



DOI: 10.12086/oe.2020.190543

连续太赫兹波数字全息相衬成像

史晓玉¹, 王大勇^{1,2*}, 戎路^{1,2}, 赵洁¹, 王云新^{1,2}¹北京工业大学应用数理学院, 北京 100124;²北京工业大学应用数理学院, 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124

摘要: 太赫兹波具有独特的低能性、高穿透性、惧水性等成像特性, 将其应用于相衬成像能够反映物体的内部结构和更加丰富全面的生物信息, 在生物医学检测等领域具有重要的应用。其中, 太赫兹波数字全息成像是一种可以给出定量的振幅和相位信息的非接触、全场相衬成像方法, 是太赫兹成像技术领域的重要研究方向之一。本文基于连续太赫兹源, 从离轴式和同轴式数字全息成像的相衬成像原理、光路系统和再现算法多个方面, 介绍了相关技术的研究现状, 分析了太赫兹源、再现算法等因素对成像分辨率的影响, 并对太赫兹数字全息的发展趋势进行了展望。

关键词: 太赫兹成像; 数字全息; 分辨率; 相衬成像

中图分类号: O438.1; TB877.1

文献标志码: A

引用格式: 史晓玉, 王大勇, 戎路, 等. 连续太赫兹波数字全息相衬成像[J]. 光电工程, 2020, 47(5): 190543

Phase contrast imaging based on continuous-wave terahertz digital holography

Shi Xiaoyu¹, Wang Dayong^{1,2*}, Rong Lu^{1,2}, Zhao Jie¹, Wang Yunxin^{1,2}¹College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;²Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: Terahertz (THz) radiation, due to its unique propagation characters of low-energy, high-penetration, water-absorption, provides internal structure of objects and comprehensive biological information in phase contrast imaging. It has been applied in biomedical imaging, non-destructive testing, and other fields. As an important part of THz imaging technology, continuous-wave (CW) THz digital holography (TDH) is qualified as a non-invasive and whole-field phase contrast imaging method. In this paper, we review the development and status of off-axis and in-line TDH, including the recording and reconstruction theory, experimental setup, and reconstruction algorithms. The influence of existing THz sources and the reconstruction algorithms on resolution and fidelity of imaging are analyzed. And the development trend of TDH is prospected in the end.

Keywords: terahertz imaging; digital holography; resolution; phase contrast imaging

Citation: Shi X Y, Wang D Y, Rong L, et al. Phase contrast imaging based on continuous-wave terahertz digital holography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190543

收稿日期: 2019-09-12; 收到修改稿日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61675010); 北京市科技新星项目(2018072)

作者简介: 史晓玉(1989-), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事随机激光, 微纳光学和太赫兹成像的研究。E-mail: xyshi@bjut.edu.cn

通信作者: 王大勇(1968-), 男, 博士研究生, 教授, 主要从事实时光电混合信息处理、光学全息、数字全息、太赫兹成像、微波光子学及空间光调制器等研究。E-mail: wdyong@bjut.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

1 引言

太赫兹波(Terahertz, THz)是指频率为 0.1 THz~10 THz(波长在 30 μm ~3 mm)范围内的电磁波^[1-2],位于毫米波与红外波之间,是电磁波谱中唯一尚未完全开发的频段。太赫兹波具有低能性、穿透性、惧水性、指纹吸收谱等重要的特征,在生物医学、物理科学、电子信息、国防航天等诸多领域具有广阔的应用前景,引起了世界各国科研人员的广泛关注。太赫兹技术被评为“改变未来世界的十大技术之首”,也是国际上重要的前沿交叉领域。其中,太赫兹成像技术被认为是太赫兹波科学与技术中最具有应用前景的研究领域之一^[3-4]。

太赫兹波相衬成像不仅可以利用材料吸收获得空间密度分布,还可以通过相位测量得到折射率的空间分布,能够反映更准确的内部结构和更加丰富的材料信息。传统的相衬成像主要是基于太赫兹波时域脉冲成像系统(terahertz time-domain spectroscopy, TDS)实现的,这种成像方法通过相干延迟扫描探测的方式可以同时获得物体的振幅和相位分布^[5-6]。此外,该方法还可以通过光谱成像探测物体的光谱信息。然而,太赫兹波时域成像技术通常需要时间延迟采样,难以快速全场获得样品的幅值和相位信息。为满足生物医学和生命科学中的实际需求,需要进一步探索其他有效的相衬成像方法。

可见光波段的数字全息成像是一种较为成熟的相衬成像方法,采用 CCD 和 CMOS 等二维面阵探测器替代传统记录材料获取全息图,并通过计算机实现衍射传播和数值再现,可以给出定量的振幅和相位信息,具有全场、无机械扫描、实时成像的特点,在生物医学成像、无损检测等领域取得了丰富的研究成果^[7-11]。在太赫兹波段引入数字全息成像技术能充分利用后者的优势,从所获取的太赫兹干涉强度图像中提取出样品的定量振幅与相位信息,可为太赫兹波相衬成像提供一种新的技术途径。该方法既能穿透可见光波段非透明的非极性材料,又能实现全视场定量相衬成像,有望在生物医学领域得到广泛应用。

近年来,太赫兹器件得到了迅速发展,出现了可靠、稳定、高功率的连续(continuous-wave, CW)太赫兹发射源,也出现了能在室温下工作、像元尺寸更小、像素个数更多的面阵式探测器,为太赫兹波与数字全息的结合提供了充分的可能。1) 在连续太赫兹激光光源方面:太赫兹气体激光器(far-infrared laser, FIRL)是被

二氧化碳激光器泵浦的大功率可调谐连续太赫兹波辐射源,主要应用辐射频率在 2.52 THz (118.8 μm)、输出功率可以达到 500 mW,是在室温下运行的高功率连续太赫兹辐射源^[12]。量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)是基于多层半导体结构电子跃迁的电泵浦激光器^[13-15]。这类激光器大部分是在低温下实现的,在低温下运行的输出功率可以达到几瓦,是太赫兹波相干成像的理想光源。耿氏二极管(Gunn diode)振荡器是一类基于半导体技术的紧凑型连续太赫兹源。基于砷化镓和氮化镓的耿氏二极管输出频率最高分别可达到 200 GHz 和 3 THz,在室温下可实现 0.1 THz~1 THz 范围内的单色连续波辐射^[16-17]。倍频链(multiplier chain)通常与耿氏二极管等电子源结合,产生更高频率的辐射波。倍频器是基于肖特基二极管或晶体管的电子电路,对电磁波具有非线性响应^[17]。入射波通过倍频器产生高次谐波分量,并利用滤波器或波导进行收集。毫米波矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)的发射和接收部分常通过集成倍频模块来进行扩频。回波振荡器(backward-wave oscillator, BWO)可以通过改变加速电压产生覆盖微波到太赫兹波频率范围的可调谐激光输出^[18-19],电子枪附近的输出功率在 1 mW (1 THz)到 50 mW (0.2 THz)之间。这类太赫兹源的输出功率高、谱线窄、频率可调以及其产生的波前质量好,常被用作相干太赫兹成像的光源^[20]。2) 在太赫兹面阵探测器方面:热释电探测器是基于 LiTaO_3 热释电晶体实现的面阵式探测器,能够探测到从红外到太赫兹波段的辐射光。商用的热释探测器包括 Ophir-Spiricon 公司 Pyrocam III(像素个数 124 \times 124,像素间隔 100 μm)和 Pyrocam IV(像素个数 320 \times 320,像素间隔 80 μm)两种型号^[21]。微测热辐射计是集成在芯片上的测热辐射计探测器,借助对温度敏感的电阻探测器来间接测量电磁辐射功率。基于微测热辐射计热探测器成像得到的图像中噪声主要来源于热辐射噪声。目前常用的微测热辐射计包括 Xenics Gobi-640(像素个数 640 \times 480,像素间距 17 μm)^[22], Devitech IR-032(像素个数 640 \times 480,像素间距 25 μm)^[23-24], Miricle 307(像素个数 640 \times 480,像素间距 25 μm)^[25], IRay Technology(像素个数 640 \times 512,像素间距 17 μm)^[26], NEC IRV-T0831(像素个数 320 \times 240,像素间距 23.5 μm)^[27]。

本文主要介绍目前连续太赫兹波数字全息相衬成像技术的研究进展,从离轴式全息和同轴式全息两方面展开介绍,包括连续太赫兹波数字全息成像记录与

再现的机理, 实验装置设计、数值再现算法和成像结果等。

2 连续太赫兹波离轴数字全息成像

连续太赫兹波数字全息成像包括记录和再现两个过程。太赫兹波离轴数字全息成像的全息图记录过程如图 1 所示^[28], 太赫兹波通过分束后, 一束光照射在物平面 (x_0, y_0) 上产生受样品调制的太赫兹波, 即物光波 O ; 另一束光以一定角度传播到距离为 d 的记录平面 (x, y) , 即参考光波 R 。携带物体信息的物光与参考光干涉, 干涉光场的强度分布即为全息图, 通过探测器记录下来, 记录面的太赫兹波全息图强度分布可表示为

$$H(x, y) = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y)^* R(x, y) + O(x, y) R(x, y)^* \quad (1)$$

