

宽频段太赫兹辐射计高吸收率涂层的特性

方波^{1,3}, 戚岑科¹, 邓玉强², 高艳姣¹, 蔡晋辉^{1*}, 颜志刚⁴, 夏民荣⁴

¹中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018;

²中国计量科学研究院光学所, 北京 100029;

³上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

⁴杭州大华仪器制造有限公司, 浙江 杭州 310018

摘要 为了对宽频段高吸收率太赫兹辐射计的特性进行表征,研究了吸收涂层材料的特性;对常见的吸波材料在太赫兹波段的吸收率进行仿真,探寻在太赫兹波段具有高吸收率的材料;将碳化硅与 3M 黑漆进行混合,以进一步提高涂层的吸收率,并通过仿真调整涂层内碳化硅颗粒的尺寸;根据仿真结果制备混合涂层,利用太赫兹时域光谱仪对混合涂层样品进行测量。结果表明:该混合涂层样品的光谱吸收率大于 0.99,与仿真结果基本吻合。

关键词 材料; 太赫兹; 吸收涂层; 吸收率; 表面粗糙度

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614020

Characteristics of Highly Absorptive Coatings Used in Terahertz Radiometry

Fang Bo^{1,3}, Qi Cenke¹, Deng Yuqiang², Gao Yanjiao¹, Cai Jinhui^{1*},
Yan Zhigang³, Xia Minrong⁴

¹College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

²Optics Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

³School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

⁴Hangzhou Dahua Apparatus Manufacture Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract To characterize a wide-band and high-absorption terahertz radiometer, it is necessary to study the properties of the absorbing coating material. First, we simulated the absorption rates of common absorbing materials to find materials that have high absorption in terahertz range. Further, we mixed silicon carbide and 3M black lacquer to increase the absorption rate of the coating. In addition, we simulated the variation in the internal particle size of the coating. Finally, the mixed coating was prepared based on the simulation results, and the samples were measured using the terahertz time-domain spectrometer. The measurement results show that the spectral absorbance of the mixed coating is greater than 0.99, which is basically consistent with the simulation results.

Key words materials; terahertz; absorbing coating; absorption rate; surface roughness

OCIS codes 160.1890; 240.5770; 120.3930

1 引 言

随着飞秒脉冲激光技术的发展,已实现在室温条件下产生宽辐射带宽、高强度、高信噪比的太赫兹电磁辐射,并且,太赫兹技术已广泛应用于材料成分

识别、生物样品测试、疾病预防筛查、三维成像、航天通信等领域^[1-5]。尽管各类商品化的太赫兹仪器已日益成熟^[6-7],但太赫兹辐射参数的绝对计量却仍进展缓慢,从而导致了“计量学上的太赫兹空白”^[8]。现有的太赫兹计量仪器的量值无法溯源至国际单位

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-02-17; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF01013005, 2016YFF0100505)、国家重点研发计划“国家质量基础的共性技术研究与应用”重点专项(2016YFF0200306)、国家自然科学基金(11834777)

* E-mail: caijinhui@cjlu.edu.cn

制,无法对测量结果的准确度和有效性进行评估。

近年来,国际计量研究机构已意识到了太赫兹计量的关键性和紧迫性。2011年,美国标准技术研究院(NIST)的 Lehman 等^[9]研制了一种碳纳米管阵列材料,该材料在 0.76 THz 频率下的反射比可达 0.99,他们还以该材料作为吸收体研制了太赫兹功率计,通过电校准来确定功率计的响应度量值。2014年,德国物理技术研究院(PTB)的 Müller 等^[10]利用 NG1 中性灰玻璃作为体吸收材料,并在其反面镀金实现两次吸收,对频率为 2.52 THz 的电磁辐射进行量值溯源,将太赫兹功率溯源至激光功率基准^[11]。2013年,中国计量科学研究院(NIM)的 Deng 等^[12]对自主研制的太赫兹辐射计进行改进,制作了两个完全一致的辐射计吸收腔,形成一对孪生补偿结构,该辐射计在 2.52 THz 和 0.762 THz 合成的标准相对不确定度分别为 1.35% 和 1.50%^[13]。

