1) 太赫兹波具有强穿透性, 能够穿透沙尘、红外烟幕以及生物气溶胶等物质, 在恶劣环境下可探测敌方隐蔽的军事目标, 且具有全天候工作的优势^[3]。(2) 与微波、

毫米波雷达相比, 太赫兹雷达发出的电磁波波长更短, 带宽更宽, 具有探测精度高、抗干扰能力强、角分辨率高等特点, 在探测隐身目标和精确制导方面具有更大的优势。因此, 针对太赫兹雷达具有的这些技术优势, 提出利用太赫兹波探测红外低发射率隐身目标的可能性, 为后续太赫兹雷达实现红外隐身探测提供理论和技术支撑。

1 红外低发射率隐身涂料

红外低发射率涂料是实现目标红外隐身的一种有效手段, 其基本要求是实现可见光/近红外与热红外波段的兼容伪装, 即同时满足较低的热红外发射率和可见光/近红外反射要求^[4]。此类涂料一般均匀涂覆在高温目标表面, 目标表面即基底材料一般为高温的金属材料。目前, 红外低发射率涂料制成的红外隐身涂层或红外伪装网在军事上获得了广泛的应用, 并不断向多波段兼容方向扩展。

本文根据国军标 GJB 798—90 中规定的可见光/近红外伪装涂料颜色要求, 以不同比例金属铝粉、酚醛树脂粘合

收稿日期: 2018-08-23, 修订日期: 2019-01-18

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金项目(SKL2016ZR05)资助

作者简介: 董海龙, 1993年生, 国防科技大学电子对抗学院脉冲功率激光技术国家重点实验室硕士研究生 e-mail: 183858891@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: w_jiachun@163.com

剂、三种着色颜料制备出红外隐身涂料,颜色分别为土黄色、墨绿色和浅绿色,其可见光效果图如图 1 所示。

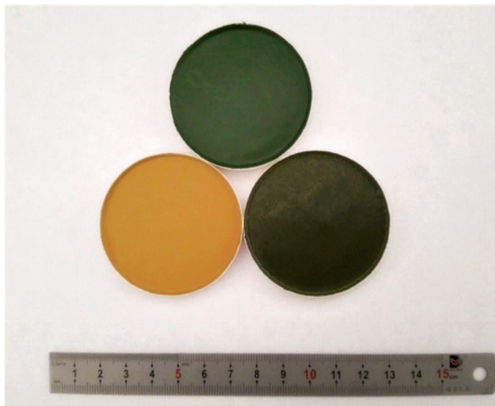


图 1 涂料的可见光图像

Fig. 1 Visible image of coatings

根据热迷彩分割原理,不同颜色的红外伪装涂层具有不同的发射率,土黄色涂料、墨绿色涂料和浅绿色涂料分别具有由低到高的发射率。利用红外热像仪对 3 种涂料进行热成像分析,获得如图 2 所示的测试结果。

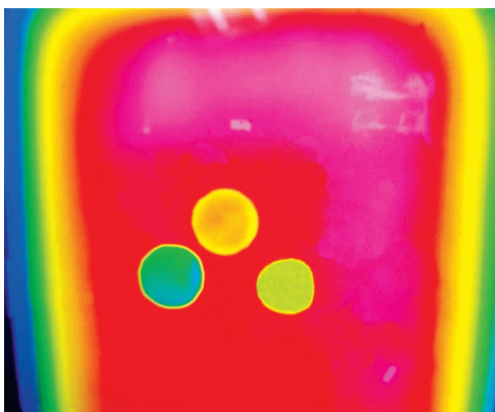


图 2 不同颜色涂料的红外热像图

Fig. 2 Infrared thermography of different color coatings

图 2 上面为浅绿色涂料,左下角为土黄色涂料,右下角为墨绿色涂料。获得的土黄色涂料具有较低的发射率(发射率为 0.51),其次为墨绿色涂料(发射率为 0.75),浅绿色涂料具有最高的热红外发射率(发射率为 0.95),整体具有较好的热红外隐身效果。