连续太赫兹波数字全息的再现过程是利用计算机

完成的。现阶段太赫兹波段的面阵式探测器像素个数较少、靶面尺寸较小, 直接记录的图像信噪比较低, 需要在进行数值再现前对记录的全息图进行预处理, 提高全息图中条纹的对比度, 抑制噪声。然后通过频谱滤波等后期处理把实像和孪生像分离出来, 通过基于傅里叶变换运算的衍射传播再现算法模拟太赫兹波的传播过程, 基于瑞利—索末菲衍射传播条件将记录面复振幅回传至物平面。常用的再现算法主要包括基于菲涅耳衍射理论的菲涅耳变换再现方法, 基于瑞利-索末菲衍射积分公式的卷积法和基于标量衍射的亥姆霍兹方程的角谱法^[29]。再现过程中可借助自聚焦算法获得准确的再现距离和物体信息, 得到的物体强度分布 $I(x_0, y_0)$ 和包裹相位 $\varphi(x_0, y_0)$ 分布可分别表示为

$$\begin{cases} I(x_0, y_0) = |H(x_0, y_0)|^2 \\ \varphi(x_0, y_0) = \arctan \frac{I_m H(x_0, y_0)}{R_m H(x_0, y_0)} (\text{mod } 2\pi) \end{cases} \quad (2)$$

对于光学厚度在一个波长以上的样品, 还需要通过相位解包裹算法来获取实际的相位值。

2.1 透射式连续太赫兹波离轴数字全息成像

早期的连续太赫兹波数字全息成像系统是通过单点探测器的逐点扫描来完成数字全息图。爱尔兰国立梅努斯大学的 Mahon 等人在 2004 年利用 100 GHz 的耿氏(Gunn)二极管振荡器, 搭建了离轴无透镜菲涅耳太赫兹数字全息成像系统^[30]。太赫兹波照射聚四氟乙烯样品, 利用肖特基二极管逐点扫描来记录全息图, 光路如图 2(a)所示^[31]。重建得到镂空金属字母 M 的振幅图像如图 2(b)所示, 成像分辨率约为 9 mm (3λ)。

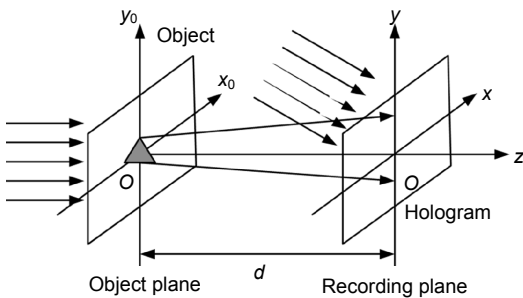


图 1 连续太赫兹波离轴数字全息原理示意图^[28]
Fig. 1 Schematic of recording process of CW terahertz off-axis digital holography^[28]

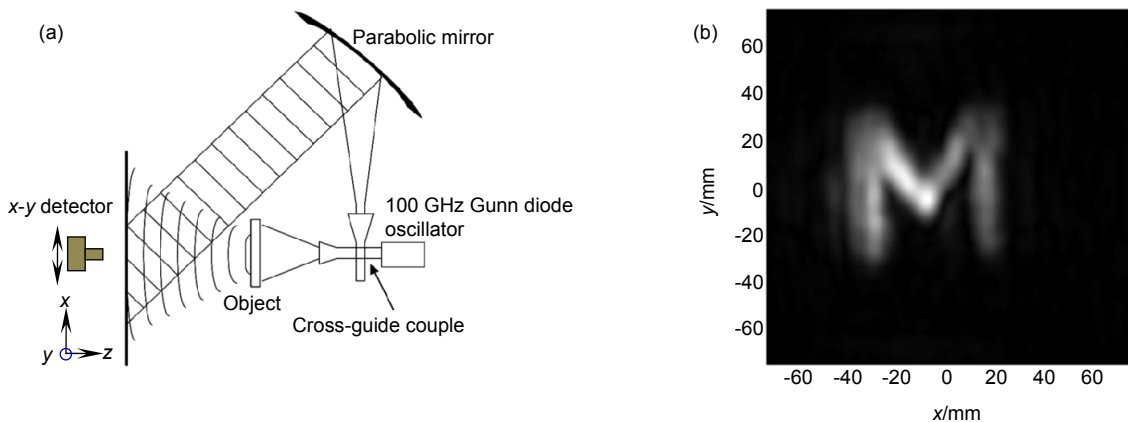


图 2 (a) 基于耿氏型二极管振荡器的数字全息成像装置; (b) 镂空金属字母的重建图像^[31]
Fig. 2 (a) Experimental setup for the creation of terahertz digital holograms based on Gunn diode oscillator;
(b) Reconstructed intensity image of engraved metal alphabet^[31]

美国阿拉巴马州立大学 Heimbeck 等^[32]基于调谐频率范围为 0.66 THz~0.76 THz 的 50 μ W 相干连续太赫兹源与肖特基二极管探测器,搭建了马赫-曾德型离轴太赫兹数字全息装置(如图 3(a)所示)。实验中,分别在 0.68 THz 和 0.725 THz 频率下记录相应的太赫兹数字全息图,利用双波长解包裹方法重建得到聚甲基戊烯材料样品的相衬图像,实验结果如图 3(b)所示,其轴向相位精度约为 $1/40\lambda$ 、横向分辨率约为 0.64

mm,解决了 2π 相位解包裹问题。然而,基于肖特基二极管探测的成像系统需要逐点扫描来记录全息图,较难实现快速全场成像。

2011 年,哈尔滨工业大学利用商业二氧化碳泵浦连续太赫兹源(2.52 THz)和面阵式热释电探测器(像素个数 124×124 ,像素间隔 $100\ \mu\text{m}$,像素尺寸 $85\ \mu\text{m}\times 85\ \mu\text{m}$)搭建了太赫兹离轴数字全息成像系统,其横向分辨率达到 0.4 mm (3.4λ),如图 4 所示^[33]。这种太赫兹

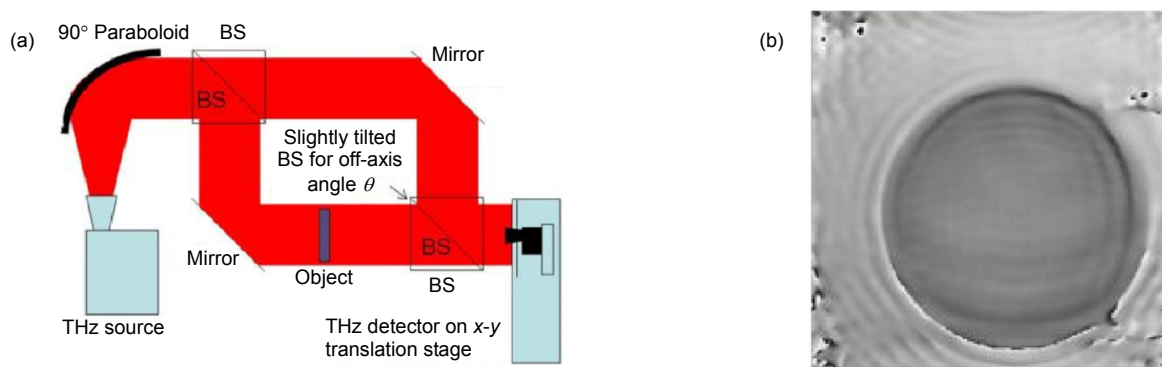


图 3 (a) 马赫-曾德型连续太赫兹波离轴数字全息装置; (b) 解包裹方法重建得到聚甲基戊烯平凸透镜的相位图像^[32]
Fig. 3 (a) The setup of Mach-Zehnder off-axis terahertz digital holography; (b) Unwrapped phase reconstruction of TPX lens^[32]