太赫兹波长是可见光波长的几百倍,许多样品的前表面会在太赫兹波段产生强烈的反射,因此,在太赫兹波段吸收率高且吸收光谱宽而平坦的材料制备成为太赫兹辐射功率准确计量的难点。

2 吸波机理与吸收率的测量方法

吸波材料通过将太赫兹波转换为热能、电能、机械能或其他形式的能,实现对入射太赫兹波的有效吸收^[14]。吸波材料的吸收性能可通过反射损耗 R 来评估^[15]。

吸波涂层的反射系数 Γ 为

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}, \quad (1)$$

其中,

$$Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \tanh\left(i \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}\right)}, \quad (2)$$

式中: Z_0 为自由空间的阻抗; Z 为电磁波入射时材料的特征阻抗; f 为入射电磁波的频率; d 为吸波材料的厚度; c 为真空中电磁波的传播速率; μ_r 为复介电常数; ϵ_r 为复磁导率。

在得到反射系数以后,即可求得反射损耗为

$$R = 20 \lg |\Gamma| = 20 \lg \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|. \quad (3)$$

根据(3)式可知,为了提高混合涂层对太赫兹的吸收效率,需要考虑两个因素:一是使进入到材料内部的太赫兹波最大限度地衰减,转化为热能,可以通过复介电常数和复磁导率寻找适用于制作涂层的材料^[16];二是使入射的太赫兹波最大限度地进入到混

合涂层的内部,减少在涂层表面的直接反射。

样品在太赫兹波段的光谱吸收率 $A(f)$ 为

$$A(f) = 1 - T(f) - R(f), \quad (4)$$

式中: $T(f)$ 为样品在太赫兹波段的光谱透射率; $R(f)$ 为样品在太赫兹波段的光谱反射率。

只要测得样品在太赫兹波段的光谱透射率和光谱反射率,即可得到吸收率。在测试样品时,将样品喷涂在金属铝镜上。选择金属铝镜作为涂层的基底,是因为它在太赫兹波段具有较高的反射率,铝在太赫兹波段的反射率约为 99.6%。太赫兹无法穿透金属铝镜,即(4)式中的 $T(f) = 0$ 。因此,(4)式中的吸收率可简化为

$$A(f) = 1 - R(f). \quad (5)$$

因此,只需要得到样品的反射率,即可通过(5)式计算出样品在太赫兹波段的吸收率。

3 仿真与分析

3.1 吸波材料的仿真结果

利用 CST(computer simulation technology)微波工作室对部分常见的可见光吸波材料进行仿真。选用石墨、碳化硅、3M 黑漆、二氧化硅等材料,在理想情况下进行仿真。在太赫兹波无法穿透的金属基底上(忽略粗糙度的影响)覆盖足够厚度的对应材料,本文覆盖的材料厚度为 800 μm 。仿真结果如图 1 所示。每种材料都有一个反射截止频率,当频率低于截止频率时,样品的反射率急剧升高;当频率高于截止频率后,样品的反射率急剧下降。由图 1 可知,在 0.5~2.0 THz 频段,二氧化硅的反射率可达 0.9 以上,碳化硅的反射率可达 0.5 以上,3M 黑漆的反射率不足 0.2。

