

全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统

王刚, 曹佳炜, 袁英豪

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 通过对太赫兹光电导探针天线与飞秒倍频光路进行光纤模块化封装, 并结合光纤耦合式太赫兹光电导天线辐射源, 以及自主研制设计的光纤飞秒激光光源和光纤式高速光学延时线, 开发了一种全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统, 其光谱范围覆盖 0.1~2.0 THz, 动态范围达到 60 dB, 光谱采样速度高达 0.1 s/谱, 近场成像分辨率优于 20 μm 的全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统。得益于整套系统的全光纤结构设计, 太赫兹辐射源和探针式探测器之间可以根据测量需求灵活调节而不需要重新校准光路, 极大地提高了系统的工作稳定性和使用方便性。该研究为太赫兹科学研究提供了一种高性能且实用性强的太赫兹近场光谱成像测量系统。

关键词: 太赫兹近场; 光电导探针; 太赫兹时域光谱

中图分类号: O 439 **文献标志码:** A

All-fiber coupling type terahertz near-field probe spectral imaging system

WANG Gang, CAO Jiawei, YUAN Yinghao

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

Abstract: In order to develop an all-fiber-coupled terahertz near-field probe spectroscopy imaging system, an all-fiber-coupled terahertz photoconductive probe antenna and a femtosecond multiplier optical path were fiber modularly packaged and combined with a fiber-coupled terahertz photoconductive antenna radiation source, as well as an independently developed and designed fiber-optic femtosecond laser light source and fiber-based high-speed optical delay line. The all-fiber-coupled terahertz near-field probe spectroscopic imaging system with a dynamic range of 60 dB, a spectral sampling speed of up to 0.1 sec/spectra and a near-field imaging resolution better than 20 μm was

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC0810900); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1200302)

第一作者: 王刚(1995-), 男, 硕士研究生。研究方向: 太赫兹技术应用。E-mail: 14739247@qq.com

通信作者: 袁英豪(1984-), 男, 副研究员。研究方向: 太赫兹频率梳精密光谱测量技术。E-mail: yinghao.yuan@foxmail.com

引文格式: 王刚, 曹佳炜, 袁英豪. 全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(5): 539-544.

Citation: WANG Gang, CAO Jiawei, YUAN Yinghao. All-fiber coupling type terahertz near-field probe spectral imaging system[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(5): 539-544.

reported for the first time. Benefit from the all-fiber structure design of the entire system, the terahertz radiation source and the probe detector can be flexibly adjusted according to the measurement needs without recalibrating the optical path. The working stability and the use convenience of the system are greatly improved. The research results of this work provide a high-performance and practical terahertz near-field spectral imaging measurement system for terahertz scientific research.

Keywords: *terahertz near field; photoconductive antenna probe; terahertz time-domain spectroscopy*

得益于太赫兹波的安全性、穿透性和指纹光谱识别等诸多特点，太赫兹光谱成像技术在国防、安检、生物医学检测等多个领域得到了广泛应用^[1-3]。但是，受限于太赫兹的波长，传统远场式太赫兹成像系统的分辨率仅能达到毫米级，无法满足某些特定的检测需求。而太赫兹近场成像技术，则提供了一种突破衍射极限，实现微米级甚至纳米级成像分辨率的方法^[4-5]。

目前，已报道形成实用化商业产品的太赫兹近场成像系统主要有两种，分别是散射式太赫兹扫描近场光学显微系统(scattering terahertz scanning near-field optical microscopy)和太赫兹微米探针近场成像系统。其中，德国 Neaspec 公司推出的 s-SNOM 系统，可实现 10 nm 级超高成像分辨率。但是，这种系统对工作平台的振动影响十分敏感，需要特定的工作场所，并且对样品的表面平整度也有较高的要求^[6]。另一种基于微米光导探针的太赫兹近场成像系统则对实验环境的要求大大降低，它不仅可以实现微米级的高成像分辨率，还能有较高的信噪比和系统稳定性^[7]。该系统是将传统远场系统中的探测天线替换成光导探针，测样时针尖靠近样品的近场区域附近，探测样品表面的倏逝波^[8-9]。表 1 列出了国内外已报道的太赫兹微米探针系统的主要性能指标情况。其中，由天津大学研制的太赫兹近场成像系统测量的频谱范围可达 0.2~1.5 THz^[10]。吉林大学研制了近场探针式成像