土黄色涂料具有较低的红外发射率,在对抗红外成像探测过程中起到很好的效果。在下面的理论分析与实验测试中,均以低红外发射率的土黄色涂料为样品进行测试,研究太赫兹波对红外低发射率隐身涂层的反射特性。

2 红外低发射率隐身涂层对太赫兹波的反射特性理论研究

红外低发射率隐身目标是由红外低发射率涂层和金属表面组成。考虑各层是均匀分布的,电磁波在多层复合结构中

的传输可采用特征矩阵法^[5]、平面波展开法和传输矩阵法等。与平面波展开法和传输矩阵法相比,特征矩阵法对入射电磁波在复合结构中的透射与反射光谱具有计算便捷的特点,故本文选用该方法进行传输特性研究。利用特征矩阵理论研究太赫兹波在复合介质中的传输特性时,必须知道各层材料的复折射率。而低发射率功能涂料是由多种物质混合组成,物质的成分和比例不同,其复折射率往往难以通过文献资料获得。

太赫兹时域光谱系统(Terahertz time domain spectroscopy, THz-TDS)的关键特征是可以有效地测量电磁波经过材料后透过系数的振幅和相位^[6],得到材料在太赫兹波段下的物理和化学信息,可用于提取材料在太赫兹波段的光学常数,如介电常数、复折射率等,在半导体材料^[7-8]、电介质材料^[9]、生物大分子(如 DNA、蛋白质)以及超材料^[10-11]等研究中具有重要作用。材料的光学常数不是常数,而是频率的函数。通常,我们用材料的复折射率描述其宏观光学性质,可表示为

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

其中, ω 为角频率, $n(\omega)$ 为材料的折射率,描述材料的色散情况; $k(\omega)$ 为材料的消光系数,描述材料的损耗。本文采用透射式 THz-TDS 测量材料在太赫兹波段的光学参数,其结构示意图如图 3 所示^[12]。

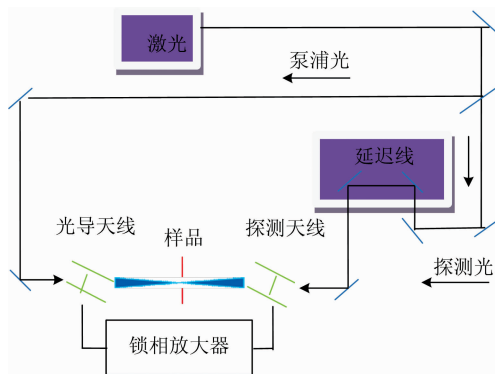


图 3 透射式 THz-TDS 结构示意图

Fig. 3 Assumption diagram of transmitted THz-TDS

在测试过程中,加充氮气使样品仓中的空气湿度低于 5%,利用中央空调对室内温度进行调节,测试采用的红外低发射率涂料样品表面平行光滑,厚度为 1.912 mm。该样品的太赫兹时域光谱信号和频域信号如图 4 所示。

由图 4 可知,太赫兹波在 1.912 mm 厚涂料中传输存在较大的光程差,且衰减大,主要原因是金属铝粉在太赫兹波段具有极大的折射率和消光系数。代入涂料的厚度,通过数据处理获得涂料在 0.1~1.5 THz 频率范围内的复折射率,如图 5 所示。从图中可以看出,峰值表示太赫兹波在涂料中传输存在的衰减峰,特别是高频波段土黄色涂料的消光系数更大,峰值更多。

获得涂料在太赫兹波段的复折射率后,便可通过特征矩阵理论模型计算获得红外低发射率涂层对太赫兹波的反射特性^[5]。假设电磁波以 θ_0 入射到 l 层均匀混合物上,其结构示

