

太赫兹数字全息术的研究进展

石敬, 王新柯*, 郑显华, 贺敬文, 王森, 谢振威, 崔焱,
叶佳声, 孙文峰, 冯胜飞, 韩鹏, 张岩
(首都师范大学物理系, 北京 100048)

摘要:随着太赫兹成像技术的不断成熟,其空间分辨率和系统信噪比逐渐提高,成像速度逐渐加快,光学信息获取能力逐渐变强,人们对太赫兹成像在基础研究和工业应用的开发也逐渐深入。本文综述了近年来科研人员利用太赫兹数字全息成像系统进行的部分研究工作,包括对平板太赫兹元件的性能表征、对光控太赫兹元件的功能验证、对衍射太赫兹场中的纵向分量进行观测、以及对金属亚波长器件的太赫兹表面波进行分析。这些工作的完成对于太赫兹集成系统的研究和太赫兹成像技术的应用都具有积极的推动作用。

关键词:太赫兹;数字全息;光控元件;表面波

中图分类号: O434.3; O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20171001.0131

Recent advances in terahertz digital holography

SHI Jing, WANG Xin-ke*, ZHENG Xian-hua, HE Jing-wen, WANG Sen, XIE Zhen-wei,
CUI Ye, YE Jia-sheng, SUN Wen-feng, FENG Sheng-fei, HAN Peng, ZHANG Yan
(Capital Normal University, Department of Physics, Beijing 100048, China)
* Corresponding author, E-mail: wxk82721@cnu.edu.cn

Abstract: With the maturation of terahertz (THz) imaging technology, the spatial resolution, signal-to-noise ratio, imaging speed and ability acquiring information of the imaging system are gradually enhanced. Researchers have paid more attention to THz imaging applications in fundamental researches and industrial ex-

收稿日期:2016-09-12;修订日期:2016-10-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(No. 2013CBA01702);国家自然科学基金资助项目(No. 11474206, No. 91233202, No. 11374216, No. 11404224);教育部新世纪优秀人才资助项目(No. NCET-12-0607);北京市教委科技面上项目(No. KM201310028005);教育部博士点基金资助项目(No. 20121108120009);北京市教委青年拔尖人才资助项目(No. CIT&TCD201504080)

Supported by National Program on Key Basic Research Projects of China(No. 2013CBA01702); National Natural Science Foundation of China(No. 11474206, No. 91233202, No. 11374216, No. 11404224); Program for New Century Excellent Talents in University, Ministry of Education of China(No. NCET-12-0607); Scientific Research Project of Beijing Education Commission(No. KM201310028005); Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(No. 20121108120009); Scientific Research Base Development Program of the Beijing Municipal Commission of Education and the Beijing youth top-notch talent training plan (No. CIT&TCD201504080)

ploitation. In this paper, several recent studies of THz digital holography are reviewed, including performance demonstration of THz planar elements, function validation of optical tunable THz elements, observation of the longitudinal component in diffraction THz fields and analysis of THz surface waves on the metallic sub-wavelength devices. These research works are very valuable for the development of THz integration systems and THz imaging technology.

Key words: terahertz; digital holography; optical tunable elements; surface wave

1 引 言

太赫兹波(简称 THz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$)是指频率在 $0.1 \sim 10 \text{ THz}$ 范围内的远红外电磁辐射,由于其具有高透射、宽光谱、低光子能量、与极性物质反应剧烈等诸多特性,使得太赫兹技术在基础研究和工业开发方面存在着巨大的应用潜力。伴随着飞秒激光技术、电子技术和半导体材料的相关研究不断发展,高强度太赫兹源、高灵敏度太赫兹探测器、以及太赫兹波段的功能器件相继问世,使得太赫兹检测系统日趋成熟,实用性逐渐提高。由于太赫兹技术具有测量精度高、光致损伤小、光谱信息丰富等优势,已经成为人们所熟知的重要光学测量手段。

作为太赫兹技术重要组成部分之一,太赫兹成像技术最早是在太赫兹时域光谱系统的基础上发展起来的。早期的太赫兹成像系统将太赫兹辐射聚焦于样品表面,并不断移动样品位置,测量从样品透射或反射的太赫兹信号组成二维光学信息。1995年, B. B. Hu 等人利用透射式太赫兹逐点扫描成像技术对芯片内部结构和树叶含水量进行了观测^[1], 1997年, D. M. Mittleman 等人利用反射式太赫兹扫描成像技术对磁盘内部结构进行了层析测量^[2], 从此太赫兹成像技术引起了人们的广泛关注并得到了迅速发展^[3-5]。由于传统的太赫兹成像采用逐点扫描的测量方式,存在采样率低、实验耗时长等问题,限制了太赫兹成像的应用发展。1996年, Q. Wu 等人提出了利用扩展太赫兹光源对物体进行面阵测量的方式,很大程度上缩短了实验时间并提高了成像精度^[6], 由于此技术采用 CCD 摄像头提取太赫兹二维场信息,通常称此技术为太赫兹数字全息术。太赫兹数字全息术的提出对于太赫兹成像的发展具有重要意义,

多个国家的研究团队都对此技术进行了改进和应用研究^[7-9]。2003年, T. Feurer 等人利用此技术观测了 LiTaO_3 晶体中声子的传播与干涉过程^[10]。2006年, H. Zhong 等人利用反射太赫兹数字全息术对物质的化学性质进行了成像测量,实现了五种物质的成分识别^[11]。2008年, T. Yasui 等人通过改进线扫描太赫兹数字全息系统,实现了每秒钟 23 200 像素的成像速率^[12]。2011年, F. Blanchard 等人利用 $20 \mu\text{m}$ 厚的 LiNbO_3 作为探测晶体,实现了分辨率可以达到 $14 \mu\text{m}$ 的太赫兹面阵成像^[13]。目前,随着太赫兹成像系统的逐渐成熟,实用性不断增强,适用范围更加广阔,已经呈现了明显的市场需求和产业化进程。

2007年,本科研发团队开始从事关于太赫兹数字全息技术的研发,至今已经开发出了国内唯一一套具有高分辨率、高信噪比和偏振测量功能的太赫兹数字全息成像系统,可以实现对太赫兹场波前信息的全部获取,包括振幅、相位、偏振和频域光谱等。本文综述了近年来本团队在太赫兹数字全息技术方面的部分研究成果,包括利用太赫兹成像系统对太赫兹波段平板元件衍射性能进行表征、对光控太赫兹元件进行功能验证、对自由空间太赫兹衍射场中的纵向偏振分量进行重建、以及对金属等离子体器件的太赫兹表面波传输过程进行观测。同时,本文也对太赫兹数字全息技术的未来发展进行了评论和展望。

2 太赫兹数字全息成像系统

图 1 展示了由本团队搭建的太赫兹数字全息成像系统。本系统采用钛宝石飞秒激光放大器作为光源,激光脉冲中心波长为 800 nm , 重复频率为 1 kHz , 脉宽为 100 fs , 输出功率为 900 mW , 光斑直径约为 8 mm 。激光被分为 890 mW 的泵浦

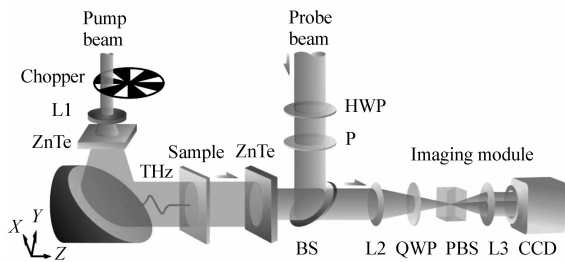


图1 太赫兹数字全息成像系统

Fig. 1 Terahertz (THz) digital holographic imaging system

光和 10 mW 的探测光,分别用于产生和探测太赫兹脉冲。泵浦光首先通过凹透镜(L1)扩束并照射到 $<110>$ ZnTe 晶体上,在 ZnTe 晶体内通过光整流效应产生太赫兹辐射。利用金属抛物面反射镜(PM)对太赫兹光束进行准直,其直径约为 30 mm。扩束的太赫兹波透射过样品,携带样品信息后照射探测晶体 $<110>$ ZnTe 进行相干成像测量。探测光通过二分之一波片(HWP)和偏振片(P)来调节其偏振态,利用 50/50 的非偏振分束器(BS)将探测光反射到探测晶体上。在探测晶体内,太赫兹电场会调制探测晶体的折射率椭圆,进而改变探测光的偏振态,由此将太赫兹电场的波前复振幅信息加载到探测光上。携带太赫兹信息的探测光由晶体的左侧表面反射,利用系统的成像模块对太赫兹信息进行提取。探测光的图像由透镜组(L2和L3)投影到CCD摄像头上,并利用四分之一波片(QWP)和渥拉斯顿棱镜(PBS)将探测光分解为水平和垂直偏振分量,CCD与机械斩波器(Chopper)进行同步控制,利用动态相减技术^[7]和差分探测技术^[14]对太赫兹图像进行提取。由于探测晶体的尺寸限制,系统的成像尺寸约为直径 10 mm 的圆斑区域,在实验中通过连续调节太赫兹光束与探测光束的光程差,可以对不同时间点的太赫兹图像进行测量,并通过在每个像素上的太赫兹时域信号进行傅立叶变换,可以准确地得到不同频率成分的太赫兹复振幅分布。