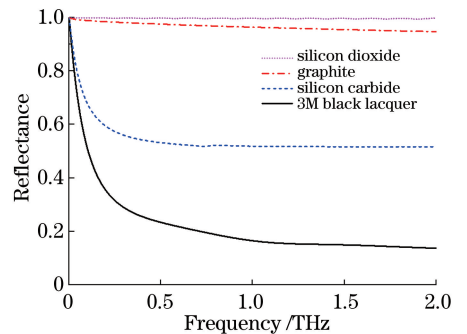


图 1 常见吸波材料在太赫兹波段的反射率

Fig. 1 Reflectance of common materials in terahertz band

3.2 混合涂层的仿真结果

反射率与入射波长及样品前表面的粗糙度有关^[17]。在太赫兹波段,由于波长较大,常见的材料

已不能满足反射层模型理论的要求,因此造成了反射率的升高。为了减少在涂层表面的直接反射,需要增大涂层前表面的粗糙度,可以通过制作高吸收率的碳化硅和 3M 黑漆混合涂层实现。

碳化硅颗粒的形状不规则,为了简化模型,在建模过程中利用球体替代碳化硅颗粒,建立的仿真模型如图 2 所示。

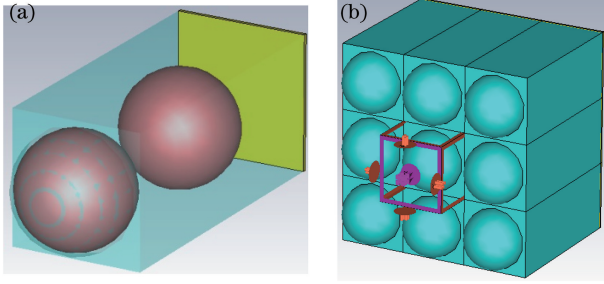


图 2 仿真模型。(a)单元内部结构;(b)周期结构
Fig. 2 Simulation model. (a) Internal structure of unit cell; (b) periodic structure

建模完成后,通过调节碳化硅的尺寸来模拟粗糙度的变化,以观察碳化硅尺寸对混合涂层吸收率的影响。选择 3 种尺寸的碳化硅颗粒,颗粒直径分别为 150, 200, 300 μm 。反射率的仿真结果如图 3 所示。由图 3 可知:混合了碳化硅颗粒的 3M 黑漆的反射率显著低于未加入碳化硅时的结果;同时,在不存在空间散射的情况下,碳化硅颗粒越大,混合涂层的反射率越低,说明其吸收率越高。然而,过大的碳化硅颗粒会导致涂层厚度增加,从而影响热转化效率。权衡反射率与响应时间后,选择直径为 300 μm 的碳化硅颗粒来制作样品。

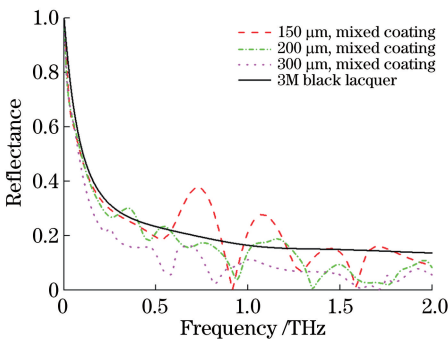


图 3 含不同直径碳化硅颗粒的混合涂层的反射率
Fig. 3 Reflectance of mixed coating containing different diameters of silicon carbide

3.3 样品的制作与验证

将直径为 300 μm 的碳化硅颗粒与 3M 黑漆以一定的比例混合成悬浮液,将悬浮液喷涂在抛光的铝基底上,制作混合涂层样品,如图 4 所示。



图 4 混合涂层样品

Fig. 4 Mixed coating sample

采用 1910DX3 型表面粗糙度测量仪结合平移台得到矩阵数据,数据经处理后,重构样品表面的微观形貌,结果如图 5 所示(X 为涂层横向的测量范围, Y 为涂层纵向的测量范围)。截取该样品表面的不同区域,导入到如图 6 和图 7 所示的样品仿真模型中。设置基底为金属铝,根据截取区域,设置基底的长度、宽度均为 600 μm ,厚度为 20 μm ;铝层上方为黑漆。根据粗糙度仪的测量结果,利用 SolidWorks 软件对黑漆表面形貌进行建模,并将所建模型导入 CST 微波工作室。凸起区域下方存在碳化硅颗粒,同样利用 SolidWorks 软件,根据凸起区域,结合粗糙度仪测量结果进行建模,可得到碳化硅颗粒的模型。将碳化硅颗粒模型导入到 CST 微波工作室中,并置于黑漆表面下方 50 μm 处。

