

高速扫描太赫兹系统在珐琅上的应用

李晨毓^{1*}, 张宏飞^{2,3}, 曲亮¹, 张存林^{2,3}¹故宫博物院文物保护标准化研究所, 北京 100009;²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;³北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100048

摘要 珐琅在宫廷艺术品中享有重要地位,其制作工艺复杂,为了更好地分析珐琅的制作工艺,各种无损的科技手段都被用于珐琅的研究。太赫兹作为最后一个未被完全开发的波段,近年来被广泛应用于无损检测领域,例如通信、安检和航天等。将太赫兹技术应用于珐琅的保护和修复具有重要意义。本文搭建了基于异步光学采样(ASOPS)的高速扫描太赫兹系统,将此系统用于珐琅的反射成像研究。实验结果表明,胎体和掐丝结构的反射率较高,但边缘图案的反射率没有中间金属反射率高。掐丝结构的金属丝较细,太赫兹图像仍可以清晰地显示出它的形态,但并没有观察到不同珐琅釉料颜色的差别。珐琅片的内部至少有两层结构,分别为胎体层和掐丝釉料层。掐丝珐琅釉料层的表面并不平整而是呈现包络状,可能是在制作珐琅的最后一步磨光的过程中磨得不完全,底层的胎体平整而规则。

关键词 太赫兹; 异步光学采样; 珐琅

中图分类号 TN206;O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230736

1 引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz (波长在 30 μm ~3 mm) 范围内的电磁辐射。这个频率范围在电磁波谱中位于微波和红外之间,使得太赫兹波成为一个交叉波段,形成了所谓的“太赫兹”空隙。太赫兹波吸引了广泛关注,不仅是因为太赫兹波广泛存在于人类的生活中,更重要的是由于其独特的电磁波谱性质,例如透视性、安全性和光谱分辨本领等。这些独特的性质使得太赫兹波在材料、生物、化学、物理、通信和成像等领域有着广阔的应用前景^[1-8]。

过去几个世纪,在文物保护领域,太赫兹成像技术已经被应用于壁画、画布绘画和旧羊皮纸等作品的分析。在国外,Oyama 等^[9]利用 0.2 THz 波段的成像系统对木材、混凝土进行了无损检测,研究了各种材料在太赫兹波段的传输特性。木材和混凝土在这个频率范围内显示出高透射率,太赫兹无损检测能得到水分在混凝土块和木材中的扩散结果,并清晰地显示出混凝土块中的裂缝结构和木材的缺陷结构,证明太赫兹波是识别混凝土缺陷的一种非常有效的工具,并且在检测木材的缺陷方面有着高灵敏度,该研究结果对于木器和漆器类样品的检测具有广泛的应用前景。基于上

述结果,Dandolo 等^[10]利用太赫兹反射成像对漆器类文物进行成像;Köhler 等^[11]通过对一幅来自 19 世纪的画作进行太赫兹成像,发现太赫兹波能够穿透油画的涂料层进而提供深度信息。除此之外,组成油漆的物质通过反射频谱来确定。针对 X 射线无法测试的壁画,常规红外反射测量法也不适合检测隐藏在覆盖层下的绘画,太赫兹技术展示了更多的优点;Fukunaga 等^[12-13]利用太赫兹成像对藏传佛教寺庙的壁画进行了测试,检测出了壁画内部的裂缝,同时能帮助估计裂缝深度;Skryl 等^[14]使用太赫兹时域成像和飞行时间层析成像来检查 19 世纪早期的俄罗斯绘画的内部缺陷,确定了绘画结构中存在的裂缝并测试了裂缝深度;Caumes 等^[15]采用与红外温度传感器耦合的单色毫米波成像系统对一个法国博物馆的历史文物进行测试,利用二维和三维分析相结合得到一个有着 3500 年历史密封罐子的内部结构。太赫兹技术正在迅速发展,除了上述所说的文物类型,太赫兹技术也正尝试应用于陶瓷和玻璃等文物领域。在国内,首次将太赫兹成像技术应用于文物领域的是山西大同大学杨成全等^[16],他们利用太赫兹时域光谱系统对云冈石窟进行了光谱研究,达到了区分不同石窟的效果;2013—2016 年,陕西省文物保护研究院承担了科研课题“太赫兹成像技术对

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-04-24; 录用日期: 2023-05-15; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 故宫博物院 2022 年度科研课题“青铜器激光清洗标准流程及关键参数研究”(KT2022-12)、北京故宫文物保护基金会学术故宫万科公益基金会专项

