

# 太赫兹飞行时间成像在漆盒上的应用

李晨毓<sup>1</sup>, 张宏飞<sup>2</sup>, 曲亮<sup>1\*</sup>, 雷勇<sup>1</sup>, 张存林<sup>2</sup>

<sup>1</sup>故宫博物院文保科技部, 北京 100009;

<sup>2</sup>首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

**摘要** 对文物的保护和修复是一项覆盖考古、物理、化学及生物等多学科交叉的工作, 利用各种科技手段无损地表达文物的历史意义一直是文保工作者的发展方向。太赫兹作为近二十多年来的新兴学科, 被广泛应用于各个领域, 例如安检、药品质量监督和半导体等, 尝试将太赫兹应用到文保领域也是近年来的研究热点。主要讲述太赫兹飞行时间成像在漆器盒子样品上的应用。实验结果表明, 研究的漆器盒子样品具有至少两层结构, 胎体是木质材料, 在木质材料的表面涂漆并在上面描绘不同的图案, 达到装饰的目的。并且可以通过太赫兹飞行时间成像检测漆盒中的胎体也就是木质结构内部是否存在损坏。

**关键词** 探测器; 太赫兹; 飞行时间成像; 漆盒; 文保

中图分类号 TN95

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0604001

## Application of Terahertz Time-of-Flight Imaging to Lacquer Box

Li Chenyu<sup>1</sup>, Zhang Hongfei<sup>2</sup>, Qu Liang<sup>1\*</sup>, Lei Yong<sup>1</sup>, Zhang Cunlin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Conservation Department, the Palace Museum, Beijing 100009, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

**Abstract** Protection and restoration of cultural relics are applicable to various disciplines such as archaeology, physics, chemistry, and biology. Conservators have always been interested in exploring a nondestructive test. Among these *in situ* analysis, terahertz technology has widely applied to various areas as an emerging subject in the past 20 years, including security check, drug quality supervision, semiconductors and so on. Recently, the application of terahertz imaging in the field of cultural security has become a popular topic. In this paper, a lacquer box is investigated through terahertz time-of-flight imaging. Experimental results demonstrate that the lacquer box has a bilayer structure. The completed wood material is considered to be the carcass, the surface of which is painted with different decorative patterns. In addition, terahertz time-of-flight imaging can be used to detect damage inside the carcass, i. e., the wood structure in the painted box.

**Key words** detectors; terahertz; time-of-flight imaging; lacquer box; conservation

**OCIS codes** 040.2235; 110.0110

## 1 引言

文物是历史上见证人类发展的实物留存, 对文物的保护和修复是一项覆盖考古、物理、化学及生物等多学科交叉的工作, 利用各种科技手段无损地表

达文物的历史意义一直是文保工作者的发展方向。对于文物的无损检测, 一般主要分为两个方面。一种是成像分析, 通常使用的成像方法有 X 射线、高光谱成像等, 通过成像可以对青铜器、陶瓷及绘画等文物进行表面和内部检测, 从而说明这些文物的制

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-08-12; 录用日期: 2020-08-25

\*E-mail: lionat528@hotmail.com

造工艺;另外一种成分分析,包括元素组成或分子、原子组成,常使用的原位分析方法有拉曼光谱、X 荧光光谱等,这些分析结果能够为文物的年代、地点等提供一个科技上的佐证<sup>[1-8]</sup>。太赫兹作为一种无损检测技术,能够与上述成像方法和成分分析方法形成技术上的互补,为文物的表达提供更全面的信息。