本成像系统的特点在于:(1)可以一次性的采集太赫兹时域电场二维分布^[15],具有较高的空间采样率,系统像素数目为 300 pixel \times 300 pixel,单个 pixel 尺寸为 32 μm ;(2)通过引入了准近场

探测技术,可以使样品紧贴探测晶体放置,减小了太赫兹光波的衍射影响,达到 100 μm 的空间分辨率^[15];(3)通过将差分探测技术引入太赫兹成像系统,可以有效地提高成像系统的信噪比,单个像素的信噪比可以达到 20 dB^[14];(4)通过调整探测光的偏振态,可以实现不同太赫兹偏振分量的测量,更全面地获取光学信息^[16]。利用此系统的诸多特性,本团队完成了一系列涉及不同太赫兹研究领域的成像工作,从多方面验证了本系统的实用性。

3 太赫兹数字全息术的应用

3.1 太赫兹平板元件的性能表征

当前,超材料(Meta-material)器件的研究已经成为了现代光学发展的重要分支之一,利用微纳尺度金属结构单元组成的人工材料可以对电磁波实现多种特殊的衍射特性,例如超常透射、负折射率、选择性滤波等功能^[17-19]。自 2011 年,哈佛大学的 Capasso 教授团队首次提出了超表面(Meta-surface)的概念,利用微纳金属结构的二次电磁辐射来对透射电磁场进行振幅相位调控,为超材料家族的发展提供了新的动力^[20]。目前已经有许多国内外的科研团队对超表面器件进行研究,波段从微波一直覆盖到可见光^[21-23]。2013 年,本团队首次将超表面理念引入到太赫兹波段,设计了若干以 V 型天线、棒型天线为结构单元的超表面太赫兹器件,并利用太赫兹数字全息成像系统对其衍射性能进行了验证^[24]。图 2 展示了利用 V 型天线结构所设计的太赫兹涡旋相位板以及测试结果^[25]。此结构所对应的中心频率为 0.75 THz,如图 2(a)所示,通过改变 V 型天线的开口角度 θ 及天线单臂长度 h 可对透射的正交极化太赫兹分量进行不同程度的相位调制,同时保持振幅不变。图 2(b)展示了所设计的 8 个天线单元,前 4 个天线的 θ 取值为 130° 、 120° 、 100° 、 60° , h 取值为 78 μm 、82 μm 、90 μm 、150 μm ,后 4 个天线为其镜像对称结构,相邻天线单元对太赫兹场的相位调制相差 $\pi/4$ 。图 2(c)为利用所设计的天线单元组成的太赫兹涡旋相位板(VPP),天线结构加工在 100 nm 厚的金膜上,样品基底为

500 μm 的高阻硅片,天线结构随着方位角相应变化,而在径向方向上保持不变。将相位板放入太赫兹成像系统进行表征,图 2(d)展示了拓扑荷数 $l=1$ 的透射太赫兹涡旋光束振幅分布,图像呈现中空分布特点,这是由于太赫兹光场中心部位存在相位奇点,光场相干相消导致中心强度为零。图 2(e)展示了相应太赫兹光场相位分布,可以看出其呈现了所预设的涡旋变化,随着方位角的增大,相位从 $-\pi$ 到 π 线性增加。为了进一步验证此天线结构的实用性,本团队又设计了拓扑荷数 $l=2$ 和 $l=3$ 的涡旋相位板,图 2(f)和(g)展示了所测量的透射太赫兹光场相位分布,可以看出相位变化分别为 4π 和 6π ,都达到了预期结果。为了研究涡旋光束在远场的衍射特性,利用一个硅透镜将太赫兹涡旋光束聚焦,并在焦点附近对其

进行 Z 扫描测量,实验系统如图 2(h)所示。图 2(i)展示了在距离焦点位置 -10 mm 、 0 mm 、 10 mm 处的太赫兹电场强度分布,汇聚的太赫兹波由于中心位置的相位奇点呈现出了典型的面包圈形状,太赫兹焦点光环的半径大约为 1.1 mm 。图 2(j)展示了在相应位置上太赫兹电场的相位分布,可以看出在衍射过程中其相位呈现出螺旋变化,且随着传播距离的增大呈现顺时针方向旋转,同时在通过焦点后,相位的旋进方向发生了反转。为了描述这些变化,利用 Laguerre-Gaussian 模型进行了模拟,理论结果如图 2(k)所示,可以看出其完全重现了所测量得到的现象。本工作的完成对于太赫兹特殊光束的研究、太赫兹信息传输以及太赫兹平板光学元件的研发都具有积极的参考价值。

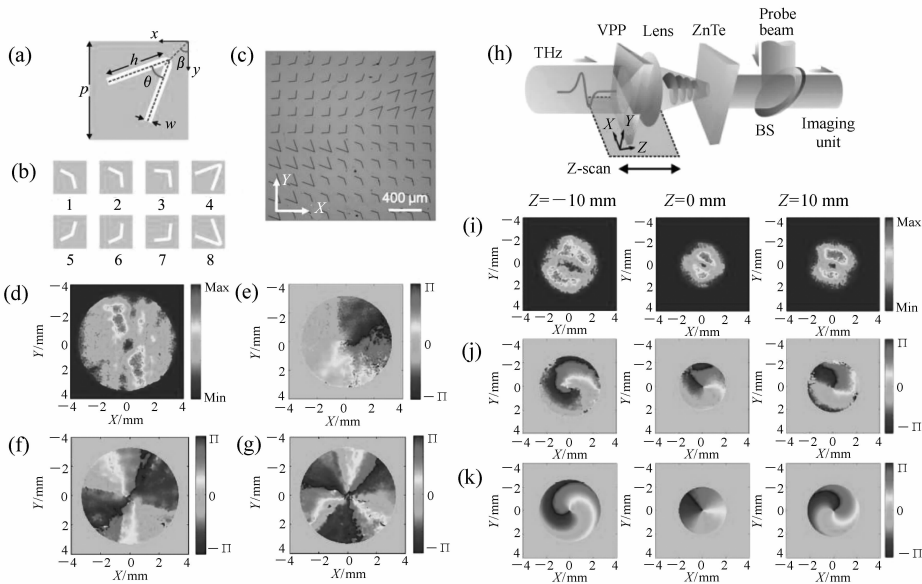


图 2 太赫兹涡旋相位板及成像结果。(a)V 型天线结构单元设计图;(b)8 种不同参数 V 型天线,相邻天线的相位调制相差 $\pi/4$;(c)太赫兹涡旋相位板样品图;(d)拓扑荷数 $l=1$ 的太赫兹涡旋光束振幅分布;(e)相应太赫兹场相位分布;(f)和(g)为拓扑荷数 $l=2$ 和 $l=3$ 的太赫兹场相位分布;(h)测量太赫兹涡旋光束聚焦过程的实验系统;(i)和(j)为实验测得的距离焦点位置 -10 mm 、 0 mm 、 10 mm 处太赫兹光束振幅和相位分布;(k)为利用 Laguerre-Gaussian 模型所模拟的太赫兹场相位分布

Fig. 2 THz vortex phase plate and imaging results. (a)Schematics of a V-shaped antenna phase modulation unit. (b) Eight kinds of V-shaped antenna structures corresponding to phase shifts with a $\pi/4$ interval. (c)Photography of the designed vortex phase plate. (d)Measured amplitude distribution of the generated THz vortex beam with $l=1$. (e) Corresponding phase distribution. (f) and (g) are the measured phase distributions of the THz vortex fields with $l=2$ and $l=3$. (h)Experimental setup for observing the focusing process of the THz vortex beam. (i) and (j) are the amplitude and phase maps of the measured THz vortex beam with $Z = -10\text{ mm}$, 0 mm , and 10 mm . (k)The simulated phase distributions by using the Laguerre-Gaussian module

偏振是电磁波的基本自由度之一,在无线通信、3D显示、波谱分析等诸多领域都具有重要应用。然而,在目前的光学技术中,直接分辨光波的偏振态,并进一步操纵具有不同偏振态的光子仍然存在一定的难度。2015年,本团队在之前工作的基础上,利用棒形天线设计了对不同偏振入射光具有空间分离聚焦和成像功能的太赫兹平板透镜^[26]。图3(a)展示了器件的实物图及结构单元,天线的长宽分别为150 μm 和50 μm ,天线的倾角 $\varphi(x, y)$ 决定着对出射电磁波的相位调制程度。当左旋圆偏振(LCP)或右旋圆偏振(RCP)光入射器件时,天线结构会激发正交极化光场,并在出射光波上加载 Pancharatnam-Berry 相移 $\Phi(x, y) = \pm 2\varphi(x, y)$,进而对太赫兹光子的波矢位移产生调制,实现对不同偏振入射光的空间分离,其中 \pm 由入射光和出射光的偏振态决定。图3(b)展示了此平板透镜的功能示意图,当入射LCP光时,透镜会激发RCP光并聚焦到焦平面的左侧;