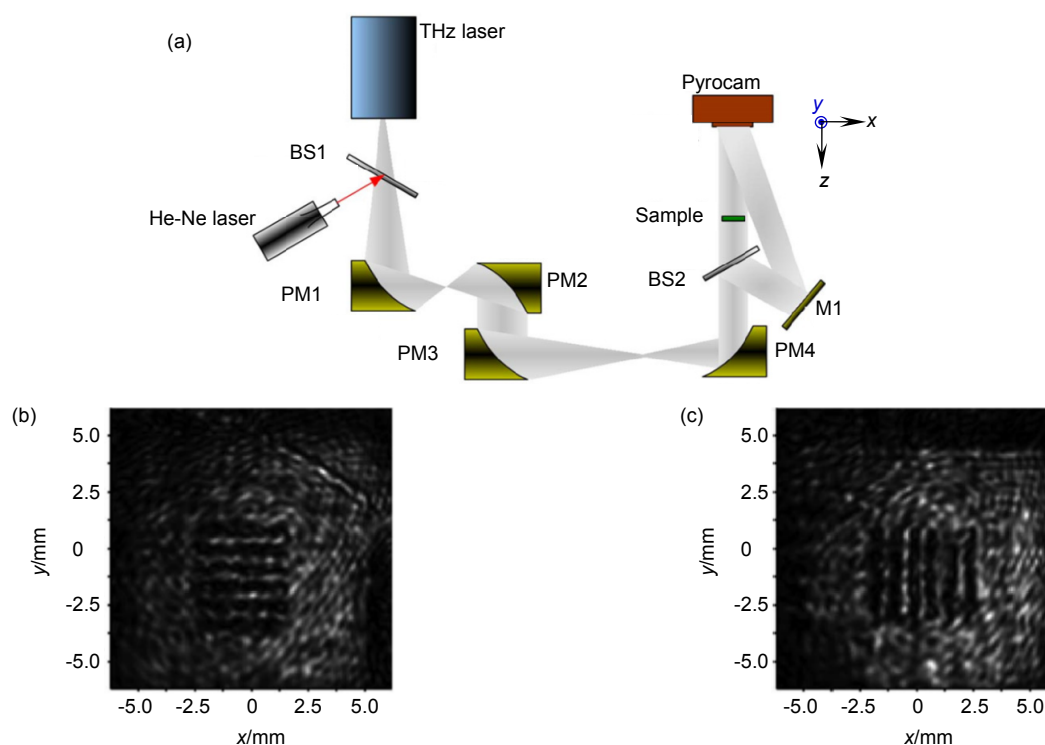


图 4 (a) 基于面阵式热释电探测器的太赫兹波离轴成像系统; (b) 间隔为 0.4 mm 的金属横靶条强度再现结果;
(c) 间隔为 0.4 mm 的金属竖靶条强度再现结果^[33]

Fig. 4 (a) The experimental set-up of the off-axis terahertz digital holography based on pyroelectric array camera;
(b) Reconstructed intensity image of horizontal strips of 0.4 mm resolution chart;
(c) Reconstructed intensity image of vertical strips of 0.4 mm resolution chart^[33]

源和探测器在连续太赫兹全息成像中得到了广泛的应用。此后，也可以使用面阵非扫描记录太赫兹强度图像，使得太赫兹数字全息成像速率和分辨率都有了较大的提高。随后，该课题组还验证了离轴连续太赫兹波数字全息成像中菲涅耳角谱算法、瑞利-索末菲卷积算法和角谱积分等数字全息再现算法的有效性^[34]。考虑到太赫兹波的波长相对较长，研究者在实验中通常选择较短的记录距离来提高分辨率。研究表明，角谱积分法比其他两种再现算法更适合在这种实验条件下来重建图像。该课题组还将记录距离从 39 mm^[33]减小到 27 mm^[35]，相应的成像分辨率进一步提升到 0.245 mm (2.1λ)，高于同一时期太赫兹远场焦平面成像的分辨率。

随着太赫兹波段新型光源的发展，具有小型化、高功率和高频率特点的太赫兹量子级联激光器逐渐商业化，并被用于太赫兹数字全息全场成像系统。从 2014 年起，瑞士联邦材料科学与技术实验室的 Hack 等人基于太赫兹量子级联激光器(3 THz)和非制冷微测热辐射计(像素个数 640×480，像素尺寸 25 μm×25 μm)搭建了如图 5(a)所示的劳埃德镜干涉光路，并开展了一系列太赫兹离轴数字全息成像研究。实验中分

别通过模拟和实验的方式获得金属西门子星和聚丙烯薄板的再现图像，结果如图 5(b)所示，其相应的横向分辨率为 0.280 mm (2.8λ)，相衬成像精度约为 0.5 rad^[23]。日本德岛大学的 Yamagiwa 等人在 2015 年基于相同的太赫兹源以及非制冷微测热辐射计(像素个数 320×240，像素尺寸 23.5 μm×23.5 μm)开展了太赫兹数字全息成像研究^[36]，对塑料和硅片的复杂结构进行成像，系统的纵向精度达到 1.7 μm (0.017λ)。

2.2 反射式连续太赫兹波离轴数字全息成像

作为另一种离轴全息成像方法，反射式连续太赫兹波离轴数字全息也得到了广泛的研究。2005 年，俄罗斯新西伯利亚国立大学的 Cherkassky 等人基于准连续的高功率太赫兹源(波长范围为 120 μm~180 μm)提出了反射式离轴太赫兹波数字全息成像方法^[37]。通过增强型 CCD 和 InAs 红外热录像仪记录纯幅值物体的太赫兹全息图。探测过程中的热转换弛豫时间降低了时间分辨率。因此，该系统的曝光时间和动态范围严重影响了系统的成像空间分辨率和时间分辨率。2008 年，芬兰赫尔辛基理工大学的 Tamminen 等^[38]提出了一种长距离探测的反射式太赫兹波数字全息成像方法。毫米波扩展的矢量网络分析仪通过两个波纹喇叭

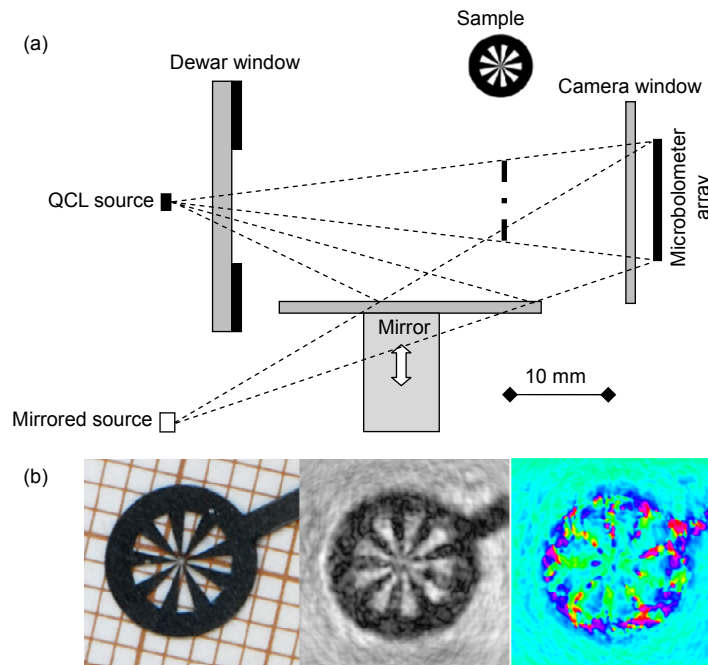


图 5 (a) 基于太赫兹量子级联激光器的太赫兹波离轴成像系统;

(b) 实验结果: 金属刻蚀西门子星照片(左), 再现强度像(中), 再现相位像(右)^[23]

Fig. 5 (a) The experimental set-up of the off-axis terahertz digital holography based on the QCL source; (b) Experimental results: object (left), reconstructed intensity (center) and phase map (right) distributions^[23]

天线生成照明光束和参考光束(310 GHz),两束光的强度比为 9:1。接收端的矢量网络分析仪通过开放式波导天线记录全息图(400 mm×400 mm),距离接收器 1.5 m 处的横向分辨率理论上可以达到 2 mm (~2λ)。

另一方面,太赫兹波单点探测器可以直接获取连续太赫兹波强度信息,然而这种探测器需要对数字全息图进行逐点扫描,难以直接全场记录。2010年,哈尔滨工业大学基于 0.1 THz 和 0.12 THz 的连续太赫兹源实现了双波长解包裹^[39],通过扫描参考光束来逐点记录样品的干涉条纹。2011年,清华大学研究组利用光泵连续太赫兹源(2.52 THz)和高莱点探测器(Golay cell)设计了如图 6(a)所示的四步相移迈克尔逊像面干涉装置^[40],实验结果如图 6(b)所示,获得了塑料薄片的相衬信息,横向分辨能力达到 0.2 mm,轴向测量范围达到 40 μm。

微测热辐射计等太赫兹波面阵探测器的兴起,为直接记录全场全息图在硬件上提供了支持。2015年,瑞士 Zolliker 等人采用光泵连续太赫兹源(FIRL100型,2.52 THz)与非制冷氧化钒微测热辐射计(像素个数 640×480,像素尺寸 25 μm×25 μm)搭建了离轴太赫兹波数字全息成像系统(如图 7 所示)^[24]。2015年,意大利国家光学研究所的 Locatelli 等人搭建了反射式和透射式两种离轴太赫兹数字全息装置^[25],利用商业化的太赫兹量子级联激光器(2.8 THz)和高分辨率的微测热辐射计(像素个数 640×480,像素尺寸 25 μm×25 μm),对黑色聚丙烯掩模板覆盖的金属薄片进行实时成像,得到了再现振幅像。