系统并应用于生物样品脑组织切片成像实验^[11]。重庆应用物理中心使用此类系统对单细胞进行成像实验，系统信号经过平均 3 s 后，信噪比达 60 dB，0.17 s 可采集 90 ps 的时域波形数据^[12]。

以上这些已报道的光电导微米探针式太赫兹近场成像系统，其光路均包含大量的自由空间光路设计，整套系统需要工作于稳定的光学平台，且太赫兹辐射源和探针式探测器之间无法灵活地调节(调节后需要校准光路)，一定程度上制约了系统的稳定性和实用性。本文首次报道了一种光纤耦合式太赫兹近场光谱成像系统，光谱范围覆盖 0.1~2 THz，动态范围达到 60 dB，光谱测量速度为 0.1 谱/s，近场成像分辨率优于 20 μm。

1 系统方案

图 1 所示为本文研制的全光纤耦合式太赫兹近场光谱成像扫描系统组成框图，主要由：光纤飞秒激光器(fs-laser)、光纤延迟线(ODL)、光纤耦合式太赫兹光电导天线辐射源(THz-tx)、光纤耦合式太赫兹近场探测模块(THz-probe)，以及直流高压源(HV)、前置电流放大器(TIA)和 A/D 数据采集卡等组成。整套系统与传统太赫兹时域光谱测系统构架类似^[13]，实现近场光谱成像的关键是其中的 THz-porbe 模块，其内部光路如图 2 所示：从飞秒激光输出的探测光(probe，中心波长

表 1 已报道的太赫兹微米探针系统主要性能指标

Tab.1 Performance parameters of terahertz microprobe system

	德国Protemics GmbH	天津大学 ^[10]	吉林大学 ^[11]	重庆应用物理中心 ^[12]	本文
光谱范围/THz	0.05~3	0.2~1.5	0.15~1.5	未标明	0.1~2.0
动态范围/dB	60	未标明	未标明	50	60
未校准实际分辨率/μm	20	未标明	10	20	20
光谱采样速度	10 μs/谱(5ps)	未标明	未标明	0.17 s/谱(90ps)	0.1 s/谱(60ps)
系统光路结构	自由空间	自由空间	自由空间	探测端自由空间	全光纤

1550 nm)依次经过保偏光纤 A(PMF-A)、ODL 和保偏光纤 B(PMF-B)传输后,以 FC/APC 接头形式连接至光纤准直器(fiber collimator),形成平行光束出射至自由空间;然后经过聚焦透镜 1(focus lens-1)汇聚入射至倍频晶体(BBO),输出中心波长为 780 nm 的倍频光;此倍频光依次经过滤波片(滤除掉波长为 1550 nm 的基频光)、聚焦透镜 2(focus lens-2)、直角棱镜(right-angle prism)后,以聚焦光斑形式入射至太赫兹光电导探针(THz-PCA probe)的针尖,显微镜照片效果见图 3。图 2 所示的整套自由空间光学系统采用精密光机微集成工艺固化封装,最终形成图 4 所示的光纤耦合式太赫兹近场探测模块。

上述 THz-PCA probe 是德国 Proteomics 公司生产的 TD-800-X-HR 型光电导探针。太赫兹波透过样品后,会在样品近表面形成倏逝波。根据倏逝波的特性可以将探测区域分为近场和远场。在近场区域,倏逝波会随距离的增加而快速减弱,而远场区域无法探测到近场信息。所谓的近场成像

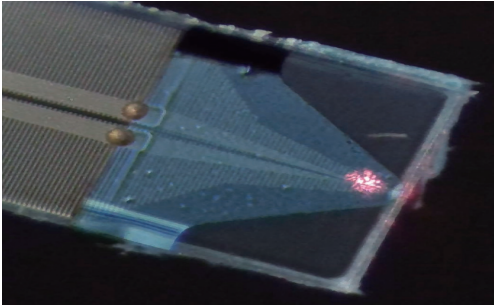


图 3 探测光光斑入射至太赫兹光电导探针的显微镜照片
Fig.3 Photo of micrograph of THz photoconductive probe incident by a probe light spot

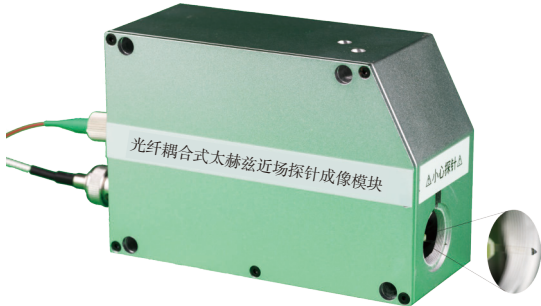


图 4 光纤耦合式太赫兹近场探测模块实物
Fig.4 Photo of optical fiber coupled terahertz near-field detection module