意图如图 6 所示。

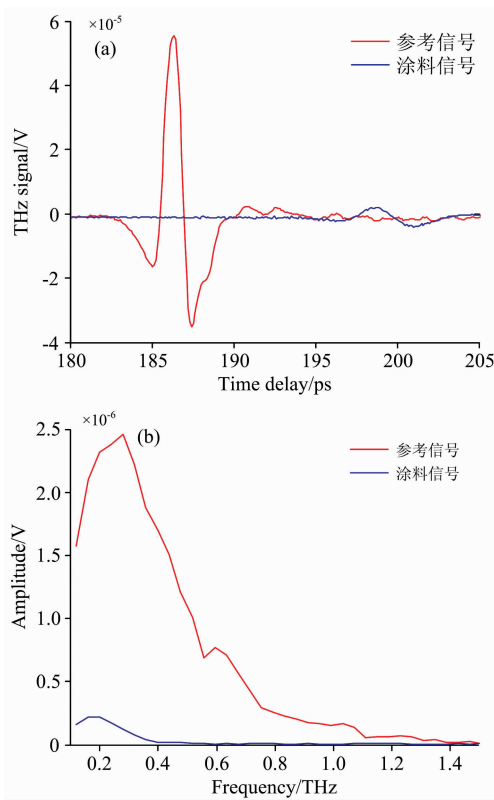


图 4 土黄色涂料的太赫兹光谱图

Fig. 4 Terahertz spectrums of khaki-color coatings

假设电磁波入射到第 k 层介质面时, 其电、磁场的切向分量分别为 E_k 和 H_k , 入射到下一层的电、磁场的切向分量分别为 E_{k+1} 和 H_{k+1} , 他们之间的数值满足如下关系式

$$\begin{bmatrix} E_k \\ H_k \end{bmatrix} = M_k \begin{bmatrix} E_{k+1} \\ H_{k+1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, M_k 为第 k 层的特征矩阵, 数值表示为

$$M_k = \begin{bmatrix} \cos\delta_k & j \frac{\sin\delta_k}{\eta_l} \\ j\eta_k \sin\delta_k & \cos\delta_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\delta_k = \frac{2\pi}{\lambda} n_k d_k \cos\theta_k$$

$$\eta_k = \begin{cases} \frac{n_k}{\cos\theta_k} & \text{TM 波} \\ n_k \cos\theta_k & \text{TE 波} \end{cases}$$

式中, d_k 为第 k 层介质的厚度, n_k 为第 k 层的折射率, θ_k 为光波在第 k 层介质中的折射角。由式可知, 特征矩阵 M_k 由第 k 层的厚度、折射率及入射角度决定。该结构共由 l 层组成, 其总的特征矩阵可表示为