此外,2013年,中国科学院电子所基于低频太赫兹源(0.3 THz)和点探测方式也对反射式离轴太赫兹全息成像开展了数值仿真研究,通过菲涅耳衍射积分的

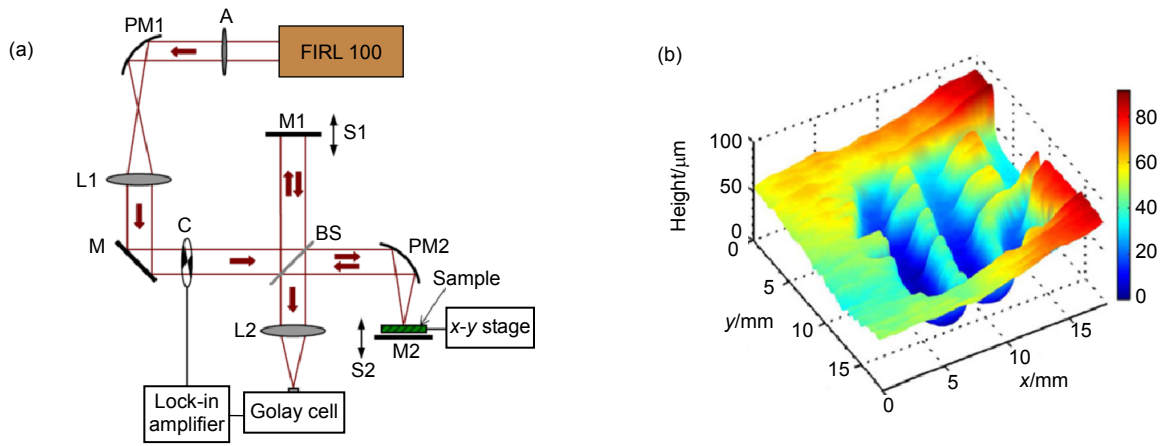


图 6 (a) 实验装置图; (b) 塑料薄片的三维深度形貌^[40]

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the experimental setup; (b) Three-dimensional plot of the relative depth profile of the plastic sheet^[40]

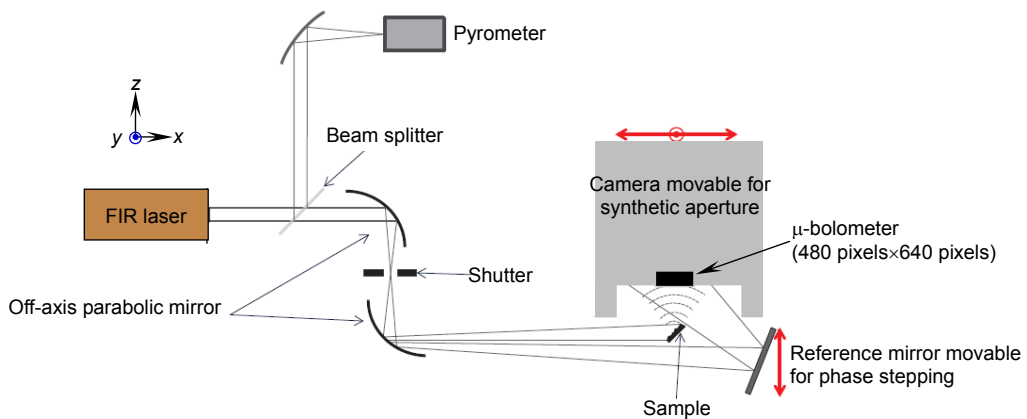


图 7 基于光泵太赫兹源和微测热辐射计的太赫兹数字全息成像光路^[24]

Fig. 7 The schematic layout of the terahertz digital holography based on the FIR laser and micro-bolometer^[24]

卷积算法再现全息图，分析了束腰与分辨率的关系，理论成像分辨率可以达到 $2.36 \text{ mm}^{[41]}$ 。2018年，英国格拉斯哥大学的 Humphreys 等人利用 GPU 计算提高反射式太赫兹全息成像的再现速度，以视频速度(50 Hz)采集样品信息细节，分辨能力达到 $280 \text{ }\mu\text{m}$ (2.4λ)^[42]。2019年，本课题组利用亚像素图像配准^[43]和图像融合算法扩展反射式太赫兹数字全息的视场范围^[44]，对聚四氟乙烯(PTFE)板覆盖的镀金书签进行成像，并与采用三维表面轮廓仪的测量结果进行比较，覆盖部分的相对测量误差为 5.98%，未覆盖部分的相对测量误差为 2.93%。

3 连续太赫兹波同轴数字全息成像

与离轴全息成像结构相比，连续太赫兹波同轴数字全息成像的参考光与物光共路，因此具有所用元器件较少、光路结构紧凑、对太赫兹源的相干性要求较低、可充分利用探测器有限的空间带宽积、成像分辨率较高等优点^[45]。在连续太赫兹波同轴全息的记录过程中(如图 8)^[28]，太赫兹源辐射出的太赫兹波直接照在样品上，物体的衍射光作为被物体调制的物光波 $O(x,y)$ ，未衍射的直透太赫兹波作为参考光波 $R(x,y)$ ，物光波和参考光波共路传播。由太赫兹探测器采集样品的衍射光和透射光干涉产生的全息图。

同轴全息同样通过数值再现获得定量的复振幅分布，主要缺点是存在孪生像的串扰。为了再现出物体

的相位信息，需要利用相位复原算法重建全息图的相位分布。相位复原方法的一般流程为迭代过程，大致可分为 GS 算法、ER 算法和混合输入输出 HIO 算法^[46]。

连续太赫兹波同轴数字全息成像方法最早是由哈尔滨工业大学提出的^[47]。2012年，该研究组基于光泵太赫兹激光器(2.52 THz)和热释电探测器(像素个数 124×124 ，像素间隔 $100 \text{ }\mu\text{m}$ ，像素尺寸 $85 \text{ }\mu\text{m} \times 85 \text{ }\mu\text{m}$ 像素)对镀在特氟龙基底的“HIT”图标进行强度成像，如图 9(a)所示。与太赫兹离轴全息方法相比，同轴数字全息成像系统的记录距离更短，其再现图像的分辨率从 0.4 mm (3.4λ)提高到 0.2 mm (1.7λ)，如图 9(b)所示。随后，他们将太赫兹波同轴数字全息用于遮挡隐蔽目标成像^[48]，获取了多种隐藏物体的幅值再现像，孪生像重叠问题还有待解决，且没有获得相位分布。

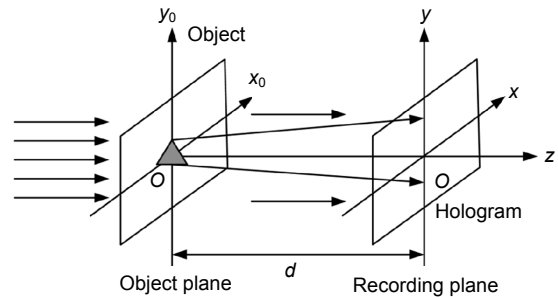


图 8 连续太赫兹波同轴数字全息原理示意图^[28]
Fig. 8 Schematic of recording process of CW terahertz in-line digital holography^[28]

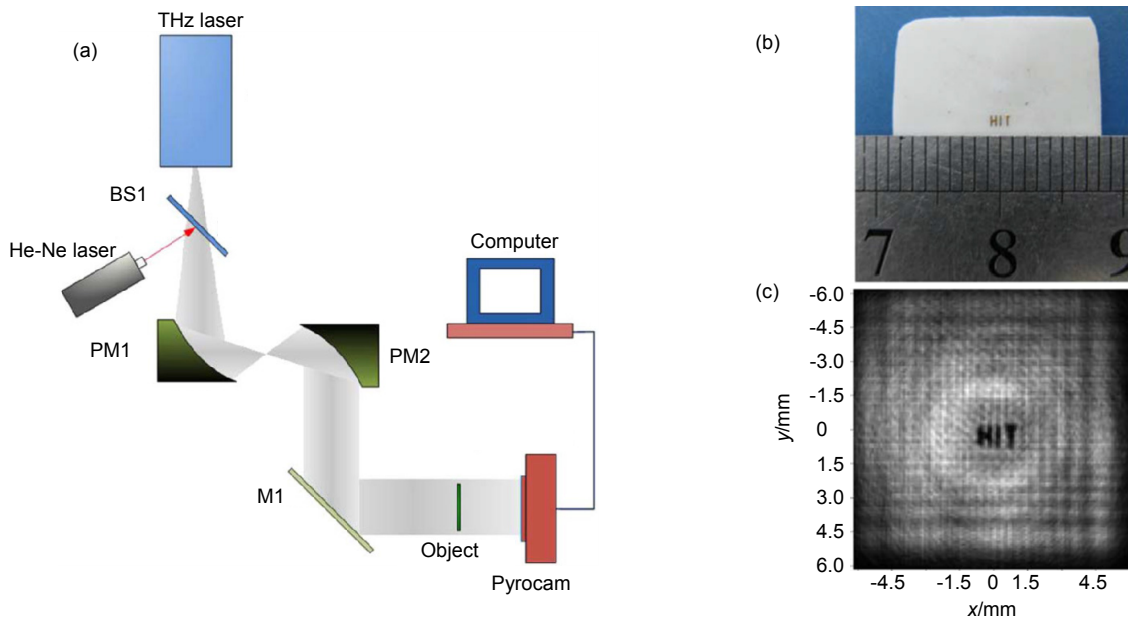


图 9 (a) 连续太赫兹波同轴数字全息成像系统；(b) 字母“TIH”的照片；(c) 图(b)中物体的再现图像^[47]