技术就是对近场区域的倏逝波进行收集。将 THz-PCA probe 的针尖放置于距样品表面小于一个波长的距离时,能够突破衍射极限接收到近场信息,实现突破衍射极限的超分辨率成像。探针利用光导原理进行近场信息的耦合提取^[14-15],随后将光信号转变成电流信号,然后经过跨阻放大器(TIA)和 A/D 采样电路,将太赫兹电场信号传递给计算机进行处理。

此外,图 1 所示系统中的光纤飞秒激光器为自主研制,基于半导体可饱和吸收体的被动锁模和啁啾脉冲放大技术,内部光路采用全光纤结构,中心波长 1550 nm,重复频率 100 MHz,采用两端口输出,分别用作泵浦光(pump)和探测光(probe)。激光器内部进行了色散预补偿,可以保障飞秒脉冲经过 2 m 保偏光纤传输后,具有最佳脉宽约 65 fs。其中,泵浦光(pump)经过保偏光纤 C(PMF-C)传输至光纤耦合式太赫兹光电导发射天线(制造商:德国 HHI 研究所,型号:PCA-TD-100-TX-1),到达太赫兹光电导发射天线的飞秒光功率为 30 mW,脉宽 62 fs,测试结果如图 5 所示。

系统中使用的光纤延迟线内部采用自主研制的高精度、高速导轨运动机构驱动角锥反射镜的

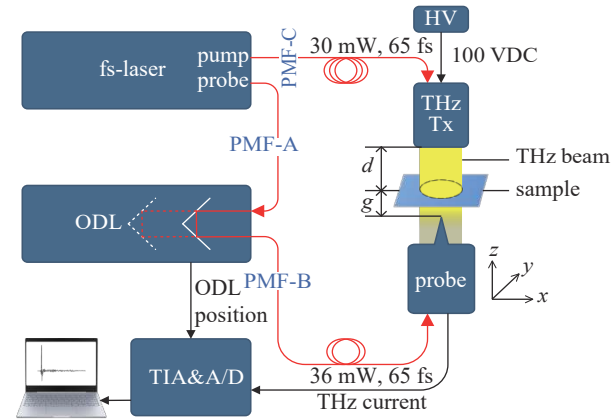


图 1 光纤耦合式太赫兹近场光谱成像系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of fiber-coupled THz near-field spectral imaging system

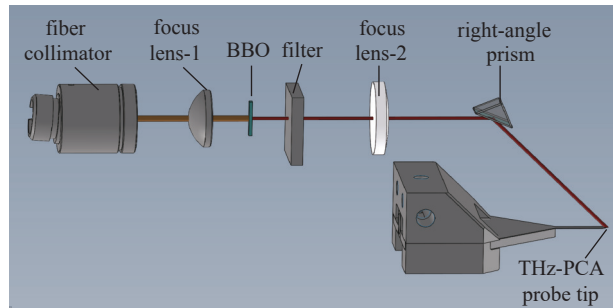


图 2 光纤耦合式太赫兹光电导探针模块内部光路图
Fig.2 Internal optical path diagram of fiber-coupled terahertz photoconductive antenna probe module

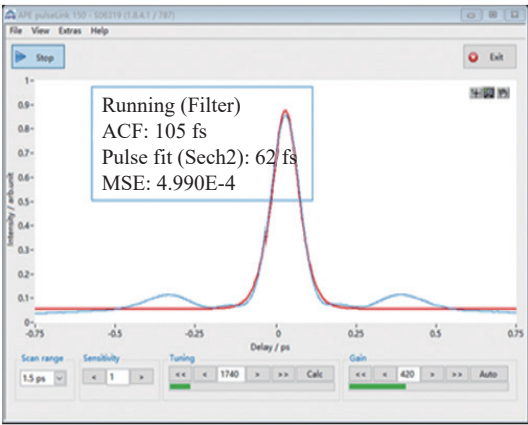


图 5 到达太赫兹光电导发射天线的飞秒脉宽测试结果

Fig.5 Femtosecond pulse width measurement results when the laser reaching the terahertz photoconductive transmitter antenna