当入射RCP光时,透镜会激发LCP光并聚焦到焦平面的右侧。实验中,透镜的焦距被设定为4 mm, LCP和RCP光的焦点分离距离为2.2 mm,透镜的中心频率为0.75 THz。将样品放入太赫兹成像系统进行测试,图3(c)~3(e)展示了在焦平面处0.75 THz分量的强度分布图,图中箭头对应着入射太赫兹波的偏振方向,分别为RCP、LCP和水平线偏振。可以看出,对于RCP太赫兹入射场,其焦斑向右侧偏移;对于LCP太赫兹入射场,其焦斑向左侧偏移;对于线偏振太赫兹入射场,由于其可以看作LCP和RCP太赫兹分量的线性叠加,因此在焦平面上出现两个焦点,两焦点偏离量为2.2 mm。图3(f)~3(h)展示了相应的太赫兹出射光束在X-Z平面上的聚焦过程,同样呈现了与图3(c)~(3e)一致的特点。此透镜的偏振选择性成像功能也被验证,成像测试样品为3个镂空金属字母图案“C”、“N”、“U”,每个图案的尺寸为4 \times 5 mm²,如图3(i)所示。图3(j)~3(l)

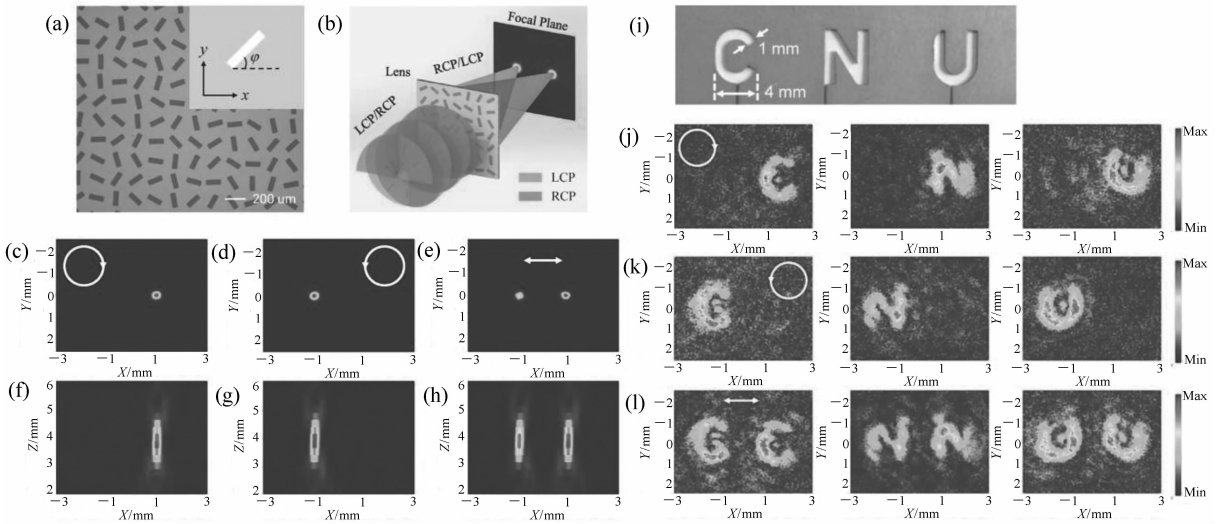


图3 基于超表面太赫兹平板透镜的偏振选择性聚焦与成像。(a)太赫兹平板透镜实物图,插图展示了棒形天线的结构单元;(b)偏振选择性聚焦示意图;(c)~(e)对应右旋圆偏振(RCP)、左旋圆偏振(LCP)和水平线偏振太赫兹入射场,在焦平面上出射0.75 THz太赫兹光场强度分布;(f)~(h)相应的出射太赫兹光场在X-Z平面上的聚焦效果;(i)成像测试样品;(j)~(l)对应RCP、LCP和水平线偏振太赫兹入射场的0.75 THz成像结果

Fig. 3 Polarization-selected focusing and imaging based on a metasurface THz planar lens. (a) Photograph of the THz planar lens. The inset shows the schematics of a bar antenna unit. (b) Procedure of spin-selected focusing. (c) - (e) Intensity images of the 0.75 THz component on the focal plane for a right circularly polarized(RCP), left circularly polarized(LCP), and horizontally linearly polarized THz incident fields. (f) - (h) Corresponding longitudinal focusing processes of transmitted THz fields on the X-Z plane. (i) Imaging test sample. (j) - (l) Imaging results of 0.75 THz components for RCP, LCP and horizontally linearly polarized THz incident fields

将金属波带片置于控制光路中,利用焦距为100 mm的凸透镜将波带片图像投影到硅片表面,成像放大率为1。在光照射区域产生光致载流子,导致硅片表面产生空间导电率不均匀分布,当太赫兹波通过硅片时将受到振幅调制。存在载流子的区域,透射太赫兹场的振幅会减小,而在没有载流子的区域,透射太赫兹场不受影响,相当于太赫兹波通过了一个振幅型波带片。所选用的金属波带片焦距为90 mm,中心波长为300 μm (对应1 THz中心频率),利用传统的聚焦离子束蚀刻和光刻技术将1 μm 厚的铬膜蒸镀在2 mm厚的石英基底上制作完成。实验中将斩波器置于控制光路中与CCD同步控制,使得成像系统只能测量被调制的太赫兹信号,进而滤除背景本底来提高成像清晰度。

实验首先检测PTZP的聚焦特性,图4(b)展示了随着太赫兹波和控制光之间时间延迟,太赫兹峰值信号的变化曲线。其中,负时间延迟意味着控制光落后于太赫兹波到达硅片,太赫兹波没有被光致载流子调制,因此系统测量不到太赫兹信号;正时间延迟意味着控制光超前于太赫兹波到达硅片,系统可以测量太赫兹信号。实验结果表明了被调制的太赫兹场与背景之间具有明显的对比度。图4(c)和(d)展示了在-10 ps和10 ps时间延迟位置的1THz强度图像,可以看出通过PTZP的太赫兹波可以被很好地聚焦,其焦斑直径约为1.6 mm,而在没有控制光调制作用下则不能测量到太赫兹强度分布,PTZP的聚焦功能被很好地验证。光控技术的一个优势在于,可以通过改变投影在硅片上的图案来调整太赫兹波的调制效果。根据波带片半径公式 $r_n = \sqrt{n\lambda f}$,其中 n 为波带片级次, λ 和 f 为波带片的中心波长和焦距,在保持 n 和 f 不变的情况下,通过改变波带片图像的放大率,可以起到调整 r_n 的作用,进而改变PTZP的中心波长 λ 。图4(e)展示了放大率分别为 $R = 1.12$ 、 1.00 和 0.91 情况下,3个波段 $\lambda = 375 \mu\text{m}$ 、 $300 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$ 太赫兹分量(对应于0.8 THz、1.0 THz和1.2 THz)的强度分布。可以看出3个PTZP对于0.8 THz、1.0 THz、1.2 THz太赫兹分量都表现出良好的聚焦功能,当放大率和波长不匹配时,测得的太赫兹图像呈现明显的

散焦特点。除了聚焦效果外,在本工作中也测试了PTZP的成像功能,3个成像测试样品如图4(f)所示,在10 μm 厚铝膜上的3个镂空字母图案“T”、“H”、“Z”。每个图案的尺寸约为 $20 \times 20 \text{ mm}^2$,图案狭缝宽度为5 mm。将测试样品置于PTZP的物方焦平面处,通过测量图案的频域分布图并进行二维逆傅立叶变换可得到3个字母的重建图像,如图4(g)所示。虽然PTZP的虚焦点和高阶焦点引入了一些像差,但是每个字母的图案可以被很明显地表征出来,PTZP的成像功能被充分证明。本工作很新颖地将光控技术引入太赫兹波前调制中,为太赫兹信息技术的发展提供了新思路,在此工作基础上本团队又进行了一系列的尝试。

在光控太赫兹数字全息成像系统的平台上,本团队首先提出了空间太赫兹调制器(STM)的概念,利用在半导体基片上投影特定图案产生光致载流子空间不均匀分布的方法,可以对太赫兹波前进行高自由度、高分辨率、宽带调制^[32]。图5(a)展示了STM的原理,利用可见光波段的空间光调制器(SLM)将控制光生成特定的图案,例如计算全息图或分叉光栅等,进而生成相应的载流子空间分布,当太赫兹光束以一定角度倾斜入射时,其一级衍射分量在传输一定距离后可以生成预设图案,例如涡旋光束等。图5(b)展示了此系统的光路图,与图4(a)的区别之处在于利用SLM代替了波带片,因此可以对控制光进行更高自由度的改变,并且太赫兹波以 37° 入射硅片,成像系统仅测量一级衍射分量。为了验证此技术的可行性,首先在SLM上加载了3个字母“C”、“N”、“U”的太赫兹计算全息图并投影到硅片上。图4(c)展示了3个计算全息图,对应每个字母的尺寸为 $4 \times 6 \text{ mm}^2$,频率为1 THz。图4(d)展示了在太赫兹波一级衍射分量通过硅片并传输2 cm后生成的图案,可以看出“C”、“N”、“U”三个字母清晰地再现,与预设结果完全一致。利用此技术还可以实现对太赫兹波的相位调制,通过在硅片上投影拓扑荷数为 $l=1$ 、 $l=2$ 和 $l=3$ 的太赫兹涡旋光束计算全息图,即不同级次的分叉光栅,可以在太赫兹波的衍射分量上加载相应的涡旋相位。图4(e)和4(f)展示了相对应的太赫兹波一级衍