太赫兹波在电磁波谱中处于一个交叉位置,一部分覆盖微波,一部分覆盖红外。虽然太赫兹波处于交叉位置,但是微波和红外这两个波段的研究方法并不能直接应用于太赫兹的研究,形成了科学家们所说的“THz 空隙”,这个空隙的频率范围为 0.1~10 THz。但在实际研究中,一般研究的频率范围为 0.3~3 THz,在某些特殊情况下,产生的太赫兹波的高频频率达到 100 THz,通过这一种方法,可以研究宽谱的电磁辐射性质。太赫兹波吸引了人们的广泛关注,不仅是因为太赫兹波在人类的生产生活中随处可见,更重要的是不同于其他光波段的一些电磁特性。1) 透视性,太赫兹波对于电介质和非极性物质衰减很弱,透过性强,所以太赫兹波可以透过这些材料而对其进行透射成像,应用成功的案例有球拍、信封及泡沫等材料,而对于金属物质,透射性弱、反射性强;2) 低能性,从量级上来说,一般对其与 X 射线进行对比,太赫兹波的光子能量是 X 射线的兆分之一,低于各种化学键的键能,因此不会引起生物体内各种组成物质的电离,不容易破坏检测物质,对检测物质来说是安全可靠的;3) 光谱性,虽然太赫兹波具有低能性,但很多物质的振动能级在此频率范围内,这些物质在太赫兹波段具有丰富的光谱信息,可以用来研究所使用材料的物质组成;4) 时间分辨本领,太赫兹波的时域脉宽在皮秒量级,能方便对各种材料进行时间分辨光谱的研究,将这种时间分辨的本领与不同物质间的层间反射结合,可以描绘出文物内部的三维信息<sup>[9-11]</sup>。以上的电磁特性显示,将太赫兹应用于文博领域具有广阔的应用潜力。

随着太赫兹技术的发展,将其应用于文博领域的案例也逐渐增多。在国外,太赫兹技术已经成功应用于陶瓷、壁画及木版画等文物的成像分析和成分分析。Adam 等<sup>[12]</sup>利用太赫兹时间分辨反射成像识别了画布上绘画中隐藏的涂料图层,得到了图层的厚度信息。通过太赫兹光谱可以确认涂料的组成成分。Abraham 等<sup>[13]</sup>利用太赫兹成像技术研究了 18 世纪珍藏在阿基坦博物馆(法国波尔多)的埃及密封陶罐,太赫兹计算机断层扫描技术无损地显

示了瓶子的内部体积大约为 100 cm<sup>3</sup>,其中有约 25 cm<sup>3</sup> 的填充物,上述结果与 X 射线和中子诱导瞬发  $\gamma$  能谱丰富了陶罐的内部信息和元素组成信息。基于上述的结果,Seco-Martorell 等<sup>[14]</sup>研究了西班牙艺术家画于 1771 年的艺术品戈雅,太赫兹图像提供了补充信息,可以检测出可见图像中看不到的特征,揭示了隐藏的签名,而其他技术的效果则不太明显。Dandolo 等<sup>[15]</sup>利用太赫兹时域成像技术对壁画中埋藏的结构进行三维成像,检测深度距表面约 1 cm。Dandolo 等<sup>[16]</sup>利用太赫兹反射模式对欧洲漆器文物复制品进行成像研究,实验结果显示,漆器由多层结构组成,胎体为木板,在木板上覆盖了多层的泥和漆。Dandolo 等<sup>[17]</sup>首次对亚洲漆器进行太赫兹成像研究,太赫兹技术提供了有关漆器内部结构的独特信息,有助于人们了解漆器的制作工艺。Oyama 等<sup>[18]</sup>展示了一种集成的亚太赫兹成像系统,并将其应用于木材、混凝土及瓷砖的无损检测。木材在该频率范围具有较高的透过率,因此通过太赫兹透射成像研究了木材内部的不可见晶粒、结及扩散水,还研究了各种木材的太赫兹传输特性,实验结果显示,吸收系数与木材的密度相关性较大;混凝土在该频率范围内也具有较高的透过率,可用于混凝土中的缺陷识别,例如肉眼不可见的裂缝、水扩散及瓷砖的黏结质量等。可以得出结论,亚太赫兹波在检测木材、混凝土及瓷砖中的缺陷时显示出很高的灵敏度。在国内,对于太赫兹在文物上的应用还处于初始阶段,程滨等<sup>[19]</sup>采用折射率常数模型和消光系数常数模型建立了反射式太赫兹波传播仿真模型,同时引入太赫兹发射器和样品间的距离参数对目标函数进行优化。设计具有不同阶梯厚度的面漆涂层样件进行无损检测厚度成像实验,厚度提升了 2 个量级。Zhang 等<sup>[20]</sup>研究了油画的太赫兹层析成像,可以描绘出油画的绘画过程。马雪<sup>[21]</sup>研究了字画类艺术品的太赫兹成像。周萍等<sup>[22]</sup>对国外太赫兹技术在文物上的应用进行了一个简单的总结。