$$M = \prod_{k=1}^l M_k = M_1 M_2 M_3 \cdots M_l \quad (4)$$

可改写为一个 2×2 的矩阵形式

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

当电磁波从最上面一层传输到最下一层时, 可获得入射

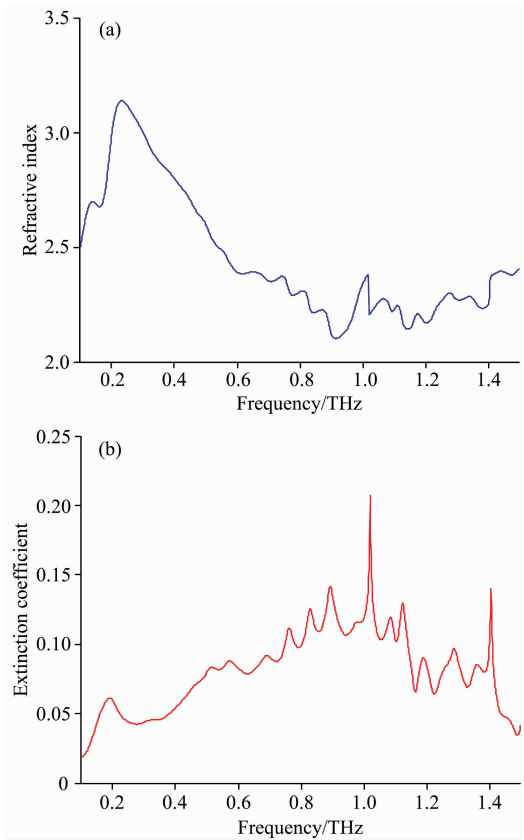


图 5 土黄色涂料在 0.1 ~ 1.5 THz 频段内的折射率与消光系数

Fig. 5 Complex index of refraction of khaki-color coating in 0.1 ~ 1.5 THz band

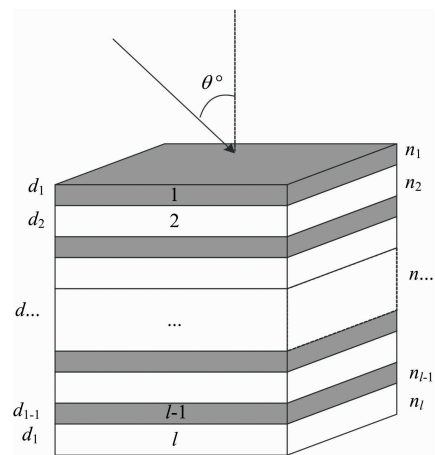


图 6 多层复合材料结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of multi-layer composite structure

电磁波的反射率 R 、透过率 T 分别为

$$R = r r^* = |r|^2 = \left| \frac{m_{11} + \eta_{l+1} m_{12} - \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{l+1} m_{22})}{m_{11} + \eta_{l+1} m_{12} + \eta_0^{-1} (m_{21} + \eta_{l+1} m_{22})} \right|^2 \quad (6)$$

$$T = \frac{P_{t+1}}{P_1} |t|^2 = \frac{4\text{Re}\left(\frac{\eta_{t+1}}{\eta_0}\right)}{|m_{11} + \eta_{t+1}m_{12} + \eta_0^{-1}(m_{21} + \eta_{t+1}m_{22})|^2} \quad (7)$$

实际应用中,不同颜色或不同红外发射率涂料常均匀涂覆在军事目标表面,而目标表面通常由金属物质构成,入射太赫兹波不能穿透,故一般以入射太赫兹波的反射特性来研究太赫兹波对此类隐身目标的探测可行性。由特征矩阵理论可知,涂层对太赫兹波的反射特性受到其厚度和太赫兹波入射角度的影响。

首先考虑厚度变化对太赫兹波反射特性的影响。研究表明,涂覆于军事目标表面的红外低发射率隐身涂层的厚度一般在 $500 \mu\text{m}$ 内,超过此厚度则红外隐身效应不明显,且重量较大不利于实际应用。根据透射式 THz-TDS 测量获得的涂料光学参数,假定太赫兹波垂直入射到表面光滑的伪装涂层,以厚度间隔 $40 \mu\text{m}$,涂层厚度从 $300 \sim 500 \mu\text{m}$ 递增,计算伪装目标对太赫兹波的反射率,如图 7 所示。

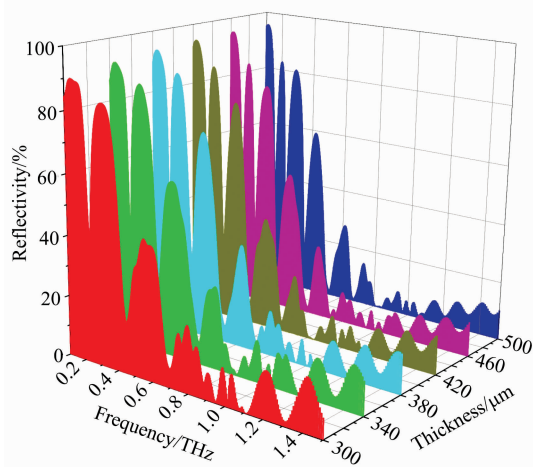


图 7 涂层厚度对太赫兹波的反射率影响
Fig. 7 Reflectivity influence of terahertz wave carried by coating thickness

如图 7 所示,不同厚度的红外低发射率涂层对入射太赫兹波均具有多个反射峰值,且太赫兹波在 $0.1 \sim 1.5 \text{ THz}$ 范围内均存在不同程度的振荡,涂料对入射太赫兹波产生了一定的谐振吸收作用,且频率越低,其振荡幅度越大。究其原因,主要是由于金属的沉淀效果,使表面涂覆的红外低发射率涂料上下表面复折射率存在一定的差异,且涂层厚度为 $300 \sim 500 \mu\text{m}$,具有与太赫兹波波长相比拟的厚度,导致谐振吸收作用得以产生。随着涂层厚度的增加,太赫兹波的振荡增多,反射峰值增大,且峰值频率逐渐左移。在 0.8 THz 范围内,其反射峰值均大于 50% ,具有探测此类伪装目标的可行性。在 $0.8 \sim 1.5 \text{ THz}$ 范围内,涂层对太赫兹波的反射较低,不利于太赫兹波对此类伪装材料的探测。