通信作者: *lichenyu032007@163.com

壁画结构探查应用研究”,对壁画上的花纹彩绘进行了分析;首都师范大学与故宫博物院联合承担了北京市科委的项目“太赫兹与红外热波文物多维信息获取与评估系统研究”,对不同颜色的颜料进行了太赫兹光谱的分析,还对一幅油画进行了成像分析^[17-18]。

太赫兹技术作为改变未来的十大科技之一,未来将在文化遗产领域中起到越来越重要的作用。然而,基于太赫兹波形成的太赫兹时域光谱(TDS)系统是应用最早、使用最广的基于机械延迟线的技术,机械电机每移动一步只完成对一个太赫兹波脉冲的扫描,需要耗时几分钟。假设对一个物体进行太赫兹成像,需要采集几万个点,则成像时间过长,所以基于机械步进延迟的太赫兹成像系统无法实现快速扫描,于是在1987年,研究人员提出了基于异步光学采样(ASOPS)的技术,它是超快光谱学与飞秒激光相结合的一项新兴技术,可以很好地解决成像时间长的问题^[19-21]。本文在故宫实验室搭建了基于ASOPS的高速扫描太赫兹成像系统,利用此系统对一个珐琅片进行太赫兹成像。实验结果表明,胎体和掐丝结构的反射率较高,但边缘图案的反射率没有中间金属反射率高,可能是由于两者的组成成分并不相同。掐丝结构的金属丝较细,太赫兹图像仍可以清晰地显示出它的形态,但并不能区分不同珐琅釉料颜色的差别。珐琅片的内部至少有两层结构,分别为胎体层和掐丝釉料层。掐丝珐琅釉料层的表面并不平整而是呈现包络状,可能是在制作珐琅的最后一步磨光的过程中磨得不完全,底层的胎体平整而规则。

2 实验和讨论

异步采样太赫兹成像系统硬件主要包括四个部

分:重复频率控制锁定系统、飞秒激光系统、太赫兹泵浦-探测系统和数据采集系统。本文搭建了基于ASOPS的高速扫描太赫兹成像系统,它使用两个以固定重复频率差工作的锁模飞秒振荡器作为泵浦和探测脉冲的源,才能在没有机械时间延迟线的情况下对太赫兹时域信号进行采样,如图1所示。传统的太赫兹成像系统是通过分束镜分为太赫兹泵浦部分和太赫兹探测部分,而异步采样太赫兹成像系统的探测光和泵浦光不是通过分束镜进行分束,而是分别由两台重复频率可控的飞秒激光器分别产生,同时取消泵浦光路的时间延迟装置。由此可见,泵浦光与探测光之间的时间延迟完全由这两个飞秒激光器的重复频率控制。一个飞秒激光器的重复频率为 f ,另外一个飞秒激光器的重复频率为 $f+\Delta f$,即两个飞秒激光器之间的重复频率差为 Δf 。高重复频率的飞秒激光器作为泵浦激光,低重复频率的飞秒激光器作为探测激光。由于两个飞秒激光器之间具有 Δf 的频率差,泵浦光与探测光到达探测器的时间延迟随着每个脉冲的增加而增加。泵浦光与探测光的频率混频后下变频即为频率 Δf ,因此泵浦光与探测光之间的相对扫描频率即为 Δf 。泵浦光与探测光之间的时间延迟每完成一个周期就会重置为零,周而复始。此外,异步采样太赫兹成像系统可以主动稳定输出重复频率偏移,这样在长时间的数据采集过程中会保持精准的时间轴校准。飞秒激光器的绝对稳定重复频率 f 并不能决定时间轴校准的精度,而稳定的频率差 Δf 至关重要。 Δf 微小的漂移会严重影响精度的校准,从而破坏了时间分辨率。所以异步采样太赫兹成像系统中,泵浦部分与探测部分与传统的太赫兹成像系统的作用方式相同,只是来源于两个不同的飞秒激光器^[22-27]。