基于国内外太赫兹在文物上的应用,本文搭建了太赫兹飞行时间成像系统,并在漆器盒子样品上进行了初步的实验。漆器盒子样品上的漆器和装饰部分的折射率不同,显示出来的灰度强度有所差别;所用漆器盒子至少由两层构成,一层是底部的木质结构,另外一层是漆器涂在木质结构的表面,在表面上绘制图像来进行美化装饰,但对于表面涂层漆的层数并不能确认;同时可以看出,木质结构中有部分损伤。

## 2 实验和讨论

本文搭建了太赫兹飞行时间成像系统,如图 1 所示。实验所使用的激光器为掺铒光纤飞秒激光器,此激光器的中心波长为 $(785 \pm 5)$  nm,平均功率为 120 mW,重复频率为 $(80 \pm 5)$  MHz,脉冲周期小于 100 fs,光斑直径为 1.4 mm。飞秒激光被半波片和分束镜分为产生光和探测光两部分:1)太赫兹波产生部分,采用低温 GaAs 材料制作的大功率的光导电天线作为太赫兹发射极;2)太赫兹探测部分也采用低温 GaAs 材料制作的天线作为探测器,在此系统中,太赫兹光波以几乎近  $90^\circ$  的入射角聚焦在样品上,然后被反射回来,通过此种方式可以进行飞行时间的测量。在测量的过程中,漆盒被固定在二维( $x$ - $y$ )电动平移台上,在两个空间维度  $x$  和  $y$  上对漆盒进行扫描,通过改变二维平移台的位置而改变漆盒的位置,从而使太赫兹光波可以通过漆盒上的每个点,从而实现逐点扫描成像,同时也能够得到漆盒每个点的太赫兹光谱信息。

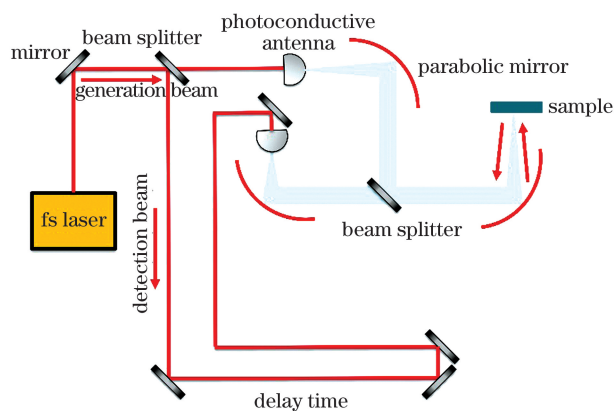


图 1 太赫兹成像系统示意图

Fig. 1 Schematic of terahertz imaging system

实验样品结构如图 2 所示,样品是一个漆器盒子,其长为 10.4 cm、宽为 10.4 cm、高为 5.3 cm,盖子的高为 1.9 cm,在漆器盒盖上有祥云似花纹作为装饰。在历史的长河中,漆器的历史也是非常悠久的,根据资料查询,漆器的使用大概有 4200 多年,可以追溯到夏禹时代。所谓的漆器就是以木质材料或者其他的胎体为底在其上面根据不同的制作工艺绘制不同图案的装饰品、日常器具等。勾勒这些图案所用的材料是生漆等,生漆是采漆人割取漆树而获得的液体,但从漆树上直接割取的漆的颜色并不是这种暗红色。这种显色是液态漆遇到空气被氧化的结果,通过在漆中添加不同的物质可以调制不同的

颜色,用这种漆作为涂料涂在不同的胎体结构上,具有不易被周围介质破坏的作用,并且可以呈现色彩斑斓的装饰效果。中国的漆器工艺发展得很迅速,并且对周边国家日本等地都产生了深远的影响,是中国历史上一项重要的历史发明<sup>[23]</sup>。



图 2 漆器盒子的光学照片

Fig. 2 Optical photo of the lacquer box

利用图 1 所搭建的太赫兹成像系统对漆器盒子的底部和红色装饰部分进行了成像扫描。在高分辨率太赫兹飞行时间成像中使用超短太赫兹脉冲,通过检测从每一层反射回的脉冲,可以获得清晰的光谱,光谱用来研究漆盒的组成成分,并显示出各个层之间的关系,还可以对漆盒进行一维或者二维成像。利用层与层之间存在的时间延迟和不同材质对太赫兹波反射强度的不同,可以将漆盒的胎体木质结构是否有损伤显示出来。如图 3(a)所示,太赫兹脉冲在漆盒表面和木胎表面都会存在反射波,首先是空气与漆表面界面的反射,然后一部分透过的太赫兹波在木胎表面