随后,对太赫兹波入射角度变化产生的反射特性影响进行计算研究。假定涂覆在金属板上的红外低发射率涂层厚度为 $400 \mu\text{m}$,间隔为 10° ,入射角度从 0° 增大至 60° (入射角度大于 60° 时,反射角与入射方向偏离过大,不利于实现雷达

探测)^[13],计算结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,随着入射角度的增大,其反射峰值稍有减小但幅度不大。当入射角度为 60° 时,在 0.8 THz 频率范围内多个反射峰值均处于 40% 以上,最高可达 90% 。在高频范围内,其存在较低的反射振荡,不利于太赫兹波对此类伪装材料的探测。

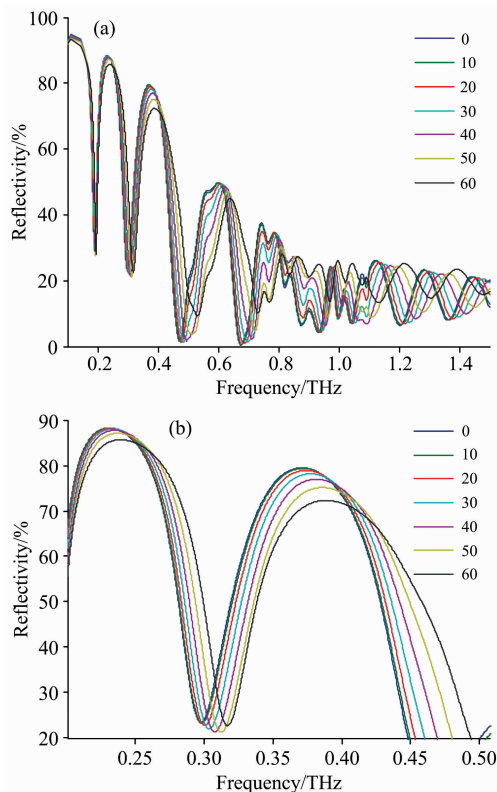


图 8 入射角度变化对太赫兹波反射率的影响
Fig. 8 Reflectivity influence of terahertz wave carried by incident angle

通过涂层厚度与入射角度的变化对入射太赫兹波反射特性的研究,获得 $0.1 \sim 1.5 \text{ THz}$ 频率范围内目标对太赫兹波的反射率。结果表明,此类红外低发射率隐身目标在太赫兹波段存在多个反射峰值,且最高反射率可达 90% 以上,可利用太赫兹雷达实现此类伪装目标的有效探测。

3 实验验证及结果分析

为验证该理论模型的准确性,采用反射式 THz-TDS 对涂覆有红外低发射率隐身涂料的金属铝板进行实验测试,获得目标表面对 $0.1 \sim 1.5 \text{ THz}$ 频段的太赫兹波反射特性。资料显示,红外低发射率涂层厚度一般不超过 0.5 mm 。实验制备某金属铝板表面涂覆的红外低发射率涂料平均厚度为 0.42 mm 。设备采用 30° 入射的样品台,太赫兹波以 30° 的入射角度斜入射到目标表面,获得其在相应入射角度下的太赫兹波反射率,并与相应厚度及入射角度的理论计算结果进行对比,结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出,实验测量结果与理论计算结果在数值和趋势上较为吻合,但也存在一定的偏差。从对比结果看,