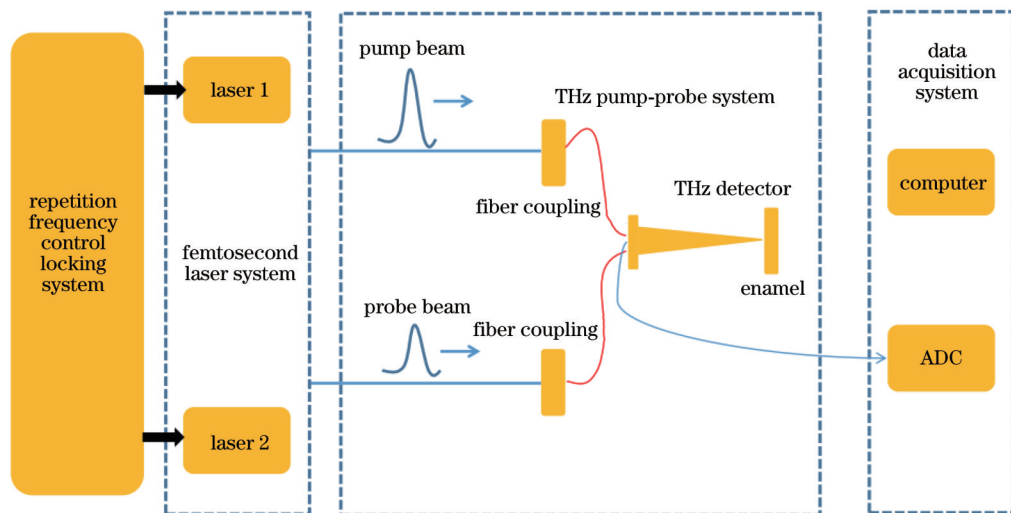


图1 异步采样太赫兹成像系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of asynchronous sampling terahertz imaging system

如图2所示,实验测量使用的激光器的重复频率为100 MHz,脉宽为100 fs,输出脉冲的激光能量为

300 mW,搭建的系统的光谱宽度为5 THz,扫描速度为100 Hz,信噪比为80 dB。太赫兹波的扫描频率与

泵浦光和探测光之间的相对扫描频率相同,即为 Δf 。在本文的系统中,太赫兹的产生是基于半导体的光电导天线,它是使用高速光电导材料来作为瞬态电流源,从而向外辐射太赫兹波,一般采用的光电导材料是高电阻率的 GaAs,在半导体材料表面沉积金属电极,将金属电极制作成偶极天线,然后在电极之间加偏压。当飞秒激光照射在金属电极两极之间的半导体材料时,会在半导体表面产生大量的电子-空穴对。这些由于激光产生的光生载流子在偏压和内建电场的作用下发生定向运动形成电流,这种电流会向外辐射出太赫兹脉冲。太赫兹的探测就是产生的逆过程,也是利用光电导天线进行探测。在搭建的系统中,采取了反射模式来测试珐琅片,太赫兹波几乎垂直入射在珐琅片上。在测量的过程中,珐琅片被固定在三维(x - y - z)电动平移台上,在三个空间维度 x 、 y 、 z 上对珐琅片进行扫描,通过改变三维平移台的位置而改变珐琅片的位置,从而使太赫兹光波可以通过珐琅片上的每个点,从而实现逐点扫描成像。所搭建的系统不仅能够对平整的物体进行测试,还能够对圆形等复杂形态的物体进行测试^[28-30]。

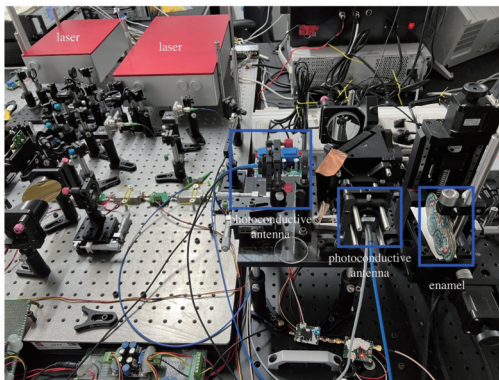


图 2 高速扫描太赫兹成像系统图

Fig. 2 Diagram of high speed scanning terahertz imaging system

如图 3 所示,珐琅片长为 11 cm,宽为 6 cm,厚度大概为 0.3 cm。作为宫廷装饰品的重要组成部分,国内外都鲜有将太赫兹技术应用于珐琅的文献报道,珐琅又称“佛郎”、“法蓝”,是由中国隋唐时古西域地名拂菻音译而来。珐琅器是以珐琅为材料装饰而制成的器物,其基本成分为石英、长石、硼砂和氟化物,与陶瓷釉、琉璃、玻璃等同属硅酸盐类物质。珐琅是将经过粉碎研磨的珐琅釉料,涂施于经过加工工艺制作后的金属制品表面,经干燥、烧成等制作步骤后,所得到的复合性工艺品。珐琅工艺的制作分类方法很多,一般根据制作方法和胎的种类将其分类。珐琅依据具体加工工艺的不同,可分为掐丝珐琅器、鑲胎珐琅器、画珐琅器和透明珐琅器等几个品种。其中掐丝珐琅器就是俗称的“景泰蓝”,15 世纪中期明代景泰年间的制品尤为著称,故有景泰蓝之称。从实物图中可