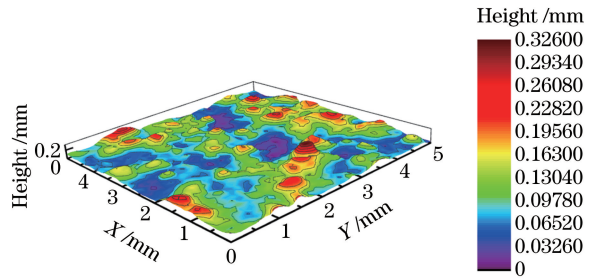


图 5 混合涂层样品的表面形貌

Fig. 5 Mixed coating sample surface

对图 6 和图 7 中混合涂层样品的反射率进行仿真计算,结果如图 8 所示。由图 8 可知:在大于 0.8 THz 的频域范围,样品平坦区域的反射率小于 0.1,并且在 1.17 THz 频点处存在一个吸收峰;在大于 1.17 THz 的频段,反射率保持在 0.05 以下;在大于 0.2 THz 的频段,样品粗糙区域的反射率小于 0.1,在大于 0.4 THz 的频段,反射率随着频率增大而逐渐降低并趋近于 0。与理想的 3M 黑漆的仿真结果比较后可知,利用导入模型进行仿真时,反射率明显更低,说明粗糙度产生了重要影响,样品粗糙区域的反射率曲线较平坦,且反射率总体更低。

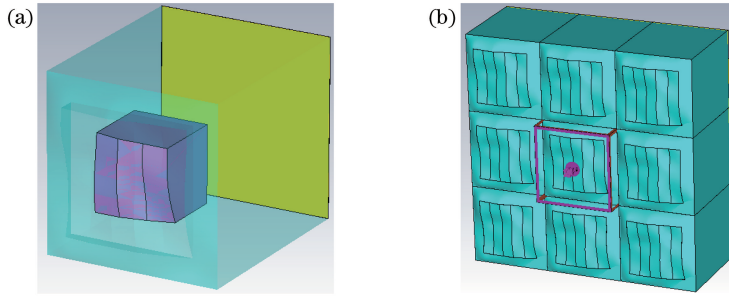


图 6 混合涂层样品平坦区域的仿真模型。(a)单元内部结构;(b)周期结构

Fig. 6 Simulation model of mixed coating sample flat area. (a) Internal structure of unit cell; (b) periodic structure

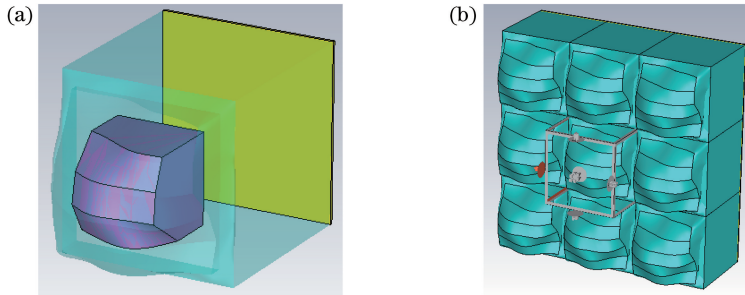


图 7 混合涂层样品粗糙区域的仿真模型。(a)单元内部结构;(b)周期结构

Fig. 7 Simulation model of mixed coating sample rough region. (a) Internal structure of unit cell; (b) periodic structure