射分量的振幅和相位分布。可以看出所生成的太赫兹涡旋光束强度分布呈现出典型的面包圈形状,中空部分的尺度随着拓扑荷数的增大而增大,所对应的太赫兹相位分布表现出 2π 、 4π 和 6π 的

环绕中心相移,这些现象都与理论预测达到高度一致。本工作的完成对太赫兹成像、太赫兹信息处理、以及太赫兹通信等领域的发展都具有积极的推动作用。

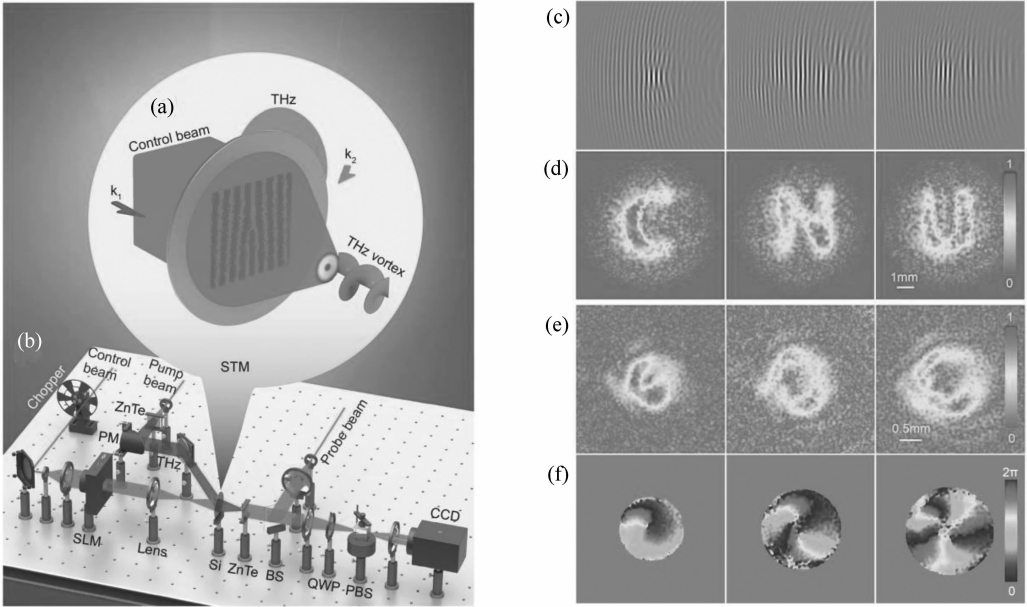


图 5 空间太赫兹调制器。(a)空间太赫兹调制器概念图;(b)实验系统图;(c)“C”、“N”和“U”的离轴太赫兹计算全息图;(d)1 THz 一级衍射分量强度图;(e)利用空间太赫兹调制器生成的拓扑荷数 $l=1$ 、 $l=2$ 和 $l=3$ 太赫兹涡旋光束强度图;(f)太赫兹涡旋光束相位分布图

Fig. 5 Spatial THz Modulator (STM). (a) Prototype of the STM. (b) Experimental configuration of the STM. (c) Off-axis THz computer-generated holograms for letters “C”, “N”, and “U”, respectively. (d) Corresponding intensity distributions of first-order diffraction components at 1 THz. (e) Intensity patterns of THz vortex beams with topological numbers $l=1$, $l=2$, and $l=3$ generated by using the STM. (f) Corresponding the phase patterns of the THz vortex beams

矢量光束的生成与衍射是现代光学的重要研究分支,例如径向偏振光束、角向偏振光学、光涡旋、双环光束等。这类光束具有特殊的光场分布特性,在粒子操控、激光微加工、高分辨显微等领域中都具有重要应用。利用光控太赫兹波前调制技术,本团队在 2015 年实现了太赫兹波段矢量光束的产生与调控^[33]。图 6(a)展示了其原理,首先将入射太赫兹光波从线偏振转换为圆偏振,再利用金属亚波长环形光栅控制不同位置透射太赫兹光波的偏振态,此时太赫兹光束具有径向偏振态和涡旋相位分布,可表示为 $P_{\theta} = e^{i\theta} \hat{e}_r$,其中 \hat{e}_r 为径向单位矢量, θ 为方位角, $e^{i\theta}$ 为涡旋相位项。此时,若在环形光栅的高阻硅基底上利用飞秒激光投影一个涡旋光束计算全息图,则产生的一级衍

射分量会携带涡旋相位分布,进而抵消太赫兹光束本身的涡旋相位项,生成纯太赫兹径向偏振光束。图 6(b)展示了光控径向偏振太赫兹光束的产生与表征系统,光路与图 5(b)类似,利用太赫兹 1/4 波片 (TQWP),将线偏振太赫兹光束转换为 LCP 太赫兹光束。此太赫兹光束以 37° 倾斜入射在高阻硅片上,硅片背面加工有亚波长环形金属光栅。实验中选用周期为 $5 \mu\text{m}$ 的铝质光栅,由于光栅周期远小于太赫兹波长,可以看作径向方向的太赫兹偏振片。利用 SLM 在控制光上加加载涡旋光束计算全息图,并将其投影在硅片表面,生成特定的光致载流子分布。当太赫兹光束通过硅片及环形光栅后,生成的一级衍射分量由成像系统进行相干采集。图 6(c)和 6(d)展示了对应

的模拟结果,径向偏振太赫兹光束在 x 、 y 、 r 分量上的振幅和相位分布。可以看出径向偏振太赫兹光束的 x 和 y 偏振分量是典型 Hermite-Gauss 分布中的 HG10 和 HG01 模式。对于 HG10 模式,其振幅为左右两个半圆分布,两个旁瓣的偏振态相反,相应的相位部分相差为 π ;而 HG01 模式则是 HG10 的 90° 旋转,振幅为上下两瓣,两部分的相位差亦为 π 。 r 分量则是 x 与 y 分量的叠加,其振幅呈现中空环状分布,所有的偏振态都沿半径方向呈辐射状,对应的相位则是平坦分布。图 6(e)

和 6(f) 呈现了实验中所测量得到的 0.8 THz 径向偏振太赫兹光束在 x 、 y 和 r 方向的振幅和相位分布,发现实验结果与理论模拟得到了很好的符合。由于通过光控方法可以对计算全息图进行任意调制,因此通过本技术可以非常灵活的控制所生成太赫兹矢量光束的涡旋相位特性。本工作通过光生载流子来控制太赫兹场的复振幅分布,很大程度上提高了太赫兹器件的灵活性和动态可控性,对将来的太赫兹传感、成像和通信领域的研究提供了实验基础。

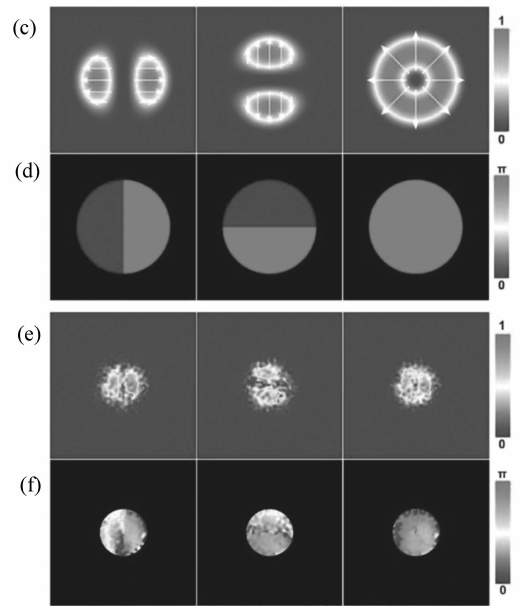
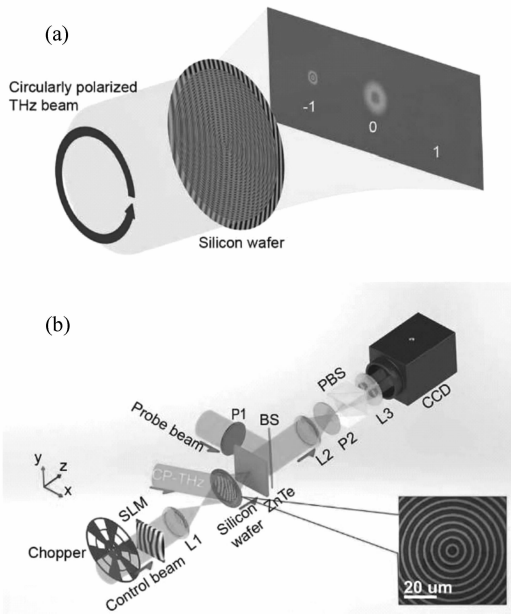