以观察到测试的珐琅片属于掐丝珐琅,是金属胎珐琅工艺的一种。掐丝珐琅的工艺是在金或者铜胎上用金丝或者铜丝掐出图案,然后将各种颜色的珐琅釉料填入掐出的图案中,最后进行焙烧、研磨、镀金等多道工序。图片中掐丝珐琅的制作大概分为 6 道工序:制胎,用黄色铜丝板制作出器物的形状;掐丝,铜丝依照设计纹饰粘于胎体上;焊丝,将铜丝粘好的纹饰与胎体焊接牢固,大概需要经过 900° 左右的焙烧;点蓝,依纹饰中颜色依次上釉彩,先点地,次点花,再点蓝,釉料粉末由固态转化为液态的加热温度必须控制 800° 以内,否则会使铜丝从胎体上脱落;烧蓝,点一次蓝即烧一次,重复多者甚至可达 12 次;磨光,利用各种辅助材料磨光各种颜色釉料和铜丝的粗糙处,使得呈现出的珐琅样品平整顺滑。除此之外,上述所说的这些工序还须多次反复方可达到想要的效果,可见掐丝珐琅的制作过程难度之大,并且根据相关的文献资料可以看出,掐丝珐琅在古代宫廷艺术品中享有重要地位^[31-34]。



图 3 珐琅片的实物图

Fig. 3 Physical image of enamel sheet

从珐琅的实物样品图可以观察到边缘和图案都是黄色金属制成,不同的部位采用的金属线条粗细有所差别,整体是由不同造型组成的掐丝图案,里面由不同颜色的釉料填充而制成。利用如图 2 所搭建的异步采样太赫兹成像系统对图 3 中珐琅样品进行了反射成像扫描。在异步采样的系统中使用超短的太赫兹脉冲,可使得脉冲通过不同的反射层而对珐琅样品进行成像,同时也可获得清晰的光谱,用来研究珐琅的组成成分。太赫兹脉冲在釉料层和胎体底层之间都存在反射,首先是空气与珐琅表面的反射,一部分太赫兹波反射,还有一部分太赫兹波透射过珐琅表面,并在底层金属胎体上反射,釉料层与金属胎体的反射存在时间差,大致可以推算出釉料层和金属胎体的厚度,但从图 4 中观察到珐琅表面是呈现包络状,并不是平整的,所以每个位置的厚度是不同的,而胎体表面是平整的,根据文献[2]可以估算为 0.23 cm。如图 5(a)所示的灰度强度图像显示了珐琅在太赫兹频段不同材料的光学对

比度。从图中观察到黄色金属部分,特别是实线框内的金属部分反射率很高,而边缘图案的反射率没有实线框内的金属反射率高。虽然内部的掐丝图案比较细,但太赫兹图像中也可以清晰地显示出它的形态。同时并没有观察到不同珐琅釉料颜色的差别。将所得

到的数据进行再次优化处理,得到珐琅片的伪彩色图片,如图 5(b)所示,从成像图中可以观察到实线框和部分边缘位置的反射率较高,但是边缘部分的反射率并不一致,可能是由于两者的金属组成并不完全相同所致^[35-37]。