Fig. 9 (a) The schematic layout of the in-line CW terahertz digital holography;
(b) Imaging result of “HIT”; (c) Reconstructed image of (b)^[47]

针对同轴数字全息孪生像混叠问题,本课题组在2014年提出了适用于太赫兹数字全息的相位复原方法,在记录面与物体平面之间往复迭代去除孪生像^[49],所用相同的太赫兹源(2.52 THz)和热释电探测器(像素个数 124×124,像素尺寸 85 μm×85 μm)搭建了与哈工大类似的同轴数字全息成像系统,实现了蜻蜓后翅标本的连续太赫兹波数字全息成像。考虑到热释电探测器的灵敏度较低,提出多幅累加和归一化方法对全息图进行预处理,抑制了系统太赫兹光斑的不均匀性,提高了全息图的条纹对比度。2015年,哈尔滨工业大学研究了再现像的均方差与记录距离、多幅全息图之间位置间隔的关系,结果表明只有当记录距离小于或等于 2 mm 时,记录距离的选取才会对再现像产生影响^[50]。

为了改进太赫兹波同轴数字全息成像的再现质量和分辨率,本课题组提出了同轴全息图外推迭代算法,扩大了探测器的数值孔径,获得了高分辨率的翅脉结构信息(如图 10(a)所示),揭示了连续太赫兹波同轴数字全息技术在生物医学成像领域应用的可行性。随后,又将外推法用于人肝癌组织切片成像^[51],采用外推法和亚像素微位移法,将理论分辨率从 240 μm (~2λ)提升为 158 μm (1.3λ),从再现的相位再现像中可以观察到人体原发性肝癌组织切片中的高密度纤维化组织(如图 10(b)所示)。由于肝纤维化是肝癌和其他疾病的早期征象,因此连续太赫兹波数字全息技术有望应用于癌症诊断医学成像领域。

后续的研究主要聚焦在改进物平面以及记录面的约束条件,从而提高太赫兹数字全息成像的分辨率以

及成像质量。哈尔滨工业大学研究了物平面的幅值、相位和支持域约束条件及其对迭代算法收敛性的影响,此外还分析了补零扩展、边界复制扩展和切趾操作对再现图像的影响^[52]。2016年,该研究组在物平面上使用支持域约束条件对太赫兹同轴数字全息图进行迭代再现^[53]。随后,他们采用双曝光法进行了仿真和实验研究^[54]。与单次曝光的振幅约束相位复原算法相比,双曝光的相位约束相位复原算法重建的图像对比度增加了 0.146,双曝光的振幅约束相位复原算法重建的图像对比度增加了 0.225。2019年,中国工程物理研究院基于自制的光泵 5.24 THz 激光器以及高分辨微测热辐射计(像素个数 640×512,像素尺寸 17 μm×17 μm)构建了片上连续太赫兹波同轴数字全息系统^[26],记录距离为 3 mm。采用物面约束条件和 L₁ 稀疏约束条件,在连续太赫兹波数字全息成像中实现了亚波长分辨率(40 μm, 0.7λ),如图 11 所示。

4 提高连续太赫兹波数字全息成像性能及其他研究

单幅全息图的外推改进再现图像分辨率的程度是有限的,为此,研究者们提出通过移动探测器合成孔径的方法来提高分辨率,该方法在太赫兹离轴数字全息^[24]和太赫兹同轴数字全息^[55-56]都得到了验证。2015年,瑞士 Zolliker 等^[24]提出了合成孔径太赫兹数字全息成像方法。为了扩大参考光的照明范围,在实验中移动参考光的反射镜来完成相移成像,并通过菱形路径扫描移动平台来移动微测热辐射计记录全息图,拼接所有子全息图完成合成孔径成像。与基于单

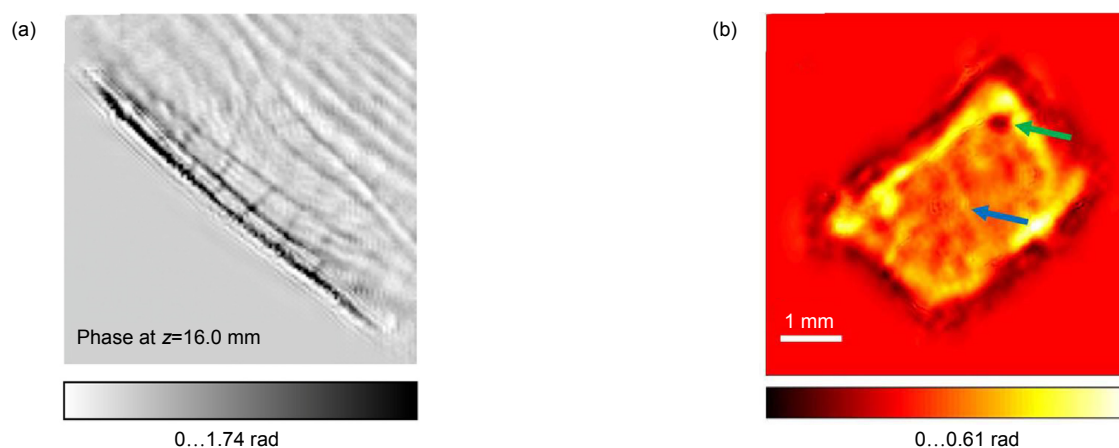


图 10 (a) 高分辨率的翅脉再现相位图; (b) 人体肝癌切片的再现结果^[49-51]

Fig. 10 (a) Reconstructed phase distribution of dragonfly hindwing with extrapolation; (b) Reconstructed phase distribution of human liver cancer tissue^[49-51]

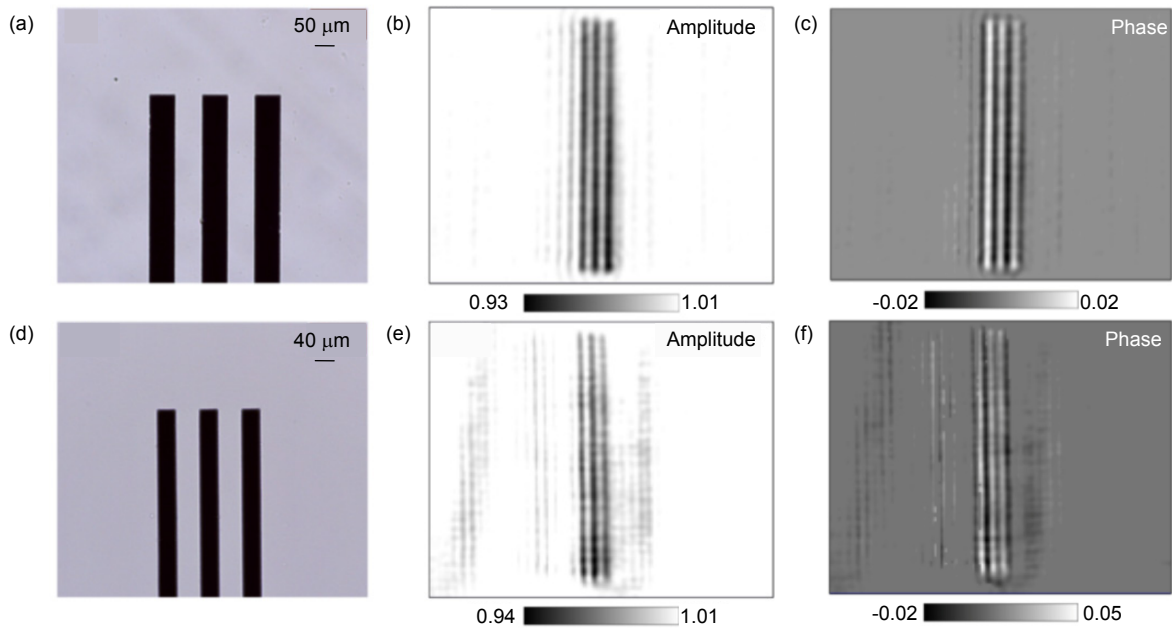


图 11 (a), (d) 分辨率为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $40\ \mu\text{m}$ 物体的光学显微图像; (b), (c) 分辨率为 $50\ \mu\text{m}$ 物体的再现复振幅分布; (e), (f) 分辨率为 $40\ \mu\text{m}$ 物体的再现复振幅分布^[26]