图 6 光控太赫兹矢量光束的生成与表征。(a)光控太赫兹矢量光束产生原理图;(b)太赫兹矢量光束表征系统;(c)和(d)为径向偏振太赫兹光束在 x 、 y 和 r 分量的振幅和相位模拟结果;(e)和(f)为径向偏振太赫兹光束在 x 、 y 和 r 分量振幅和相位的实验测量结果

Fig. 6 Generation and characterization of optical steerable THz vector beams. (a) Schematic for generating an optical-tunable THz vector beam. (b) Characterization system of THz vector beams. Simulated (c) amplitude and (d) phase distributions of x , y , and r components of a radially polarized THz beam. Measured (e) amplitude and (f) phase patterns of x , y , and r components of a radially polarized THz beam

3.3 太赫兹衍射场纵向分量重建

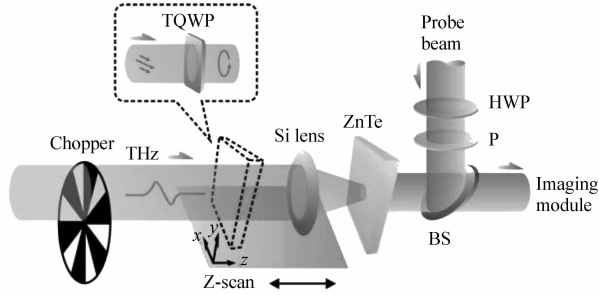
电磁波在聚焦过程中由于引入了横向波矢,因此在衍射过程中会产生纵向偏振电场。特殊光束的纵向场分量具有十分重要的应用潜力,然而由于在可见光波段不易测量所以常常被忽视。随着光学技术的发展,人们提出了很多测量纵向场分量的方法。例如,L. Novotny 等人利用具有固定偶极子吸收取向的单分子荧光信号对纵向分量进行了测量^[34];S. Quabis 等人将刀片法与全息重建

算法相结合,再现了三维聚焦光场的强度分布^[35];G. Miyaji 等人利用在 Kerr 介质中由激光诱导的双折射现象,对径向偏振光束的纵向分量进行了测量^[36]。然而,这些方法都主要是对纵向分量的强度信息进行探测,相位信息则被完全丢失。

2014 年,本团队通过对太赫兹数字全息成像系统进行改进,利用 $\langle 100 \rangle$ 晶体取代了 $\langle 110 \rangle$ 晶体,实现了对不同偏振态太赫兹光束在聚焦过程中的纵向场分量进行相干测量^[37]。图 7(a)展

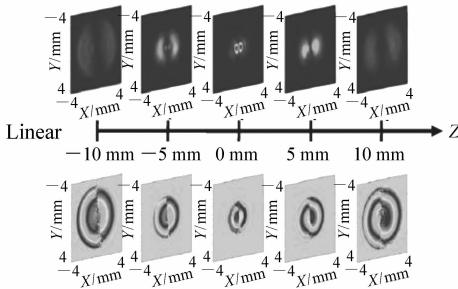
示了实验系统,其基本构架与图 1 相同,区别在于采用 $\langle 100 \rangle$ ZnTe 晶体作为探测器对纵向分量的复振幅波前进行获取。实验中利用焦距为 25 mm 的高阻硅透镜对太赫兹光束进行聚焦,并连续改变透镜与探测面之间的距离,通过 Z 扫描测量观

察纵向分量的衍射过程。实验首先对线偏振太赫兹光束在聚焦过程中产生的纵向分量进行了测量,图 7(b)展示了在距离焦平面 -10 mm、 -5 mm、 0 mm、 5 mm、 10 mm 处 0.7 THz 纵向分量的振幅和相位分布,可以看出纵向分量的振幅呈

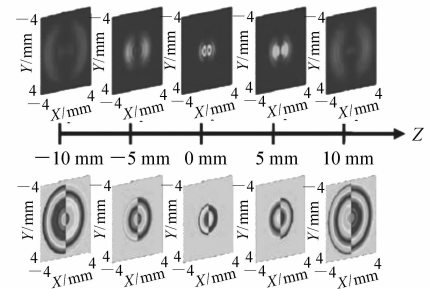


(a) 实验系统图

(a) Experimental system

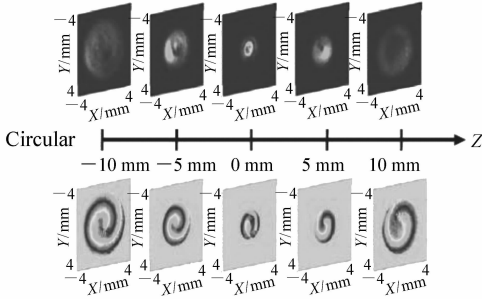


(b) 线偏振太赫兹光束聚焦,其纵向分量的振幅和相位分布

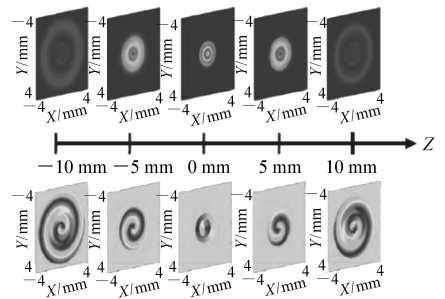
(b) Amplitude and wrapped phase distribution of the E_z component for a converging THz beam with a linear polarization

(c) 利用 Richards-Wolf 公式得到的模拟结果

(c) Simulation results obtained by using the Richards-Wolf equation



(d) 圆偏振太赫兹光束聚焦,其纵向分量的振幅和相位分布

(d) Amplitude and wrapped phase maps of the E_z component for a focused THz beam with a circular polarization

(e) 相应的模拟结果

(e) Corresponding simulation result

图 7 太赫兹衍射场纵向分量重建。(a) 实验系统图; (b) 线偏振太赫兹光束聚焦,其纵向分量的振幅和相位分布; (c) 利用 Richards-Wolf 公式得到的模拟结果; (d) 圆偏振太赫兹光束聚焦,其纵向分量的振幅和相位分布; (e) 相应的模拟结果

Fig. 7 Reconstruction of the E_z component of a THz diffraction field. (a) Experimental system. (b) Amplitude and wrapped phase distributions of the E_z component for a converging THz beam with a linear polarization. (c) Simulation results obtained by using the Richards-Wolf equation. (d) Amplitude and wrapped phase maps of the E_z component for a focused THz beam with a circular polarization. (e) Corresponding simulation result

现了类似于偶极子辐射的分布特点,在光轴上($x=0$ mm)存在振幅的极小值,在光轴两侧约 $x=\pm 0.4$ mm处存在两个振幅极大值。在纵向分量的相位分布中,可以看出以 $Y-Z$ 平面为分界,两侧的相位相差 π ,这表明两侧的纵向分量传播方向是相反的,导致了在光轴位置处二者相干相消,进而出现了振幅极小值。为了验证实验的准确性,利用Richards-Wolf衍射积分公式对实验过程进行了模拟,图7(c)展示了相应的模拟结果,发现与实验结果完全一致。实验中还对圆偏振太赫兹光束聚焦产生的纵向分量进行了测量。利用TQWP将入射线偏振太赫兹光束转换为圆偏振光束,通过硅透镜聚焦后,对其纵向分量进行了Z扫描测量。图7(d)展示了0.7 THz纵向分量的振幅和相位分布,可以看出其振幅呈现环状分布,光圈强度分布不均匀是因为入射太赫兹光束的不均匀和测量误差引起的。纵向分量的相位呈现出清晰的涡旋分布,并随着传播距离的增大,旋转方向一直呈现逆时针变化,在焦点前后其扭转方向发生了反转。对于该过程的模拟,由于圆偏振光束可以分解为两个正交线偏振光束的线性叠加,因此其纵向分量可以表示为 $E_z = \exp(-i\pi/2)E_{xz} + E_{yz}$,其中 E_{xz} 和 E_{yz} 为由水平和竖直线偏振太赫兹光束产生的纵向分量。图7(e)展示了相应的振幅和相位模拟结果,与实验结果获得了很好的一致。本工作的完成为研究电磁波的矢量衍射特性提供了一个很好的测试平台,同时也证明了本成像系统的实用性。

3.4 太赫兹表面波再现

金属表面等离子体器件是超材料家族中的重要成员,它利用亚波长结构对局域在金属表面的电磁波进行调制,对于集成光学系统的发展贡献巨大,并有可能在未来取代印刷电路板成为更有力的信息处理工具。然而,对金属表面等离子体器件的功能进行设计和验证,需要对局域在金属上的表面电场进行观测。在可见光波段多是采用扫描近场光学显微(SNOM)、荧光成像、泄露辐射成像等技术对表面波进行测量,在太赫兹波段也是采用SNOM和太赫兹时域光谱技术相结合的方法来对太赫兹表面场进行探测。这种方法实验耗时很长,并且需要改变探测器与样品之间的位