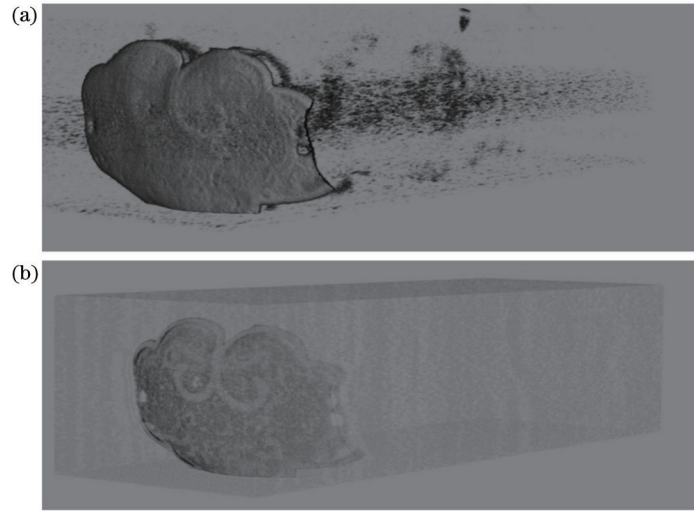


图 4 珐琅片的三维立体侧视灰度图。(a) 骨骼图;(b) 肺状图

Fig. 4 Three-dimensional side view grayscale image of enamel sheet. (a) Skeletal image; (b) pulmonary image

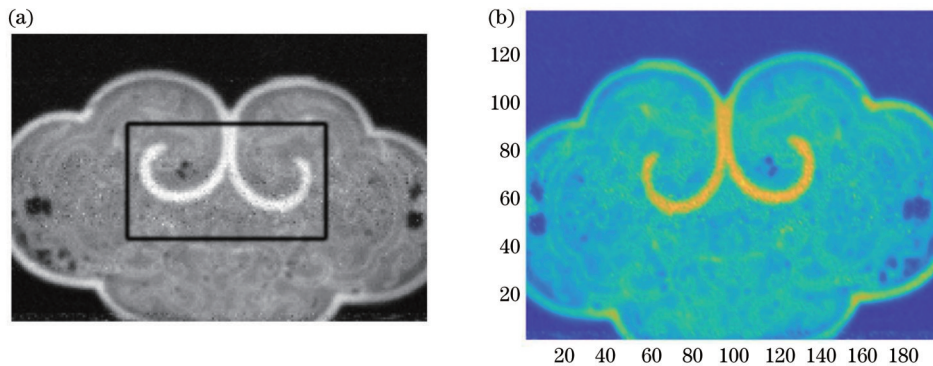


图 5 珐琅片的二维成像图。(a) 珐琅片灰度图;(b) 珐琅片伪彩色图

Fig. 5 Two-dimensional image of enamel sheet. (a) Grayscale image of enamel sheet; (b) false color image of enamel sheet

图 4 是珐琅片垂直入射的侧视图,肉眼上观察珐琅片是平整的,但实验测试的结果表明珐琅片的表面是呈现包络状。分析原因可能是由于在最后一步磨光的过程中,并没有磨得很全面。从整体上可以观察到,珐琅片由两层构成,一层是胎体层,另一层是掐丝釉料层。上述说明珐琅的制作是由不同层次叠加而成,制作工艺复杂。太赫兹成像图并不能很好地分析不同釉料的颜色,初步构想是通过测试不同颜色的太赫兹反射光谱并计算其折射率等参数解决这一问题。但在搭建系统的过程中并没有标注绝对位置,从而准确测得每个颜色的光谱图。下一步计划优化系统,标注绝对位置;不同部分进行集成,缩小系统的大小。在实际的测量过程中也发现,测试的数据量过大,缩小数据量也是下一步的具体工作内容。

3 结论与展望

本文在故宫实验室搭建了基于异步高速扫描的太赫兹成像系统,利用此系统对不同的文物类型进行研究,与其他成像和光谱技术一起为文物提供更多的背景信息。实验结果表明,测试的珐琅片至少有两层结构,一层是掐丝釉料层,另外一层是胎体层。从侧视图可以观察到,釉料层并不像肉眼观察到是平整的,而是呈现包络状结构,说明其磨光并不全面。金属部分都具有较高的反射率,但中间部分与边缘部分反射率不同,说明两者的组成成分并不完全相同。并且从成像图中并不能区分出釉料的颜色。因此未来将尝试利用太赫兹光谱图确认边缘和中间部分是否使用同一种金属,以及两者反射率的差别,并利用太赫兹光谱和反射率等物理参数来区分不同釉料的颜色。本文方法虽