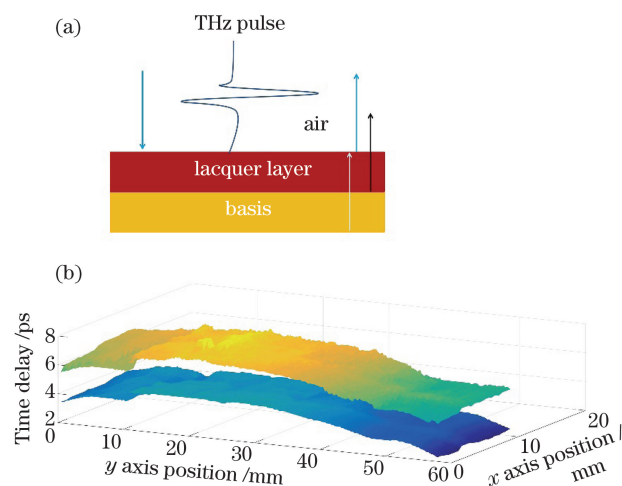


图 3 不同界面缺陷分析。(a)时域成像进行深度剖析的示意图;(b)太赫兹飞行时间成像示意图

Fig. 3 Defect analysis of different interfaces. (a) Schematic of depth profiling by time domain imaging; (b) schematic of terahertz time-of-flight imaging



再次反射,两次反射之间存在时间差,根据  $d = \frac{ct}{n}$ ,其中  $c$  为真空中的光速,  $t$  为时间延迟,  $n$  为在介质中的折射率,也就是漆的折射率,即可估算出漆层的大致厚度。图 3(b) 清晰地显示了两层,上层是漆与木材的界面,下层是漆的上表面;同时显示两个反射层都有一个断层 ( $y = 10 \text{ mm}$ ), 并且木层的断层略大于漆层的断层,这证明,漆在一定程度上修复了木材的瑕疵;与图 2 相对照,木材层和漆层在漆器的边缘略微凸出,并且两层的趋势相同;但并没有观察到从胎体木质结构的反射,可能是由于系统的分辨率不够,还可能是由于能量衰减较快,从而观察不到。

图 4(a) 是部分漆盒盖子所成的太赫兹反射成像示意图,灰度大小是由太赫兹脉冲在每个像素点的峰值振幅来决定的。由于不同物质在太赫兹波段的反射率不同,所以可以清楚地分辨出漆盒盖上的红色和黄色不同装饰部分的形状。图 4(b) 是图 4(a) 中横坐标  $x = 10 \text{ mm}$  处漆盒盖子的太赫兹层析切片时域图,是利用太赫兹脉冲检测胎体木质结构内部是否有缺陷的实验结果。通过电动平移台的运动而改变光斑在漆盒表面的位置,从而获得了不同点位的太赫兹时域光谱图。太赫兹时域光谱的峰值位置也不是严格地在同一个深度,可能也是在漆盒表面绘制图案时,所采用材料的

厚度涂抹不均匀的结果。凹陷部分表示漆和胎体木质结构的反射层,从图 4(b) 中可以看出,凹陷的走势不是一条直线,而是有稍微的弯曲,说明当在木质结构的胎体上涂漆时,涂得并不是完全均匀的,厚度上稍有差别,但是并不能看出涂漆的层数,因为同一批漆的折射率是相同的,并不能在界面上引起反射。综上所述,当太赫兹脉冲入射到漆器样品中后,会在不同深度发生反射,根据反射脉冲峰值的时间延迟可以得出深度分布信息,因此得到了漆器样品在同一位置不同深度的太赫兹时域光谱的图像。从图 4 中可以看出,此样品至少有两个界面,第一个很明显是漆器样品表面,反射发生于空气与漆器样品界面;根据太赫兹波的性质,太赫兹可以穿透大多数介电材料,第二个反射来自于漆和胎体木质结构界面,此反射的基本条件是漆和木质材料折射率的不同。同时,不同界面的反射位置稍有差别,可能是在涂漆的过程中并不是均匀绘制的结果。上述说明,此漆器样品盒子的制作相对来说比较简单,但在实验过程中,成像的时间过长,所以下一步计划优化系统,利用快速扫描成像模块缩小成像时间,同时提高系统的分辨率,集成为小型仪器,并优化后期数据处理,设计大面积扫描支架,对面积大的文物进行成像,对太赫兹技术在文物上的应用进行产业化的推广。