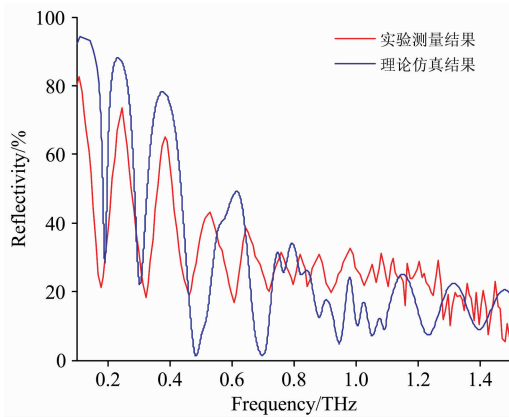


图 9 理论计算与实验测试结果对比

Fig. 9 Comparison between theoretical calculation and experimental test

太赫兹波在 0.1~1.5 THz 范围内均存在不同程度的振荡, 涂料对入射的太赫兹波产生了一定的谐振吸收作用, 且频率越低, 其振荡幅度越大。在 0.8 THz 以下, 实验测量结果总是低于理论值, 且存在较大的周期性振荡。而在高于该频率的太赫兹波范围内, 两者处于较低水平, 反射率在 20%~30% 左右, 实验测试结果略高于理论计算结果。这主要是在测试过程中, 由于系统在高频波段信噪比较差, 导致反射信号大部分淹没在系统噪音中。在 0.1~0.8 THz 频率范围内, 太赫兹波在涂层中上传输存在数个反射峰值, 且均在 40% 以上, 最高反射率达到 80% 以上, 这为利用太赫兹波实现该类红外隐身目标的探测成为可能, 弥补红外探测系统的不足。

对比实验测试和理论计算结果, 在低频段峰值位置和峰值大小存在一定的偏差。分析实验测试和理论计算过程, 获得如下几方面的原因:

(1) 理论计算时认为太赫兹波在光滑平整的涂料表面进

行, 而实验测试采用的样品由于表面存在一定的粗糙度, 太赫兹波以漫反射在涂料中传输, 一部分反射光向不同方向弥漫, 导致接收的反射光存在一定的衰减。

(2) 理论计算与实验测量选用的红外低发射率涂层样品之间存在一定的差异。理论计算时认为样品为均匀介质, 而在涂层样品的实际制备过程中, 由于重力的作用, 金属填料铝粉在酚醛树脂粘合剂中存在沉降, 致使涂料出现分布不均匀的现象。由于铝粉具有较大的密度, 较多的铝粉沉降在涂料的下半部分。上半部分的金属铝粉含量较少, 也是导致太赫兹波在实验测量中获得的反射率低于理论计算的结果。

(3) 涂层不同区域处的厚度误差对测量结果也存在一定的影响。根据特征矩阵理论, 电磁波在介质中的传输特性与各层厚度紧密相关。在制备红外低发射率涂层过程中, 实现涂层各区域具有一致的厚度是相当困难的, 而实验采用的反射式 THz-TDS 的太赫兹入射脉冲光斑尺寸为 22 mm, 致使涂层不同位置处的反射特性并非完全一致, 对实验测试产生一定的误差。

4 结 论

利用透射式 THz-TDS 获得了红外低发射率涂料在太赫兹波段的复折射率, 采用特征矩阵理论模型计算了不同涂层厚度及入射角度下伪装目标在 0.1~1.5 THz 频率范围内的反射率。结果表明, 当涂层厚度为 300~500 μm 时, 太赫兹波在 0.8 THz 频率下具有多个反射峰值, 最高值可达 90% 以上, 有利于实现太赫兹波对红外低发射率隐身目标的探测。随着入射角度的增大其反射峰值降低但降低幅度不大, 最高值均可达 90% 以上, 有利于实现太赫兹雷达的探测。最后, 利用反射式 THz-TDS 测试了太赫兹波对 420 μm 厚涂层的反射率, 并与理论计算结果进行对比, 验证了利用太赫兹波实现红外低发射率隐身目标探测的可行性。