然在珐琅的应用上已经得到部分初步的结果,但是未来还有很多亟须解决的问题:第一,优化系统,标注绝对位置。缩小仪器的大小,对现在的系统实现进一步集成,例如将两个激光器集成为一个;第二,太赫兹成像获得的数据过大,进一步压缩实验数据也是未来的工作之一;第三,制作一个适合文物放置的架子;第四,优化系统中的一些零件,进一步加快成像时间,提高系统的信噪比。而对于珐琅的研究已有初步的思路,搭建太赫兹光谱系统,对不同颜色的釉料进行测试,确认不同釉料颜色的差别。再利用高速太赫兹成像系统对珐琅进行成像,观察珐琅表面和内部是否存在缺陷等。太赫兹技术作为改变未来的十大技术之一,在国外已被应用于多种不同类型文物的研究,但在国内还未被广泛应用于文物保护领域,应用案例较少。而将太赫兹技术应用于珐琅的研究,在国内也属于首例。珐琅作为宫廷中重要的装饰物品,对其研究可以了解珐琅的制作工艺和不同时代的审美差别。

参 考 文 献

- [1] Ho L, Müller R, Römer M, et al. Analysis of sustained-release tablet film coats using terahertz pulsed imaging[J]. *Journal of Controlled Release*, 2007, 119(3): 253-261.
- [2] Fitzgerald A J, Cole B E, Taday P F. Nondestructive analysis of tablet coating thicknesses using terahertz pulsed imaging[J]. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2005, 94(1): 177-183.
- [3] 葛新浩, 吕默, 钟华, 等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(1): 15-18.
Ge X H, Lü M, Zhong H, et al. Terahertz wave reflection imaging system based on backward wave oscillator and its application[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(1): 15-18.
- [4] Novikova A, Markl D, Zeitler J A, et al. A non-destructive method for quality control of the pellet distribution within a MUPS tablet by terahertz pulsed imaging[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2018, 111: 549-555.
- [5] Kawase K, Ogawa Y, Watanabe Y, et al. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. *Optics Express*, 2003, 11(20): 2549-2554.
- [6] Federici J F, Schulkin B, Huang F, et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): S266-S280.
- [7] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R, et al. Recent advances in terahertz imaging[J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(6): 1085-1094.
- [8] Elzinga P A, Kneisler R J, Lytle F E, et al. Pump/probe method for fast analysis of visible spectral signatures utilizing asynchronous optical sampling[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(19): 4303-4309.
- [9] 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.
- [10] Dandolo C L K, Jepsen P U, Christensen M C. Characterization of European lacquers by terahertz (THz) reflectometric imaging [C]//2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), October 28 - November 1, 2013, Marseille, France. New York: IEEE Press, 2014: 89-94.
- [11] Köhler W, Panzner M, Klotzbach U, et al. Non-destructive investigation of paintings with THz-radiation[C]//European Conference on Non destructive Testing(ECNDT), September 25-29, Berlin, Germany. Wikipedia: Elektromagnetische Welle, 2006: 181.
- [12] Fukunaga K, Hosako I, Kohdzuma Y, et al. Terahertz analysis of an East Asian historical mural painting[J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2010, 5: 10024.
- [13] Fukunaga K, Ogawa Y, Hayashi S, et al. Terahertz spectroscopy for art conservation[J]. *IEICE Electronics Express*, 2007, 4(8): 258-263.
- [14] Skryl A S, Jackson J B, Bakunov M I, et al. Terahertz time-domain imaging of hidden defects in wooden artworks: application to a Russian icon painting[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(6): 1033-1038.
- [15] 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.
- [16] 杨成全, 孟田华, 卢玉和. 云冈石窟石质、降尘样品的太赫兹光谱分析[J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(2): 17-19.
Yang C Q, Meng T H, Lu Y H. Research on terahertz spectrum of the YunGang grotto samples[J]. *Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition)*, 2011, 27(2): 17-19.
- [17] 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.
- [18] Li C Y, Shi N C, Li G H, et al. Study of the traditional Chinese pigments by terahertz time-domain and Fourier-transform infrared spectroscopy[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10459: 1045902.
- [19] 胡文娟, 黎孟莉, 廖琼. 中国掐丝珐琅传统工艺的起源和演变 [J]. *美术教育研究*, 2023, 287(4): 52-54.
Hu W J, Li M L, Liao Q. The origin and evolution of the traditional craft of cloisonne enamel in China[J]. *Art Education Research*, 2023, 287(4): 52-54.
- [20] 李晨毓, 张宏飞, 曲亮, 等. 太赫兹飞行时间成像在漆盒上的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0604001.
Li C Y, Zhang H F, Qu L, et al. Application of terahertz time-of-flight imaging to lacquer box[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0604001.
- [21] 王奇书, 牟达, 周桐宇, 等. 玻纤复合材料分层缺陷太赫兹无损检测技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(17): 1712003.
Wang Q S, Mu D, Zhou T Y, et al. Terahertz nondestructive test of delamination defects in glass-fiber-reinforced composite materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 1712003.
- [22] 段国腾, 李林, 崔海林, 等. 全光纤耦合异步光学采样 THz-TDS 系统[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(2): 170-174.
Duan G T, Li L, Cui H L, et al. Fiber-coupled asynchronous optical sampling THz-TDS system[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(2): 170-174.
- [23] 张宏飞, 苏波, 何敬锁, 等. 超快太赫兹时域光谱系统[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 229-232.
Zhang H F, Su B, He J S, et al. Ultra-fast terahertz time domain spectroscopy system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 229-232.
- [24] 韩冰, 葛锦蔓, 任心仪, 等. 基于光频梳的太赫兹器件面形测量技术研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(17): 1704001.
Han B, Ge J M, Ren X Y, et al. Research on surface shape measurement technology of terahertz devices based on optical frequency comb[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(17): 1704001.
- [25] Yasui T, Saneyoshi E, Araki T. Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(6): 061101.
- [26] Bartels A, Cerna R, Kistner C, et al. Ultrafast time-domain spectroscopy based on high-speed asynchronous optical sampling