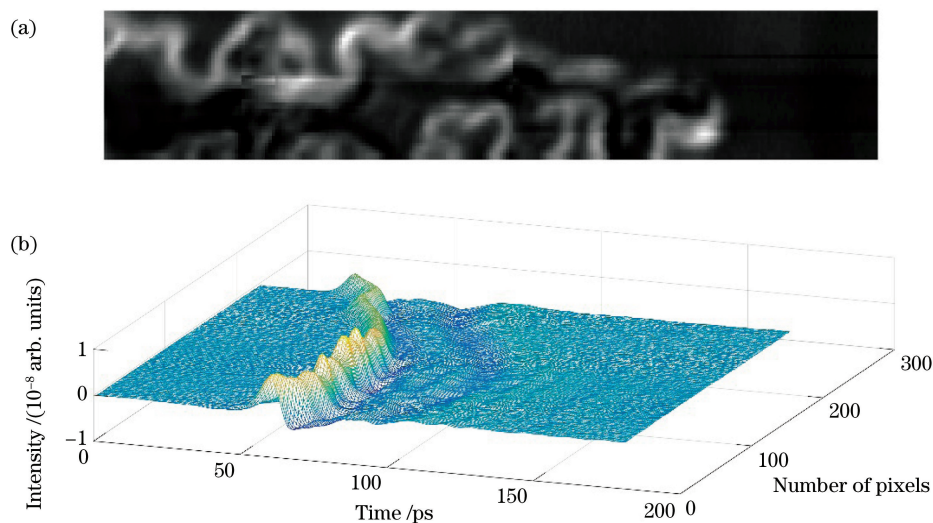


图 4 漆盒盖子太赫兹成像分析。(a) 漆盒盖子表面反射强度图; (b) 漆盒盖子表面的太赫兹时域波形图

Fig. 4 Terahertz imaging analysis of lacquer box lid. (a) Surface reflection intensity on the surface of the lacquer box lid; (b) terahertz time domain waveform on the surface of the lacquer box lid

### 3 结 论

太赫兹技术在我国文博领域的应用还处于发展阶段,案例较少。在 2013 年至 2016 年间,陕西省文

物保护研究院率先承担国家文物局科研课题“太赫兹成像技术对壁画结构探查应用研究”,对壁画上的花纹彩绘进行成像研究;2014 年至 2016 年间,首都师范大学与故宫博物院合作的课题“太赫兹与红外

热波文物多维信息获取与评估系统研究”主要研究油画样品的太赫兹层析成像。油画的研究相对来说比国画简单,原因在于两者的描绘方式不同,简单来说,一种属于厚涂,一种属于薄涂。但在国内对于其他类型的文物,以漆器为例研究较少,因此选取漆盒样品进行无损检测研究,并得到了一些初步的结果。在实际应用中还存在着很多问题亟待解决,未来会根据太赫兹技术的特点,比较国内外成熟的案例,同时针对我国文物的特点开发出适用于不同类型文物的太赫兹检测设备。太赫兹成像的每个像素点都包含此点的光谱结果,这些光谱结果可以与其他成分分析方法一起更全面地提供关于文物组成的成分信息,实现对我国彩绘、陶瓷、漆器等文物的成分分析,并建立相应的太赫兹光谱数据库,填补我国在这个方面的空白;另一方面,我国寺观壁画、墓葬壁画众多,通过太赫兹时域脉冲飞秒时间分辨及多层反射特性,可以对底部隐藏信息进行无损检测,有利于我国壁画文物的保护。