置进行逐点扫描,难免影响测量的稳定性。2014年,本团队通过对太赫兹数字全息成像系统进行改进,实现了对金属表面的太赫兹场进行线扫描测量,很大程度上缩短了实验时间,并提高了测量稳定性^[38]。

实验系统如图8(a)所示,扩展的太赫兹光源照射到金属表面等离子体器件上,在器件的两侧激发太赫兹表面场。利用狭缝和扩束镜生成线形探测光束,并使其尽量贴近器件出射面掠过,同时在靠近器件出射面附近放置 $\langle 110 \rangle$ ZnTe晶体对太赫兹表面场进行相干探测,实验中ZnTe晶体距离器件约500 μm ,探测光距离器件约1 mm。当探测光通过ZnTe晶体后携带太赫兹表面场信息,入射到系统的成像模块中,与图1描述一致,通过动态相减技术和差分探测技术对太赫兹信息进行提取。实验中,ZnTe晶体放置在一维电动平移台上沿 x 方向进行扫描测量,扫描范围为 -3 mm到4 mm,扫描步长为0.4 mm。在每个扫描位置获取一系列时域图像,通过傅里叶变换,可以组成每个频率成分的太赫兹表面波分布。图8(a)的插图展示了成像样品是一个半径为6 mm,宽度为120 μm 的半月形金属狭缝。当太赫兹光束照射样品时,在狭缝边缘会激发等相位的太赫兹表面场,根据等光程原理,太赫兹表面波会出现聚焦效果。图8(b)展示了实验测量得到的 $X-Y$ 平面上太赫兹表面波时域峰值图像,清晰地呈现了太赫兹表面波的聚焦过程。实验的成像面积为 7×4 mm^2 ,实验耗时为9 h,如果利用传统的SNOM方法进行同样的实验需要约两天时间,可见线扫描太赫兹数字全息成像技术可以大幅度的缩短实验时间。图8(c)展示了在 $x=0$ mm方向上 $y=-1$ mm、 -0.5 mm、 0 mm、 0.5 mm、 1 mm位置处,提取的5个太赫兹时域信号,可以明显地看出在焦点处的信号强度大于其它位置处的。图8(d)展示了所提取的0.73 THz太赫兹表面波聚焦振幅图像,实验结果显示了太赫兹表面波聚焦在半月形金属狭缝的中心。图8(e)是利用时域有限差分FDTD solutions模拟软件得到的仿真结果,与实验测量达到了很好的吻合。为了更准确地观察太赫兹表面波分布特点,将图8(d)和8(e)中沿 $x=0$ mm和 $y=0$ mm方向的归一化振

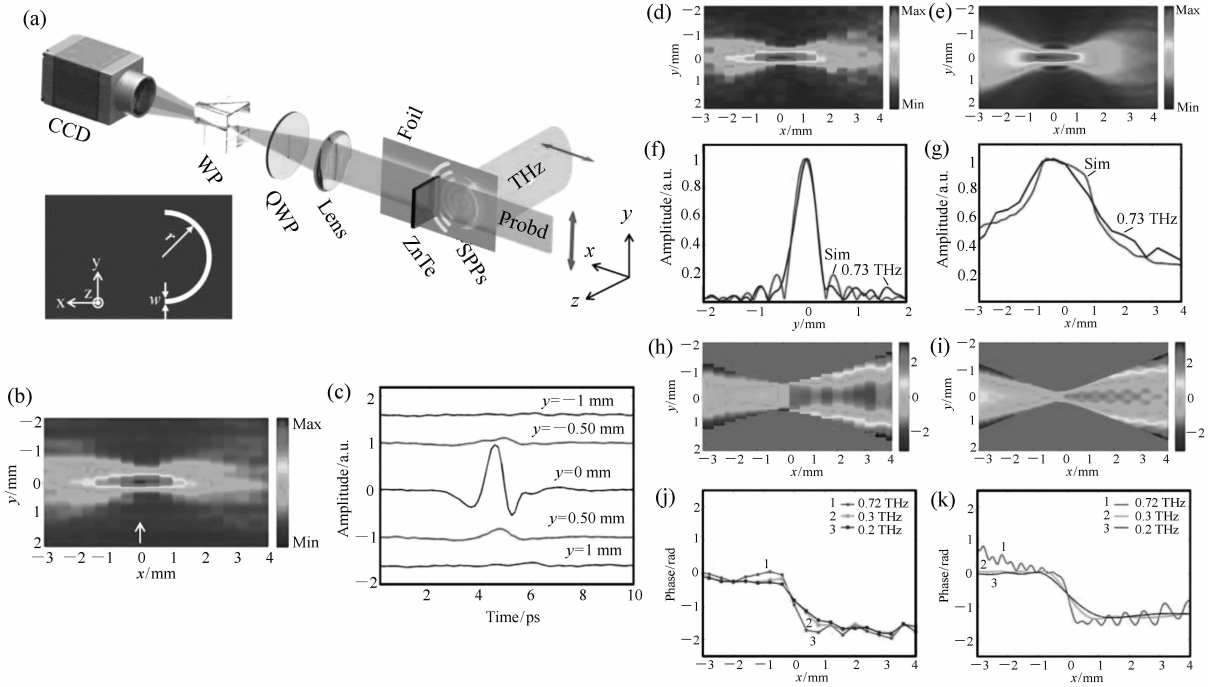


图 8 金属等离子体器件的太赫兹表面波再现。(a) 实验系统图, 插图展示了测试样品; (b) 太赫兹表面波时域峰值图像; (c) 在 $x=0$ mm 方向上 $y=-1$ mm、 -0.5 mm、 0 mm、 0.5 mm、 1 mm 位置处的太赫兹时域信号; (d) 0.73 THz 太赫兹表面波的振幅分布图; (e) 利用 FDTD 算法得到的模拟结果; (f) 和 (g) 展示了归一化横向和纵向振幅轮廓曲线; (h) 0.73 THz 表面太赫兹波的相位分布图; (i) 相应的模拟结果; (j) 不同光谱成分太赫兹表面波的纵向相位轮廓曲线; (k) 相应的模拟结果

Fig. 8 Reconstruction of THz surface waves on metallic plasmon devices. (a) Experimental setup. The inset shows the test sample. (b) The temporal peak image of the THz surface wave. (c) The temporal THz signals measured at $y = -1$ mm, -0.5 mm, 0 mm, 0.5 mm, and 1 mm along the $x = 0$ mm direction. (d) Amplitude distribution of the THz surface wave at 0.73 THz. (e) Simulation result by using the FDTD algorithm. (f) and (g) show the normalized transverse and longitudinal amplitude profile curves. (h) Phase distribution of the THz surface wave at 0.73 THz. (i) Corresponding simulation result. (j) Longitudinal phase profile curves for THz surface waves with difference spectral components. (k) Corresponding simulation result

幅分布曲线提取并进行比较, 如图 8(f) 和 8(g) 所示, 实验得到的横向和纵向振幅分布半高全宽 (FWHM) 分别是 $493 \mu\text{m}$ 和 4 mm, 模拟结果分别是 $540 \mu\text{m}$ 和 3.6 mm, 略微的误差主要来自于探测晶体和探测光束的不均匀。由于获取的太赫兹信息是相干的, 因此可以提取其相位信息, 图 8(h) 和 8(i) 展示了 0.73 THz 太赫兹表面波的相位分布实验和模拟结果。由于在实验中随着探测晶体的移动, 太赫兹表面波与探测光的光程是一同改变的, 因此太赫兹表面波的线性相移被有效地消除, 可以清晰地观测出在聚焦过程中的 Gouy 相移现象。将图 8(h) 和 8(i) 中沿 $y=0$ mm 方向的相位分布曲线进行提取, 如图 8(j) 和 8(k) 所

示, 可以看出由于太赫兹表面波是一维聚焦, 因此在焦点前后, 其相位仅发生了 $\pi/2$ 的变化。为了进一步验证实验和模拟结果, 实验中还对 0.2 THz 和 0.3 THz 分量的相位分布进行了提取, 同样观察到了 $\pi/2$ 的变化, 不同之处在于频率越高的光谱成分, 相位变化越迅速, 这是因为高频成分具有更短的 Rayleigh 长度和更大的横向波矢, 这与本团队之前在自由空间中观察太赫兹波的衍射现象是一致的^[39]。本工作的完成为表征金属表面等离子体器件的性能测试提供了一项有效的工具, 对于推动太赫兹集成系统、芯片系统的发展有很大的帮助。