- [J]. The Review of Scientific Instruments, 2007, 78(3): 035107.
- [27] Kliebisch O, Heinecke D C, Dekorsy T. Ultrafast time-domain spectroscopy system using 10 GHz asynchronous optical sampling with 100 kHz scan rate[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29930-29940.
- [28] 张宏飞, 苏波, Jones David R, 等. 高速太赫兹时域光谱系统中平衡探测器的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(5): 755-759.
- Zhang H F, Su B, Jones D R, et al. Design of balanced detector in high speed THz-TDS system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(5): 755-759.
- [29] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 1-8.
- Xu J Z, Zhang X C. Terahertz science and technology and its application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 1-8.
- [30] 张存林, 张岩, 赵国忠. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 11-15.
- Zhang C L, Zhang Y, Zhao G Z. Terahertz sensing and imaging [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 11-15.
- [31] 梁艳. 初探珐琅彩、粉彩、五彩烧造工艺[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2023, 244(1): 110-113.
- Liang Y. Preliminary study on firing technology of enamel, pastel and multicolor[J]. Identification and Appreciation to Cultural Relics, 2023, 244(1): 110-113.
- [32] 张雪雁, 段佩权, 刘瀚文, 等. 故宫博物院藏一件景泰款掐丝珐琅器的科学分析[J]. 文物保护与考古科学, 2022, 34(6): 81-88.
- Zhang X Y, Duan P Q, Liu H W, et al. Scientific analysis of a cloisonne enamel in the Palace Museum[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022, 34(6): 81-88.
- [33] 刘进. “珐琅彩”与“粉彩”的区别: 兼论珐琅彩技艺的现状与发展趋势[J]. 上海工艺美术, 2022, 153(3): 68-70.
- Liu J. Differences between “enamel color” and “pastel color”—also on the present situation and development trend of enamel color technology[J]. Shanghai Arts & Crafts, 2022, 153(3): 68-70.
- [34] 沐一. 掐丝珐琅: 合璧中西的瑰宝[J]. 中国拍卖, 2022, 197(12): 39-41.
- Mu Y. Cloisonne enamel: a treasure that combines Chinese and western[J]. China Auction, 2022, 197(12): 39-41.
- [35] Zhou Q L, Shi Y L, Wang A H, et al. Transient optical modulation properties in the terahertz metamaterial of split ring resonators[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(5): 058701.
- [36] Zhou Q L, Shi Y L, Wang A H, et al. Ultrafast optical modulation of terahertz metamaterials[J]. Journal of Optics, 2011, 13(12): 125102.
- [37] Tan S Y, Yan F P, Singh L, et al. Terahertz metasurfaces with a high refractive index enhanced by the strong nearest neighbor coupling[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 29222-29230.