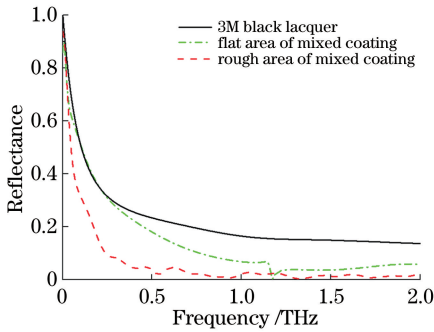


图 8 混合涂层样品反射率的仿真结果

Fig. 8 Simulated reflectance of mixed coating sample

4 吸收涂层反射率的测量结果

为了通过实验验证样品在太赫兹波段的吸收率,首先,考证涂层样品在 2π 空间的散射特性。利用天津大学研制的 360° 范围内任意角度测量的太赫兹光谱仪对样品进行测量,均得到了与背景噪声几乎一致的测量结果,证明了该样品对太赫兹光波没有明显的空间散射特性。然后,采用中国计量科学研究院研制的反射式太赫兹时域光谱测量仪对样品进行测量^[11-12]。金属材料在太赫兹波段具有强烈的反射,抛光铝的反射率约为 99.6%,将抛光铝镜前表面反射的太赫兹光谱作为参考谱。采用反射式太赫兹时域光谱测量仪,对混合了纵向长度分别为 150, 200, 300 μm 的碳化硅颗粒的涂层样品进行测

量,测得的光谱反射率如图 9 所示^[12]。由图 9 可知:碳化硅颗粒的尺寸越大,光谱反射率就越低;混合了碳化硅颗粒的几种混合涂层在太赫兹波段的光谱反射率基本上均小于 0.01,与前面的仿真结果一致;尤其是颗粒纵向长度为 300 μm 的混合涂层,其在 0.1~3.0 THz 波段的光谱反射率小于 0.01,在 0.3~2.7 THz 波段的光谱反射比甚至小于 0.001。

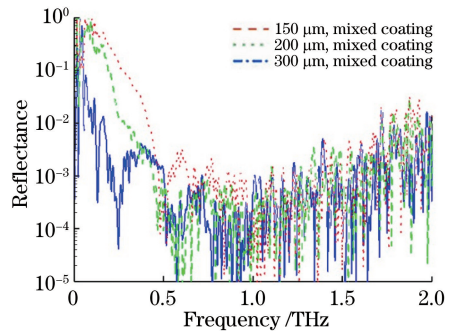


图 9 测量得到的含不同直径碳化硅颗粒的混合涂层样品的反射率

Fig. 9 Measured reflectance of mixed coating samples containing different diameters of silicon carbide

比较图 8 中的仿真结果和图 9 中的测量结果可知:仿真结果与实测结果基本吻合,在大于 0.2 THz 的频段有很高的吸收率;与仿真结果相比,实验结果的吸收频段更宽,且吸收率更高。这是因为实际制备的样品表面比仿真模型更粗糙且更随机,样品内

部碳化硅的分布也更不规则;仿真得到的反射率 in 高频段都很低,而实验测得的反射率在 1.0 THz 以上的频段逐渐升高,原因是在 1.0 THz 以上的频段,太赫兹时域光谱仪测量动态范围逐渐减小,测量的光谱反射率已经达到了仪器测量的本地噪声极限,并不意味着实测的光谱反射比在 1.0 THz 以上的频段逐渐升高,实际反射率仍保持在很小的量值,与仿真结果一致。