### 参 考 文 献

- [1] Caumes J P, Younus A, Salort S, et al. Terahertz tomographic imaging of XVIIIth dynasty Egyptian sealed pottery [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(20): 3604-3608.
- [2] Chaplin T D, Clark R J, Jones R, et al. Pigment analysis by Raman microscopy and portable X-ray fluorescence (pXRF) of thirteenth to fourteenth century illuminations and cuttings from Bologna [J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2016, 374(2082): 20160043.
- [3] Best S P, Clark R J R, Daniels M A M, et al. Identification by Raman microscopy and visible reflectance spectroscopy of pigments on an Icelandic manuscript [J]. *Studies in Conservation*, 1995, 40(1): 31-40.
- [4] Fukunaga K, Picollo M. Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artists' materials [J]. *Applied Physics A*, 2010, 100(3): 591-597.
- [5] Ling S, Qi Z, Knight D P, et al. Synchrotron FTIR microspectroscopy of single natural silk fibers [J]. *Biomacromolecules*, 2011, 12(9): 3344-3349.
- [6] Bendada A, Sfarra S, Ibarra-Castanedo C, et al. Subsurface imaging for panel paintings inspection: a comparative study of the ultraviolet, the visible, the infrared and the terahertz spectra [J]. *Optics and Electronics Review*, 2015, 23(1): 90-101.
- [7] Garside P, Lahlil S, Wyeth P. Characterization of historic silk by polarized attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy for informed conservation [J]. *Applied Spectroscopy*, 2005, 59(10): 1242-1247.
- [8] Koch-Dandolo C L, Filtenborg T, Fukunaga K, et al. Reflection terahertz time-domain imaging for analysis of an 18th century neoclassical easel painting [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5123-5129.
- [9] Guillet J P, Roux M, Wang K, et al. Art painting diagnostic before restoration with terahertz and millimeter waves [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, 38(4): 369-379.
- [10] Nijima S, Shoyama M, Murakami K, et al. Evaluation of the sintering properties of pottery bodies using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2018, 6(1): 37-42.
- [11] Inuzuka M, Kouzuma Y, Sugioka N, et al. Investigation of layer structure of the takamatsuzuka mural paintings by terahertz imaging technique [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, 38(4): 380-389.
- [12] Adam A J, Planken P C, Meloni S, et al. TeraHertz imaging of hidden paint layers on canvas [J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3407-3416.
- [13] Abraham E, Bessou M, Ziegler A, et al. Terahertz, X-ray and neutron computed tomography of an eighteenth dynasty egyptian sealed pottery [J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(3): 963-972.
- [14] Seco-Martorell C, López-Domínguez V, Arauz-Garofalo G, et al. Goya's artwork imaging with terahertz waves [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 17800-17805.
- [15] Dandolo C L K, Jepsen P U. Wall painting investigation by means of non-invasive terahertz time-domain imaging (THz-TDI): inspection of subsurface structures buried in historical plasters [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, 37(2): 198-208.
- [16] Dandolo C L K, Jepsen P U, Christensen M C. Characterization of European lacquers by terahertz (THz) reflectometric imaging [J]. *Digital Heritage International Congress*, 2013, 1: 89-94.
- [17] Dandolo C L K, Fukunaga K, Kohzuma Y, et al. Inspection of Asian lacquer substructures by terahertz time-domain imaging (THz-TDI) [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2017, 38

- (4): 425-434.
- [18] Oyama Y, Zhen L, Tanabe T, et al. Sub-terahertz imaging of defects in building blocks[J]. *NDT & E International*, 2009, 42(1): 28-33.
- [19] Cheng B, Ren J J, Gu J, et al. High-precision thickness detection of coatings based on terahertz propagation simulation model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1312001.  
程滨, 任姣姣, 顾健, 等. 基于太赫兹传播仿真模型的涂层高精度厚度检测 [J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1312001.
- [20] Zhang Z W, Wang K J, Lei Y, et al. Non-destructive detection of pigments in oil painting by using terahertz tomography [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(12): 124202.
- [21] Ma X. Research on terahertz imaging of art of painting and calligraphy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018: 17-28.  
马雪. 字画类艺术品的太赫兹成像研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 17-28.
- [22] Zhou P, Qi Y, Li Z Y, et al. Application of terahertz technology in culture heritage conservation [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2016, 28(4): 133-143.  
周萍, 齐扬, 李贻宇, 等. 太赫兹技术在文化遗产领域的应用进展 [J]. *文物保护与考古科学*, 2016, 28(4): 133-143.
- [23] Cosentino A. Terahertz and cultural heritage science: examination of art and archaeology [J]. *Technologies*, 2016, 4(1): 1-13.