Application of High-Speed Scanning Terahertz System in Enamel

Li Chenyu^{1*}, Zhang Hongfei^{2,3}, Qu Liang¹, Zhang Cunlin^{2,3}

¹Conservation Standards Research Institute, the Palace Museum, Beijing 100009, China;

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

³Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Beijing 100048, China

Abstract

Objective The collection of cultural relics in the Palace Museum has a complete system. The cultural relics cover ancient and modern times, with excellent quality and rich categories. The total number of existing collections reaches over 1.8 million pieces (sets), of which more than 8000 are first-class collections. The involved cultural relics are very diverse, mainly including calligraphy and painting, ceramics, metalwork, lacquer, wood, inlaid decoration, textiles, watches, murals, ancient architecture, the copying of ancient calligraphy and painting, and traditional packaging. The Forbidden City not only engages in the maintenance, restoration, and upkeep of cultural relics but also studies the production techniques and disease mechanisms of cultural relics to provide a better preservation environment for cultural relics and promote the development of new protection technologies. Cultural relics are the physical retention witnessing historical human development. It is also the most powerful basis for helping modern people explore history and restore historical truths. The protection and restoration of cultural relics is a multidisciplinary job containing archaeology, physics, chemistry, and biology. Terahertz (THz, referring to the frequency range from 0.1 to 10 THz) selected for research on cultural relic protection has the electromagnetic characteristics of wavelength: perspective, low energy, and high spectral time resolution. Enamel plays an important role in palace art and has complex production processes. Therefore it is of significance to apply THz technology to the conservation and restoration of enamel. This study builds a high-speed scanning THz imaging system based on asynchronous optical sampling (ASOPS) and employs it for the reflection imaging of enamel.

Methods A high-speed scanning THz imaging system is built in the Palace Museum, and it is based on the ASOPS technology. It is a new technology that combines ultrafast spectroscopy with femtosecond laser and can solve the problem of long imaging time. The traditional THz imaging system is divided into two paths, the pump and detection sections

through a beam splitter respectively. However, the pump and detection sections of the asynchronous sampling THz imaging system are not split through a beam splitter. They are generated by two femtosecond lasers with controllable repetition rates, and the time delay device of the pump path is canceled. Thus, the time delay between the pump and detection paths is completely controlled by the repetition frequency of the two femtosecond lasers. As shown in Fig. 2, the laser adopted in the experimental measurement has a repetition frequency of 100 MHz, a pulse width of 100 fs, and output laser energy of 300 mW. The spectral width of setup system is 5 THz, the scanning speed is 100 Hz, and the signal to noise ratio is 80 dB. In this system, the THz wave generation is based on photoconductive antennas. The commonly employed photoconductive material is high-resistivity GaAs. The reflection mode is adopted to test the enamel sheet, and the THz wave is almost vertically incident and focused on the enamel sheet. During the measurement, the enamel sheet is fixed on a three-dimensional (x - y - z) electric translation. The system can not only test flat objects but also test complex shapes such as circles.

Results and Discussions As shown in Fig. 3, the length, width, and thickness of the enamel sheet are 11, 6, and 0.3 cm respectively. Enamel is an important component of palace decorations, whereas there are few references on the application of THz technology to enamel both domestically and internationally. Through observations from the enamel sheets, the edges and patterns are made of yellow metal. The thickness of the leveraged metal lines varies in different parts, and the reflection of THz pulses exists both in the glaze and bottom layers. In Fig. 4, the enamel surface is enveloped and not flat, which indicates that the thickness of each position is different. The surface of the metal substrate is flat, which can be estimated as 0.23 cm according to Ref. [2]. As shown in Fig. 4 (a), the grayscale intensity image is the optical contrast of the enamel sheet with different materials in the THz frequency band. The yellow metal part, especially the metal part inside the box, has higher reflectivity, while the reflectivity of the edge pattern is not as high as the metal part inside the box. Although the internal filigree pattern is relatively thin, its shape can also be displayed in THz images. Additionally, no differences in the color of different enamel glazes are observed. The data is further optimized to obtain false color images of the enamel sheet, as shown in Fig. 5 (b). The reflectivity of the box and some edge parts is not the same as the edge part. The reason may be that the metal composition of the two parts is different.

Conclusions We study the enamel sheet by utilizing the setup system in the Palace Museum. This system is utilized to investigate the enamel sheet. The experimental results show that the reflectivity of the carcass and filigree structure is higher, but the reflectivity of the edge pattern is not as high as that of the intermediate metal. Although the metal wire of the filigree structure is relatively thin, its morphology can still be displayed in THz images. There are no observed differences in the color of different enamel glazes, and the interior of the enamel sheet has at least two layers of structures respectively, including carcass layer and filigree glaze layer. The surface of the glaze layer for enamel is not flat but presents an envelope shape. It may be due to incomplete polishing during the final step of making enamel. The underlying carcass is flat and regular.

Key words terahertz; asynchronous optical sampling; enamel