Fig. 11 (a), (d) Optical microscopic images of $50\ \mu\text{m}$ and $40\ \mu\text{m}$ resolution targets; (b), (c) Reconstructed complex amplitude distributions of $50\ \mu\text{m}$ resolution targets; (e), (f) Reconstructed complex amplitude distributions of $40\ \mu\text{m}$ resolution targets^[26]

幅全息图的再现结果相比, 基于合成孔径方法大幅提升了系统成像分辨率(如图 12), 系统的横向分辨率达到 $200\ \mu\text{m}$ ($1.68\ \lambda$), 相位精度达到 $0.4\ \text{rad}$ 的, 对应的轴向分辨率为 $6\ \mu\text{m}$ 。2016 年, 北京工业大学与中国工程物理研究院合作, 基于单色量子级联激光器搭建了太赫兹波同轴数字全息成像系统^[55], 激光器的波长在 $97\ \mu\text{m}$, $97.6\ \mu\text{m}$ 和 $98.9\ \mu\text{m}$ 三处对应功率之比为 4:1:2。利用微测热辐射计(像素个数 320×240 , 像素尺寸 $23.5\ \mu\text{m}\times 23.5\ \mu\text{m}$)将 9 幅子全息图($7.52\ \text{mm}\times 5.64\ \text{mm}$)图像合成为一幅全息图($15.5\ \text{mm}\times 13.6\ \text{mm}$) 获得了 $125\ \mu\text{m}$ (1.28λ)的分辨率, 成功检测到微结构硅臂中的金属污

染物。2017 年, 中国工程物理研究院研发出 $4.3\ \text{THz}$ 的量子级联激光器, 并将其运用于连续太赫兹波同轴全息成像系统中, 利用合成孔径方法将分辨率提高到 $70\ \mu\text{m}$ (1λ)^[27]。

为了进一步提高连续太赫兹波同轴数字全息的成像质量, 研究者对太赫兹波数字全息图像的去噪方法开展了研究。哈尔滨工业大学提出通过马尔可夫链蒙特卡尔采样理论对太赫兹数字全息成像图像进行去噪处理^[57]。2015 年, 他们基于小波变换对太赫兹同轴数字全息再现像的去噪进行了研究。结果证明采用“bior2.2”小波基的同态滤波对太赫兹同轴数字全息图

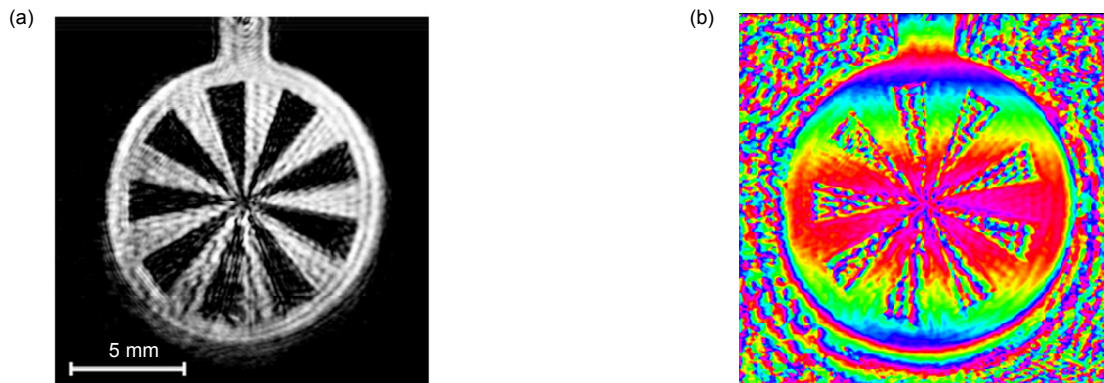


图 12 西门子星样品的(a)强度再现图像和(b)相位再现图像^[26]

Fig. 12 (a) Reconstructed intensity distribution and (b) reconstructed phase distribution^[26]

的去噪效果较好^[58]。

另一方面,在连续太赫兹波同轴数字全息成像中,再现距离是一个重要的参数。再现距离存在误差将无法准确得到物平面上的复振幅分布,严重的离焦情况还会导致观察不到样品的真实形貌。针对这一问题,本课题组研究了连续太赫兹波同轴数字全息自动聚焦算法^[59]。2017年,该课题组基于离轴式和同轴式两种光路,提出了一种基于自聚焦算法的多平面太赫兹波数字全息成像方法^[60]。利用自动聚焦判据曲线处理图像,得到了样品不同位置处(15 mm和41 mm)的聚焦复振幅分布,并合成为三维空间分布,有效地扩展了太赫兹波同轴全息成像的景深。2016年,中国工程物理研究院采用双平面记录法,在不同的探测距离处记录了两组同轴全息图^[61]。他们利用亚像素微位移法对全息图进行精细采样。记录平面的数据冗余度越大,迭代收敛速度越快,再现图像的质量越好,再现图像的分辨率达到 150 μm (1.3 λ)。

为了解决 2π 相位解包裹问题,埃及的 Ibrahim 等人基于 3 THz 的量子级联激光器和非制冷微测热辐射计搭建了反射式太赫兹数字全息光路,采用直接傅里叶以及埃尔米特多项式算法解决了这一问题,并测量了楔形(从 80 μm 到 110 μm)聚合物薄膜的厚度^[62]。

除此之外,基于脉冲太赫兹源也可以实现数字全息成像,首都师范大学于 2008 年基于脉冲式太赫兹源搭建了数字全息成像系统^[63]。该系统中飞秒激光器(800 nm, 100 fs)产生的脉冲光被分为泵浦光和探测光。泵浦光扩束后照在碲化锌晶体上,通过整流效应产生的太赫兹脉冲光束照射样品,携带样品波前信息的太赫兹透射光波照在另一片碲化锌上,相对应的探测光通过偏振调节后也照射到晶体上。太赫兹电场的波前复振幅信息通过偏振态的改变加载到探测光上。携带样品信息的探测光被晶体的左侧表面反射并投影到 CCD 上。通过连续调节太赫兹光与探测光的光程差,测量不同时间点的太赫兹图像,对太赫兹时域信号进行傅里叶变换,获得不同频率成分的太赫兹幅值和相位信息。由于脉冲太赫兹成像可直接获取样品的复振幅信息,因此全息图的记录过程中无需使用参考光。此外,由于太赫兹脉冲是可见光通过晶体的相互作用激发的,该方法还可以利用可见光的光场调控方法间接调控太赫兹脉冲的波前信息,从而丰富太赫兹数字全息成像的应用。国内首都师范大学^[64-70]和俄罗斯圣光机大学的 Petrov 等^[71-73]陆续在脉冲太赫兹波数字全

息成像及其应用方面做了大量的研究工作,取得了重要的进展。

5 结 论

通过世界各个研究组的不断探索研究,连续太赫兹波数字全息成像技术快速发展,取得了显著的成果和关键性的进展。本文总结了离轴透射式和反射式、以及同轴式连续太赫兹波数字全息成像的研究进展,包括数字全息成像的成像原理、光路系统和再现算法。对于离轴数字全息,借助新型的面阵式太赫兹波探测器,全息图记录由逐点扫描发展为全场成像,提高了成像速率,并对提高分辨率、扩大视场范围、遮挡下的形貌检测开展研究。在连续太赫兹波同轴数字全息成像研究中,主要去除孪生像的相位复原算法计算效率和再现精度开展研究。此外,对于太赫兹波数字全息成像分辨率的提高、成像质量的改进以及成像速度的提升也积累了一定的研究成果。这些研究成果为进一步推动太赫兹成像在生物医学、智能制造、无损检测等领域的应用提供了技术储备。