以线扫描成像系统为平台, 2015 年, 本团队

对太赫兹表面波成像进行了进一步的探索,研究了半圆环表面等离子体透镜的偏振选择聚焦特性,并利用惠更斯-菲涅尔原理以及傅里叶变换特性进行了理论分析^[40]。实验系统如图9(a)所示,其与图8(a)基本一致,不同之处在于太赫兹光路中加入了TQWP或太赫兹半波片(THWP)用来产生LCP、RCP或y偏振太赫兹辐射。图9(a)插图展示了样品示意图,根据惠更斯-菲涅尔原理,认为任一点 (x, y) 处的太赫兹表面波可以看做沿半圆环边缘不同位置 (x', y') 处产生的表面

波源的线性叠加。当LCP/RCP光入射样品时,会对太赫兹表面波附加一个沿半圆环方向的螺旋相位,经过聚焦后相当于进行了一次傅里叶变换,根据傅里叶变换的平移特性,使得表面波的焦点出现了相应的空间横移。图9(b)和9(c)展示了LCP/RCP入射光产生的表面波聚焦强度分布图,可以看出LCP光激发的太赫兹表面波焦点向下移动,而RCP光激发的太赫兹表面波焦点向上移动。在 $x = 0$ mm处截取强度分布曲线,如图9(d)和9(e)所示,可以更加清晰地看出焦点的横向移

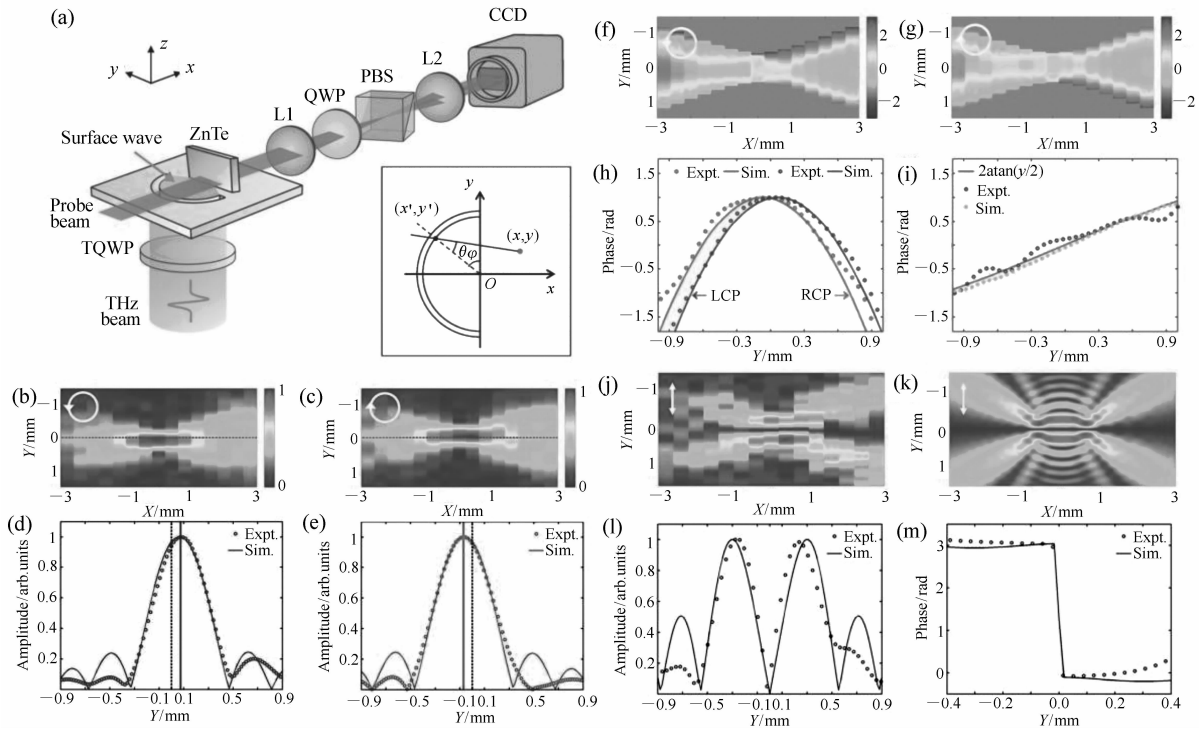


图9 太赫兹表面波偏振选择性聚焦。(a)太赫兹表面波成像系统,插图为样品示意图;(b)和(c)为LCP和RCP入射光激发的太赫兹表面波聚焦过程振幅分布图;(d)和(e)为图(b)和(c)中截取的 $x = 0$ mm处振幅分布曲线;(f)和(g)为LCP和RCP入射光激发的太赫兹表面波聚焦过程相位分布图;(h)为图(f)和(g)中截取的 $x = -2$ mm处相位分布曲线;(i)相位相减分布曲线;(j)y偏振入射光激发的太赫兹表面波振幅分布图;(k)相应的数值模拟结果;(l)和(m)为在图(j)和(k)中截取的 $x = 0$ mm处振幅和相位分布曲线

Fig. 9 Polarization-controlled focusing of THz surface waves. (a) THz surface waves imaging system. The inset shows the schematic of the sample. (b) and (c) present the amplitude distributions of converging THz surface waves excited by LCP and RCP THz incident fields. (d) and (e) show the amplitude profile curves along $x = 0$ mm taken from (b) and (c). (f) and (g) present the phase patterns of focused THz surface waves excited by LCP and RCP THz incident fields. (h) shows the phase profile curves along $x = -2$ mm extracted from (f) and (g). (i) Curve of the subtraction phase. (j) Amplitude map of the THz surface wave excited by a linearly y-polarized THz incident field. (k) Corresponding simulation result. (l) and (m) present the amplitude and phase curves along $x = 0$ mm taken from (j) and (k)

动,移动距离大约为 $75\ \mu\text{m}$ 。利用 FDTD solutions 软件对实验过程进行模拟,发现模拟结果与实验结果可以达到很好的一致。图 9(f) 和 9(g) 为 LCP/RCP 入射光产生的太赫兹表面波聚焦过程的相位分布,由于存在几何相位的干扰,螺旋相位的表现并不十分清晰。图 9(h) 展示了在 $x = -2\ \text{mm}$ 处截取的相位分布曲线,可以看出 LCP/RCP 光引发的相位分布差别。将二者相减以消除几何相位影响,并将相位差在 y 方向进行投影,结果如图 9(i) 所示,可以看出太赫兹表面波的相位沿 y 方向逐渐增大,实验测量结果、数值模拟结果、以及利用理论公式计算结果吻合一致,验证了理论分析的正确性。当 y 偏振太赫兹波入射时,可以看作 LCP 和 RCP 光的线性叠加,在半圆环的上下四分之一环处产生的太赫兹表面波会出现极性的反转,因此会在圆心处产生两个振幅极大值,图 9(j) 和 9(k) 展示了实验和模拟结果。对 $x = 0\ \text{mm}$ 位置处的振幅和相位分布曲线进行截取,如图 9(l) 和 9(m) 所示,可以看出焦点的横向场分布类似于贝塞尔光束,在光轴位置处存在振幅极小值,这是由于在光轴位置存在 π 的相位跳变所引发的表面波相干相消导致的。本工作在实验上观测了太赫兹表面波对于激发光不同偏振态的特殊响应,并提出了简单直观的理论模型,对于深入研究偏振相关表面等离子体器件提供了重要的实验基础。

4 关键技术分析

太赫兹数字全息成像技术发展至今已具备了较强的实用价值,可以实现对样品的全部光学信息进行精确获取,进而对物质的物理化学特性进行全面而深入的分析。然而,太赫兹数字全息术要想便捷地应用于工业生产中还需要克服一些技术难关。例如:目前的太赫兹成像系统还只能在实验室中运行,对于实验环境存在较严苛的要求,如何使其与光纤飞秒激光器兼容使用,降低成像系统对周围湿度和温度的要求,还需要在技术上进一步的改良;成像系统是通过 CCD 对太赫

兹图像信息进行采集,由于无法采用锁相技术,因此系统的信噪比一直受到了极大地限制,这也影响了成像系统的应用;为了对太赫兹电磁场的波前信息进行相干测量,通常都采用电光晶体作为探测器,而太厚的晶体会导致成像系统的空间分辨率下降,太薄的晶体又会影响探测灵敏度,晶体的尺寸太小会难以进行大面积成像,而大尺寸的晶体成本又太高;在对物体进行测量时,太赫兹时域图像的获得还是通过不断调整太赫兹光路与探测光路的光程差进行获取的,这使得实验时间难以进一步缩短,如何将单脉冲测量技术引入太赫兹成像,还需要对成像系统进行优化设计。尽管还存在一些限制,但是随着新一代太赫兹材料的问世(例如铈酸锂、DAST、DSTMS 等^[41-43])以及太赫兹探测技术^[44-47]的不断开发,为太赫兹成像系统提供了更强的辐射源和更灵敏的探测手段,使得太赫兹成像技术的实用性不断得到提高,相信很快会形成工业化推广并获得市场效益。