References

- [1] WANG Xiao-hai(王晓海). Space Electronic Technology(空间电子技术), 2015, (1): 7.
- [2] WANG Rui-jun, WANG Hong-qiang, ZHUANG Zhao-wen, et al(王瑞君, 王宏强, 庄钊文, 等). Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2013, 50(4): 4.
- [3] WANG Qi-chao, WANG Jia-chun, ZHAO Da-peng(王启超, 汪家春, 赵大鹏). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2017, 46(5): 0525001.
- [4] WANG Zi-rong, YU Da-bin, SUN Xiao-quan(王自荣, 余大斌, 孙晓泉). Aerospace Shanghai(上海航天), 2000, (1): 24.
- [5] YAN Ji-xiang, WEI Guang-hui(阎吉祥, 魏光辉). Matrix Optics(矩阵光学). Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry(北京: 兵器工业出版社), 1995.
- [6] KOU Kuan, ZHAO Guo-zhong, LIU Ying, et al(寇宽, 赵国忠, 刘英, 等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2015, 42(8): 0815001.
- [7] Grischkowsky D, Keiding S, et al. Opt. Soc. Am. B, 1990, 7(10): 2006.
- [8] TIAN Yan, WANG Yang, ZHAO Guo-zhong(田艳, 王洋, 赵国忠). Modern Scientific Instruments(现代科学仪器), 2006, (2): 51.
- [9] WANG Dong-hong, LI Bao-yi, ZHOU Bi-cheng(王东红, 李宝毅, 周必成). Journal of Microwaves(微波学报), 2014, (S1): 570.
- [10] QI Na, ZHANG Zhuo-yong, XIANG Yu-hong(齐娜, 张卓勇, 相玉红). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2013, 33(8): 2064.
- [11] Wang Q C, Wang J C, Zhao D P, et al. Proceedings of SPIE, 2016, 10155: 101553I.

- [12] LUO Zhen-fei, ZHOU Xun, KONG Wei-peng, et al(罗振飞, 周 逊, 孔维鹏, 等). Chinese Patent(中国专利). CN105896098A. 2016.
- [13] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18: 1562.
- [14] QIU Hang, CHEN Lei-ting, CAI Hong-bin(邱 航, 陈雷霆, 蔡洪斌). Journal of University of Electronic Science and Technology of China(电子科技大学学报), 2010, 39(5): 731.

Reflection Spectrum Study of THz Wave by Infrared Low Emissivity Stealth Coating

DONG Hai-long, WANG Jia-chun*, ZENG Yu-run, CHEN Zong-sheng, SHI Jia-ming

State Key Lab of Pulse Power Laser Technology, College of Electronic Engineering, National University of Defence Technology, Hefei 230000, China

Abstract In order to study the reflection characteristics of infrared low emissivity camouflage coating in Terahertz(THz) wave, the coating was prepared and its characteristic parameters such as visible image, infrared thermal image and infrared emissivity were tested. The complex refractive index of khaki-yellow infrared low emissivity coating in THz band was obtained by using the transmission THz time domain system. The characteristic matrix theory was analyzed, which was used to calculate the reflection spectrum of the coating in THz wave carried by the change of coating thickness(0.3~0.5mm) and incident angle($0^\circ\sim 60^\circ$) respectively. The results show that THz wave has multiple reflection peaks below 0.8 THz, and the maximum value is more than 90%. The result shows that the detection to metal targets that are coated by the infrared low emissivity camouflage coating by applying THz wave is meaningful. In addition, the thickness change of the coating has a great influence on the reflectivity of incident terahertz wave. The thicker the coating, the more reflection oscillation the THz wave has and the greater reflection peak value of it. The incident angle has a certain influence on the reflection characteristics of THz wave, but the overall effect is small, which is beneficial to the detection of multi-angle target by THz wave. Finally, the reflection characteristics of the metal plate coated with 0.42 mm thickness coating in 0.1~1.5 THz were measured, and the experimental results were compared with partial theoretical calculation results. The results demonstrate that the experimental results are in good agreement with the theoretical results, but there are also some deviations. The reason is mainly caused by sample thickness and sample parameter error, but the characteristic matrix theory still can be used to study the reflection spectrum of THz wave by infrared low emissivity stealth coating.

Keywords Infrared low emissivity coating; THz wave; Terahertz time domain system; Characteristic matrix theory; Reflection characteristics

(Received Aug. 23, 2018; accepted Jan. 18, 2019)

* Corresponding author