连续太赫兹波数字全息技术的发展还面临着一系列科学技术问题有待解决:1) 针对太赫兹波的传输特性优化衍射传播和再现算法,深入研究太赫兹波在物体边界和内部的传输机理,以及与材料的相互作用机理。2) 提高太赫兹数字全息图的条纹对比度和系统稳定性,目前的太赫兹光泵激光器和量子级联激光器等连续太赫兹源存在光斑质量较差和功率不稳定性等问题,以热释电探测器为表面阵探测器的灵敏度、响应速率和动态范围较差,迫切需要开发和提升太赫兹波段元器件性能,提高连续太赫兹数字全息的成像质量。3) 现有的太赫兹数字全息成像分辨率还不足以完全满足实际成像应用的需求,一方面需要发展大数值孔径的太赫兹波段显微物镜,另一方面可以将其它波段已经充分验证的远场无透镜超分辨率成像方法,如表面等离子激元、照明光场调控等引入到太赫兹波段,提高太赫兹数字全息成像分辨率。4) 现有的连续太赫兹波数字全息只能获得物光波的定量复振幅分布,需要解耦算法才能得到折射率分布,同时可以与衍射层析等三维成像方法相结合,获得样品内部吸收系数和折射率三维分布,获得物体内部更丰富的信息。5) 连续太赫兹数字全息还处于应用探索阶段,需要进一步建立光学参数与样品内部特性的联系,开发其在生物医学、材料表征、无损检测等领域的应用。

参考文献

- [1] Zhang X C, Shkurinov A, Zhang Y. Extreme terahertz science[J]. *Nature Photonics*, 2017, **11**(1): 16–18.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97–105.
- [3] De Cumis U S, Xu J H, Masini L, et al. Terahertz confocal microscopy with a quantum cascade laser source[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(20): 21924–21931.
- [4] Suga M, Sasaki Y, Sasahara T, et al. THz phase-contrast computed tomography based on Mach-Zehnder interferometer using continuous wave source: proof of the concept[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(21): 25389–25402.
- [5] Fischer B M, Hoffmann M, Helm H, et al. Terahertz time-domain spectroscopy and imaging of artificial RNA[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(14): 5205–5215.
- [6] Zhong H, Redo-Sanchez A, Zhang X C. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal-plane imaging system[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(20): 9130–9141.
- [7] Bianco V, Memmolo P, Leo M, et al. Strategies for reducing speckle noise in digital holography[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, **7**(1): 48.
- [8] Nelson J W, Knefelkamp G R, Brolo A G, et al. Digital plasmonic holography[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, **7**(1): 52.
- [9] Tikan A, Bielawski S, Szwej C, et al. Single-shot measurement of phase and amplitude by using a heterodyne time-lens system and ultrafast digital time-holography[J]. *Nature Photonics*, 2018, **12**(4): 228–234.
- [10] Schnars U, Falldorf C, Watson J, et al. *Digital Holography and Wavefront Sensing*[M]. New York: Springer, 2015.
- [11] Asundi A. *Digital Holography for MEMS and Microsystem Metrology*[M]. Chichester/Hoboken: Wiley, 2011.
- [12] Minamide H, Ito H. Frequency-agile terahertz-wave generation and detection using a nonlinear optical conversion, and their applications for imaging[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2010, **11**(7–8): 457–471.
- [13] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, **264**(5158): 553–556.
- [14] Rochat M, Ajili L, Willenberg H, et al. Low-threshold terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(8): 1381–1383.
- [15] Kumar S. Recent progress in terahertz quantum cascade lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(1): 38–47.
- [16] Gribnikov Z S, Bashirov R R, Mitin V V. Negative effective mass mechanism of negative differential drift velocity and terahertz generation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, **7**(4): 630–640.
- [17] Maestrini A, Thomas B, Wang H, et al. Schottky diode-based terahertz frequency multipliers and mixers[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2010, **11**(7–8): 480–495.
- [18] Dobroiu A, Yamashita M, Ohshima Y N, et al. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator[J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(30): 5637–5646.
- [19] Martens S, Gompf B, Dressel M. Characterization of continuous-wave terahertz sources: laser mixing versus backward-wave oscillators[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(29): 5490–5496.
- [20] Baik C W, Son Y M, Kim S I, et al. Microfabricated coupled-cavity backward-wave oscillator for terahertz imaging[C]//*Proceedings of 2008 IEEE International Vacuum Electronics Conference*, 2008: 398–399.
- [21] Wan M, Muniraj I, Malallah R, et al. Sparsity based terahertz reflective off-axis digital holography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10233**: 102330T.
- [22] Valzania L, Feurer T, Zolliker P, et al. Terahertz ptychography[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(3): 543–546.
- [23] Hack E, Zolliker P. Terahertz holography for imaging amplitude and phase objects[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(13): 16079–16086.
- [24] Zolliker P, Hack E. THz holography in reflection using a high resolution microbolometer array[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(9): 10957–10967.
- [25] Locatelli M, Ravaro M, Bartolini S, et al. Real-time terahertz digital holography with a quantum cascade laser[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 13566.
- [26] Li Z Y, Yan Q, Qin Y, et al. Sparsity-based continuous wave terahertz lens-free on-chip holography with sub-wavelength resolution[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(2): 702–713.
- [27] Deng Q H, Li W H, Wang X M, et al. High-resolution terahertz inline digital holography based on quantum cascade laser[J]. *Optical Engineering*, 2017, **56**(11): 113102.
- [28] Huang H C. The research on continuous-wave terahertz in-line digital holographic imaging method[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.
黄昊翀. 连续太赫兹波同轴数字全息成像方法的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
- [29] Goodman J W. *Introduction to Fourier Optics*[M]. 3rd ed. Greenwood Village: Roberts & Company Publishers, 2005.
- [30] Mahon R, Murphy A, Lanigan W. Terahertz holographic image reconstruction and analysis[C]//*Infrared and Millimeter Waves, Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics*, 2004: 749–750.
- [31] Mahon R J, Murphy J A, Lanigan W. Digital holography at millimetre wavelengths[J]. *Optics Communications*, 2006, **260**(2): 469–473.
- [32] Heimbeck M S, Kim M K, Gregory D A, et al. Terahertz digital holography using angular spectrum and dual wavelength reconstruction methods[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(10): 9192–9200.
- [33] Ding S H, Li Q, Li Y D, et al. Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(11): 1993–1995.
- [34] Li Q, Li Y D, Ding S H, et al. Terahertz computed tomography using a continuous-wave gas laser[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, **33**(5): 548–558.
- [35] Li Q, Ding S H, Li Y D, et al. Experimental research on resolution improvement in CW THz digital holography[J]. *Applied Physics B*, 2012, **107**: 103–110.
- [36] Yamagiwa M, Ogawa T, Minamikawa T, et al. Real-time amplitude and phase imaging of optically opaque objects by combining full-field off-axis terahertz digital holography with angular spectrum reconstruction[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2018, **39**(6): 561–572.
- [37] Cherkassky V S, Knyazev B A, Kubarev V V, et al. Imaging techniques for a high-power THz free electron laser[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2005, **543**(1): 102–109.
- [38] Tamminen A, Ala-Laurinaho J, Raisanen A V. Indirect holographic imaging at 310 GHz[C]//*Proceedings of 2008 European Radar Conference*, 2008: 168–171.