5 结束语

本文综述了作者所在团队近年来在太赫兹成像领域所进行的部分应用研究,包括对以亚波长金属天线为结构单元的超薄太赫兹平板元件进行性能表征,观测了对太赫兹波前实现纯相位调制以及偏振选择性响应等功能;对利用半导体光致载流子实现对太赫兹波前的全光调控,完成了可控波带片、可控数字全息图、以及可控太赫兹矢量光束等;对自由空间中不同偏振态太赫兹衍射光场的纵向分量进行成像,观测了线偏振和圆偏振聚焦太赫兹光束的纵向光场分布;通过对成像系统进行改进,实现了对金属等离子体器件的太赫兹表面场进行重建,并分析了金属半环结构对不同偏振太赫兹入射场的选择性聚焦。本文还对太赫兹数字全息成像系统的优势、限制以及未来的前景进行了分析和预测。这些工作对于太赫兹成像技术的应用推广、太赫兹波段的关键元器件开发、以及太赫兹集成系统的研制都具有很好的促进作用。

参考文献:

- [1] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(16):1716-1718.
- [2] MITTLEMAN D M, HUNSCHE S, BOIVIN L, *et al.*. T-ray tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(12):904-906.
- [3] FISCHER B M, HOFFMANN M, HELM H, *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy and imaging of artificial RNA[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(14):5205-5215.
- [4] NAKAJIMA S, HOSHINA H, YAMASHITA M, *et al.*. Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(90):041102.
- [5] LEE K, JIN K H, YE J C, *et al.*. Coherent optical computing for T-ray imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(4):508-510.
- [6] WU Q, SUN F G, CAMPBELL P, *et al.*. Dynamic range of an electro-optic field sensor and its imaging applications[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(23):3224-3226.
- [7] JIANG Z P, XU X G, ZHANG X C. Improvement of terahertz imaging with a dynamic subtraction technique[J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(17):2982-2987.
- [8] RUNGSAWANG R, OHTA K, TUKAMOTO K, *et al.*. Ring formation of focused half-cycle terahertz pulse[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, 36(3):229-235.
- [9] HATTORI T, SAKAMOTO M. Deformation corrected real-time terahertz imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(26):261106.
- [10] FEURER T, VAUGHAN J C, NELSON K A. Spatiotemporal coherent control of lattice vibrational waves[J]. *Science*, 2003, 299(5605):374-377.
- [11] ZHONG H, SANCHEZ A R, ZHANG X C. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal-plane imaging system[J]. *Opt. Express*, 2006, 14(20):9130-9141.
- [12] YASUI T, SAWANAKA K I, IHARA A, *et al.*. Real-time terahertz color scanner for moving objects[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(2):1208-1221.
- [13] BLANCHARD F, DOI A, TANAKA T. Real-time terahertz near-field microscope[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(9):8277-8284.
- [14] WANG X K, CUI Y, SUN W F, *et al.*. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. *Opt. Commun.*, 2010, 283(23):4626-4632.
- [15] WANG X K, CUI Y, HU D, *et al.*. Terahertz quasi-near-field real-time imaging[J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282(24):4683-4687.
- [16] WANG X K, CUI Y, SUN W F, *et al.*. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. *J. Opt. Soc. Am A*, 2010, 27(11):2387-2393.
- [17] JIMBA Y, TAKANO K, HANGYO M, *et al.*. Extraordinary optical transmission through incommensurate metal hole arrays in the terahertz region[J]. *J. Opt. Soc. Am A*, 2013, 30(9):2476-2482.
- [18] WU J F, NG B H, TURAGA S P, *et al.*. Free-standing terahertz chiral meta-foils exhibiting strong optical activity and negative refractive index[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(14):141106.
- [19] BULGAREVICH D S, WATANABE M, SHIWA M. Highly-efficient aperture array terahertz band-pass filtering[J]. *Opt. Express*, 2010, 18(24):25250-25255.
- [20] YU N F, GENEVE P, KATS M A, *et al.*. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 334(6054):333-337.
- [21] SUN S L, HE Q, XIAO S Y, *et al.*. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves[J]. *Nat. Mater.*, 2012, 11(5):426-431.
- [22] ZHANG X Q, TIAN Z, YUE W S, *et al.*. Broadband terahertz wave deflection based on c-shape complex metamaterials with phase discontinuities[J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(33):4566-4566.
- [23] CHEN X Z, HUANG L L, MUHLENBERND H, *et al.*. Reversible three-dimensional focusing of visible light with ultrathin

- plasmonic flat lens[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2013, 1(7): 517-521.
- [24] HU D, WANG X, FENG S, *et al.*. Ultrathin terahertz planar elements[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2013, 1(2): 186-191.
- [25] HE J W, WANG X K, HU D, *et al.*. Generation and evolution of the terahertz vortex beam[J]. *Opt. Express*, 2013, 21(17): 20230-20239.
- [26] WANG S, WANG X K, KAN Q, *et al.*. Spin-selected focusing and imaging based on metasurface lens[J]. *Opt. Express*, 2015, 23(20): 26434-26441.
- [27] DENG L Y, TENG J H, LIU H W, *et al.*. Direct optical tuning of the terahertz plasmonic response of InSb subwavelength gratings[J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2013, 1(2): 128-132.
- [28] BUSCH S, SCHERGER B, SCHELLER M, *et al.*. Optically controlled terahertz beam steering and imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(8): 1391-1393.
- [29] BUSCH S F, SCHUMANN S, JANSEN C, *et al.*. Optically gated tunable terahertz filters[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(26): 261109.
- [30] RIZZA C, CIATTONI A, COLUMBO L, *et al.*. Terahertz optically tunable dielectric metamaterials without microfabrication[J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(8): 1307-1309.
- [31] WANG X K, XIE Z W, SUN W F, *et al.*. Focusing and imaging of a virtual all-optical tunable terahertz Fresnel zone plate[J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(22): 4731-4734.
- [32] XIE Z W, WANG X K, YE J S, *et al.*. Spatial terahertz modulator[J]. *Sci. Rep.*, 2013, 3(11): 3347.
- [33] XIE Z W, HE J W, WANG X K, *et al.*. Generation of terahertz vector beams with a concentric ring metal grating and photo-generated carriers[J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(3): 359-362.
- [34] NOVOTNY L, BEVERSLUIS M R, YOUNGWORTH K S, *et al.*. Longitudinal field modes probed by single molecules[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 86(23): 5251-5254.
- [35] QUABIS S, DORN R, EBERLER M, *et al.*. The focus of light theoretical calculation and experimental tomographic reconstruction[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, 72(1): 109-113.
- [36] MIYAJI G, MIYANAGA N, TSUBAKIMOTO K, *et al.*. Intense longitudinal electric fields generated from transverse electromagnetic waves[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(19): 3855-3857.
- [37] WANG X K, WANG S, XIE Z W, *et al.*. Full vector measurements of converging terahertz beams with linear, circular, and cylindrical vortex polarization[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(20): 24622-24634.
- [38] WANG S, ZHAO F, WANG X K, *et al.*. Comprehensive imaging of terahertz surface plasmon polaritons[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(14): 16916-16924.
- [39] WANG X K, SUN W F, CUI Y, *et al.*. Complete presentation of the Gouy phase shift with the THz digital holography[J]. *Opt. Express*, 2013, 21(2): 2337-2346.
- [40] WANG S, WANG X K, ZHAO F, *et al.*. Observation and explanation of polarization-controlled focusing of terahertz surface plasmon polaritons[J]. *Phys. Rev. A*, 2015, 91(5): 053812.
- [41] HEBLING J, YE H K L, HOFFMANN M C, *et al.*. Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, 25(7): B6-B19.
- [42] VICARIO C, MONOSZLAI B, HAURI C P, *et al.*. GV/m single-cycle terahertz fields from a laser-driven large-size partitioned organic crystal[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112(21): 213901.
- [43] 叶全意, 杨春. 光子学太赫兹源研究进展[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 1-11.
YE Q Y, YANG CH. Recent progress in THz sources based on photonics methods[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 1-11. (in Chinese)
- [44] BOPPEL S, LISAUSKAS A, MAX A, *et al.*. CMOS detector arrays in a virtual 10-kilopixel camera for coherent terahertz real-time imaging[J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(4): 536-538.
- [45] FAN S Z, QI F, NOTAKE T, *et al.*. Real-time terahertz wave imaging by nonlinear optical frequency up-conversion in a 4-dimethylamino-N⁺-methyl-4⁻stilbazolium tosylate crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104(10): 101106.

- [46] 李宏光,杨鸿儒,薛战理,等.窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J].光学精密工程,2013,21(6):1410-1416.
LI H G, YANG H R, XUE ZH L, *et al.*. Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6):1410-1416. (in Chinese)
- [47] 潘学聪,姚泽瀚,徐新龙,等.太赫兹波段超材料的制作、设计及应用[J].中国光学,2013,6(3):283-296.
PAN X C, YAO Z H, XU X L, *et al.*. Fabrication, design and application of THz metamaterials[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):283-296. (in Chinese)

作者简介:



石敬(1989—),女,北京人,博士研究生,主要从事太赫兹成像方面的研究。
E-mail:867895903@qq.com



王新柯(1982—),男,北京人,博士,副教授,研究生导师,主要从事太赫兹波谱与成像方面的研究。E-mail:wxk82721@cnu.edu.cn