5 结 论

本研究对吸波材料在太赫兹波段的光谱反射率进行仿真,以探寻具有高吸收率的材料。通过仿真研究了在宽频段对太赫兹波具有高吸收率的涂层的特性,分析了表面粗糙度对涂层吸收率的影响。结果表明:增加表面粗糙度可使表面反射率明显降低。通过实验对该吸收涂层进行测量,测量结果与仿真结果基本吻合。本研究对于发展高性能太赫兹辐射计具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Mao L, Liu Y, Tian H Y, *et al.* Discussion on the safety of terahertz technology in biomedical applications[J]. International Journal of Laboratory Medicine, 2018, 39(1): 74-76.
毛莉, 刘羽, 田晖艳, 等. 太赫兹技术在生物医学应用中的安全性探讨[J]. 国际检验医学杂志, 2018, 39(1): 74-76.
- [2] Li B, Long Y, Liu H, *et al.* Research progress on terahertz technology and its application in agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(2): 1-9.
李斌, 龙园, 刘欢, 等. 太赫兹技术及其在农业领域的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 1-9.
- [3] Yang H R, Li H G. Research progress on terahertz communication technology [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(1): 12-21.
杨鸿儒, 李宏光. 太赫兹波通信技术研究进展[J]. 应用光学, 2018, 39(1): 12-21.
- [4] Yuan J, Li Q, Gong W P. Influences of compressive sensing 3D reconstruction algorithm control parameters on terahertz digital holography reconstruction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1014001.
袁静, 李琦, 巩文盼. 压缩感知三维重建算法控制参数对太赫兹数字全息再现的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1014001.
- [5] Wang X H. Development of terahertz technology in space remote sensing [J]. Satellite & Network, 2018, 180(3): 66-69.
王晓海. 太赫兹技术在航天遥感中的应用发展[J]. 卫星与网络, 2018, 180(3): 66-69.
- [6] Sun Y F, Tao C B, Sun J D, *et al.* Filter-enhanced high-sensitivity HEMT terahertz detector at room temperature[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0304001.
孙云飞, 陶重彝, 孙建东, 等. 滤波器增强的高灵敏度室温 HEMT 太赫兹探测器[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0304001.
- [7] Liu J, Shen J L, Zhang C L. Progress of terahertz polymer waveguides [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080003.
刘婧, 沈京玲, 张存林. 太赫兹聚合物波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080003.
- [8] Kleine-Ostmann T, Schrader T, Bieler M, *et al.* THz metrology[J]. Frequenz, 2008, 62(5/6): 137-148.
- [9] Lehman J H, Lee B, Grossman E N. Far infrared thermal detectors for laser radiometry using a carbon nanotube array[J]. Applied Optics, 2011, 50(21): 4099-4104.
- [10] Müller R, Bohmeyer W, Kehrt M, *et al.* Novel detectors for traceable THz power measurements[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2014, 35(8): 659-670.
- [11] Steiger A, Gutschwager B, Kehrt M, *et al.* Optical methods for power measurement of terahertz radiation[J]. Optics Express, 2010, 18(21): 21804-21814.
- [12] Deng Y Q, Sun Q, Yu J, *et al.* Broadband high-absorbance coating for terahertz radiometry [J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5737-5742.
- [13] Deng Y Q, Sun Q, Yu J, *et al.* Progress of terahertz radiometry and international comparison[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0314001.
邓玉强, 孙青, 于靖, 等. 太赫兹辐射功率计量研究进展与国际比对[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0314001.
- [14] Li M D, Ouyang W J, Chen Z G, *et al.* Investigation the microwave absorption performance of graphene-based composites [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2018, 35(9): 98-103.
李茂东, 欧阳文璟, 陈志刚, 等. 石墨烯基复合材料的吸波性能研究[J]. 吉林化工学院学报, 2018, 35(9): 98-103.
- [15] Chen X G, Ye Y, Cheng J P. Recent progress in electromagnetic wave absorbers [J]. Journal of Inorganic Materials, 2011, 26(5): 449-457.
陈雪刚, 叶瑛, 程继鹏. 电磁波吸收材料的研究进展

- [] . 无机材料学报, 2011, 26(5): 449-457.
- [16] Li L M, Xu Z. Physical mechanisms of the absorbing function in microwave-absorbing material and its composite design[J]. Advanced Ceramics, 2004, 25(2): 31-34.
- 李黎明, 徐政. 吸波材料的微波损耗机理及结构设计[J]. 现代技术陶瓷, 2004, 25(2): 31-34.
- [17] Smith S M. Specular reflectance of optical-black coatings in the far infrared [J]. Applied Optics, 1984, 23(14): 2311-2326.