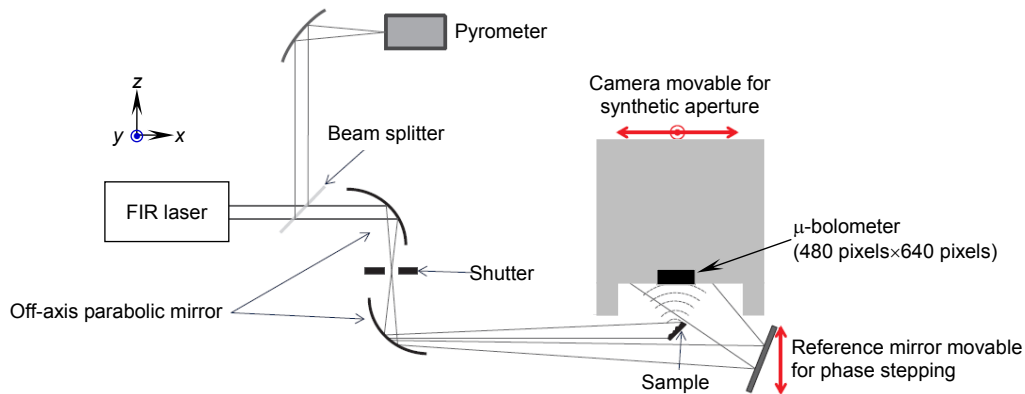
- [39] Wang X K, Hou L, Zhang Y. Continuous-wave terahertz interferometry with multiwavelength phase unwrapping[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(27): 5095–5102.
- [40] Wang Y X, Zhao Z R, Chen Z Q, et al. Continuous-wave terahertz phase imaging using a far-infrared laser interferometer[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(35): 6452–6460.
- [41] Gao X, Li C, Fang G Y. Study of image reconstruction for terahertz indirect holography with quasi-optics receiver[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, **30**(6): 1291–1296.
- [42] Humphreys M, Grant J P, Escorcía-Carranza I, et al. Video-rate terahertz digital holographic imaging system[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(20): 25805–25813.
- [43] Guizar-Sicairos M, Thurman S T, Fienup J R. Efficient subpixel image registration algorithms[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(2): 156–158.
- [44] Wang D Y, Zhao Y L, Rong L, et al. Expanding the field-of-view and profile measurement of covered objects in continuous-wave terahertz reflective digital holography[J]. *Optical Engineering*, 2019, **58**(2): 023111.
- [45] Wang D Y, Huang H C, Zhou X, et al. Phase-contrast imaging by the continuous-wave terahertz line digital holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(8): 232–237.
王大勇, 黄昊翀, 周逊, 等. 连续太赫兹波同轴数字全息相衬成像[J]. *中国激光*, 2014, **41**(8): 232–237.
- [46] Fienup J R. Reconstruction of an object from the modulus of its Fourier transform[J]. *Optics Letters*, 1978, **3**(1): 27–29.
- [47] Xue K, Li Q, Li Y D, et al. Continuous-wave terahertz in-line digital holography[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(15): 3228–3230.
- [48] Li Q, Xue K, Li Y D, et al. Experimental research on terahertz Gabor inline digital holography of concealed objects[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(29): 7052–7058.
- [49] Rong L, Latychevskaia T, Wang D Y, et al. Terahertz in-line digital holography of dragonfly hindwing: amplitude and phase reconstruction at enhanced resolution by extrapolation[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(14): 17236–17245.
- [50] Hu J Q, Li Q, Yang Y F. Simulation research on continuous Terahertz inline digital holography imaging based on phase retrieval algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(1): 92–98.
胡佳琦, 李琦, 杨永发. 基于相位恢复法的连续太赫兹同轴数字全息成像仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, **52**(1): 92–98.
- [51] Rong L, Latychevskaia T, Chen C H, et al. Terahertz in-line digital holography of human hepatocellular carcinoma tissue[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 8445.
- [52] Hu J Q, Li Q, Cui S S. Research on object-plane constraints and hologram expansion in phase retrieval algorithms for continuous-wave terahertz inline digital holography reconstruction[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(30): 7112–7119.
- [53] Hu J Q, Li Q, Zhou Y. Support-domain constrained phase retrieval algorithms in terahertz in-line digital holography reconstruction of a nonisolated amplitude object[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(2): 379–386.
- [54] Hu J Q, Li Q, Chen G H. Reconstruction of double-exposed terahertz hologram of non-isolated object[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, **37**(4): 328–339.
- [55] Huang H C, Rong L, Wang D Y, et al. Synthetic aperture in terahertz in-line digital holography for resolution enhancement[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(3): A43–A48.
- [56] Wan M, Li W H, Wang D Y, et al. Digital holography of continuous terahertz wave synthetic aperture[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2017, **15**(3): 358–363.
万敏, 黎维华, 王大勇, 等. 连续太赫兹波合成孔径数字全息成像方法[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2017, **15**(3): 358–363.
- [57] Chen G H, Li Q. Markov chain Monte Carlo sampling based terahertz holography image denoising[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(14): 4345–4351.
- [58] Cui S S, Li Q. De-noising research on terahertz digital holography based on wavelet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(6): 1836–1840.
崔珊珊, 李琦. 基于小波变换的太赫兹数字全息再现像去噪研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(6): 1836–1840.
- [59] Huang H C, Wang D Y, Rong L, et al. Application of autofocusing methods in continuous-wave terahertz in-line digital holography[J]. *Optics Communications*, 2015, **346**: 93–98.
- [60] Huang H C, Wang D Y, Li W H, et al. Continuous-wave terahertz multi-plane in-line digital holography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, **94**: 76–81.
- [61] Li Z Y, Li L, Qin Y, et al. Resolution and quality enhancement in terahertz in-line holography by sub-pixel sampling with double-distance reconstruction[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(18): 21134–21146.
- [62] Ibrahim D G A. Steep large film thickness measurement with off-axis terahertz digital holography reconstructed by a direct Fourier and Hermite polynomial[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(10): 2533–2538.
- [63] Huang H C, Wang D Y, Rong L, et al. Continuous-wave off-axis and in-line terahertz digital holography with phase unwrapping and phase autofocusing[J]. *Optics Communications*, 2018, **426**: 612–622.
- [64] Zhang Y, Zhou W, Wang X, et al. Terahertz digital holography[J]. *Strain*, 2008, **44**(5): 380–385.
- [65] Wang X K, Cui Y, Hu D, et al. Terahertz quasi-near-field real-time imaging[J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(24): 4683–4687.
- [66] Wang X K, Cui Y, Sun W F, et al. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. *Optics Communications*, 2010, **283**(23): 4626–4632.
- [67] Wang X K, Cui Y, Sun W F, et al. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, **27**(11): 2387–2393.
- [68] Guo L H, Wang X K, Zhang Y. Terahertz digital holographic imaging of biological tissues[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(3): 611–615.
郭力菡, 王新柯, 张岩. 生物组织的太赫兹数字全息成像[J]. *光学精密工程*, 2017, **25**(3): 611–615.
- [69] Zheng X H, Wang X K, Sun W F, et al. Developments and applications of the Terahertz digital holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2): 24–34.
郑显华, 王新柯, 孙文峰, 等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. *中国激光*, 2014, **41**(2): 24–34.
- [70] Shi J, Wang X K, Zheng X H, et al. Recent advances in terahertz digital holography[J]. *Chinese Optics*, 2017, **10**(1): 131–147.
石敬, 王新柯, 郑显华, 等. 太赫兹数字全息术的研究进展[J]. *中国光学*, 2017, **10**(1): 131–147.
- [71] Petrov N V, Kulya M S, Tsyarkin A N, et al. Application of terahertz pulse time-domain holography for phase imaging[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, **6**(3): 464–472.
- [72] Balbekin N S, Kulya M S, Petrov N V. Terahertz pulse time-domain holography in dispersive media[J]. *Computer Optics*, 2017, **41**(3): 348–355.
- [73] Kulya M, Petrov N V, Tsyarkin A, et al. Hyperspectral data denoising for terahertz pulse time-domain holography[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(13): 18456–18476.

Phase contrast imaging based on continuous-wave terahertz digital holography

Shi Xiaoyu¹, Wang Dayong^{1,2*}, Rong Lu^{1,2}, Zhao Jie¹, Wang Yunxin^{1,2}

¹College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²Institute of Information Photonics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China



The experimental set-up of the off-axis terahertz digital holography

Overview: Terahertz (THz) radiation is characterized with low-energy, high-penetration, and water-absorption, which could provide internal structure of objects and comprehensive biological information by THz phase contrast imaging. Due to this unique feature, THz radiation has been applied in biomedical imaging, non-destructive testing, and other fields. As an important part of THz imaging technology, continuous-wave THz digital holography (TDH) by recording the complex amplitude in the hologram and numerically retrieving the corresponding phase-shift properties of object, is qualified as a non-invasive and whole-field phase contrast imaging method. With the development of continuous-wave THz sources, detectors, and imaging components, the continuous-wave TDH imaging technology is well developed.

In this paper, the development and status of off-axis and in-line TDH are reviewed, including the recording and reconstruction theory, experimental setup, and reconstruction algorithms. For the off-axis TDH, the reflective and transmitted TDH has all been introduced. The firstly off-axis TDH configuration is attempted using a 100 GHz Gunn diode oscillator and Schottky-barrier diode. Complete “full-field” phase imaging with higher lateral resolution is achieved using an optically pumped FIR laser and a pyroelectric array detector, which is then widely applied in continuous-wave TDH configuration later. And the effectiveness of Rayleigh-Sommerfeld convolution algorithm, Fresnel angular spectrum algorithm, and angular spectrum integral are evaluated for off-axis TDH. Miniaturized THz quantum cascade laser with high power and high frequency are also used in TDH full-field imaging system to improve the imaging resolution. For the in-line TDH, the scattered beam by sample interferes with the unscattered part to form the in-line hologram, which is quite suitable for isolated objects imaging. Compared with off-axis TDH, the recording geometry of in-line TDH is more compact, and reconstruction resolution is higher. The twin image is one of the most important problems for in-line TDH, which is solved by iterations with proper constraints in these two planes and phase retrieval algorithm. Constraints on the object plane and extrapolation algorithms for iterative reconstruction of in-line TDH are studied to achieve higher resolution. In addition, different methods are presented to improve the imaging quality of continuous-wave TDH, such as synthetic aperture, denoising method, auto-focusing algorithms, and multi-plane imaging.

In conclusion, the paper summarized the progress of continuous-wave THz digital holography, including the influence of existing THz imaging components and the reconstruction algorithms on resolution and fidelity of imaging are analyzed. And the future development trend of continuous-wave TDH is discussed in the end of the paper.

Citation: Shi X Y, Wang D Y, Rong L, *et al.* Phase contrast imaging based on continuous-wave terahertz digital holography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(5): 190543

Supported by National Natural Science Foundation of China (61675010) and Beijing Nova Program (2018072)

* E-mail: wdyong@bjut.edu.cn