往返移动来实现光学延时扫描，最大延时扫描范围超过 400 ps，全程延时扫描时的插损损耗约 (0.7 ± 0.1) dB，实测插损曲线如图 6 所示。该延迟线在 64 ps 范围的扫描速率可以达到 10 Hz，因此可以实现太赫兹时域波形的实时采集。

2 测试结果

图 7 所示为本文研制的全光纤耦合式近场探针光谱成像系统的测试结果。该结果以室内空气为样品，探针针尖与太赫兹辐射源之间的间距为 50 mm，环境温度 25 ℃，湿度 37%。Real-time 表示实时波形，测量时间为 0.1 s；Average 表示 1000 次平均后的波形。从图 7(b) 中可以看到，经过平均后的频谱曲线，频谱宽度覆盖 0.1~2.0 THz，峰值动态范围大于 60 dB。

由于本方案中的太赫兹近场探测模块采用光

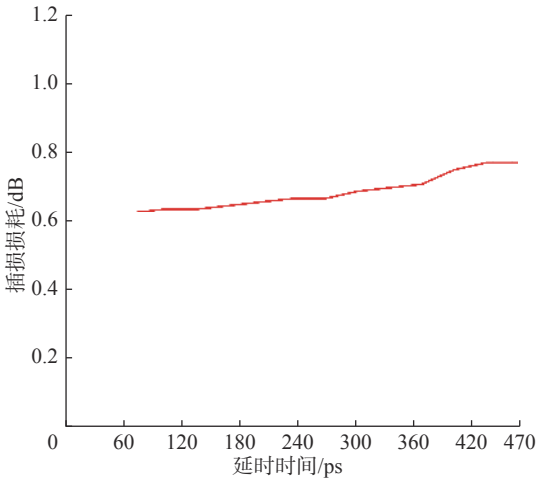
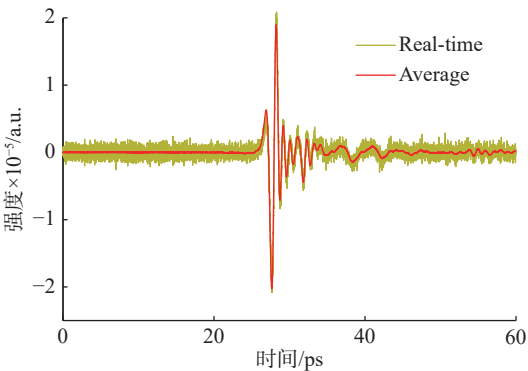


图 6 光学延迟线的插损曲线

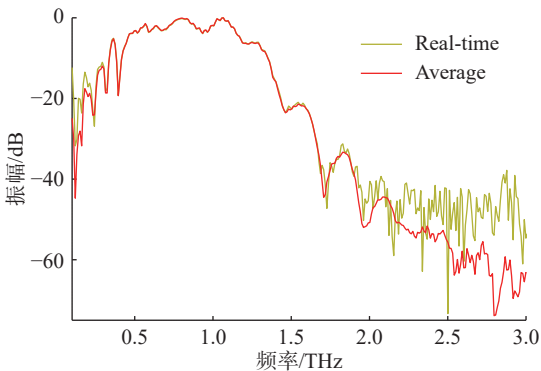
Fig.6 Insertion loss curve of optical delay line

纤耦合方式，因此可以很方便地对探针探测模块进行三维移动，从而测量得到太赫兹光电导天线辐射源的空间场强分布情况。图 8 (a) 所示为将探针模块安装于精密三维移动台上，在 XY 平面以 0.1 mm 为步进进行扫描，根据每一个位置测量得到的太赫兹时域波形信号峰值的平方值，绘图得到的太赫兹光斑二维强度分布图。从图 8 (a) 可以看出：太赫兹辐射源的出射光斑并未理想的圆光斑，而是呈现椭圆形状；从图 8 (b) 所示的 $X=0$ 和 $Y=0$ 的强度分布曲线可以更加直观的看出：太赫兹光斑在水平和垂直方向的半高宽度 (full width at half maximum, FWHM) 分别约为 2.5 mm 和 1.6 mm。

根据太赫兹时域光谱系统的采样原理，对图 7 (a) 所示太赫兹时域波形进行 FFT 变换，即可得到不同频率的强度和相位信息。作为示例，图 9 给出了在频率 f 分别为 0.25, 0.5 和 1 THz 时的 XY 和 XZ 二维相位分布图，可以直观地看出：



(a) 时域波形



(b) 频谱波形

图 7 全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统测试结果

Fig.7 Test results of all fiber-coupled terahertz near field probe spectral imaging system

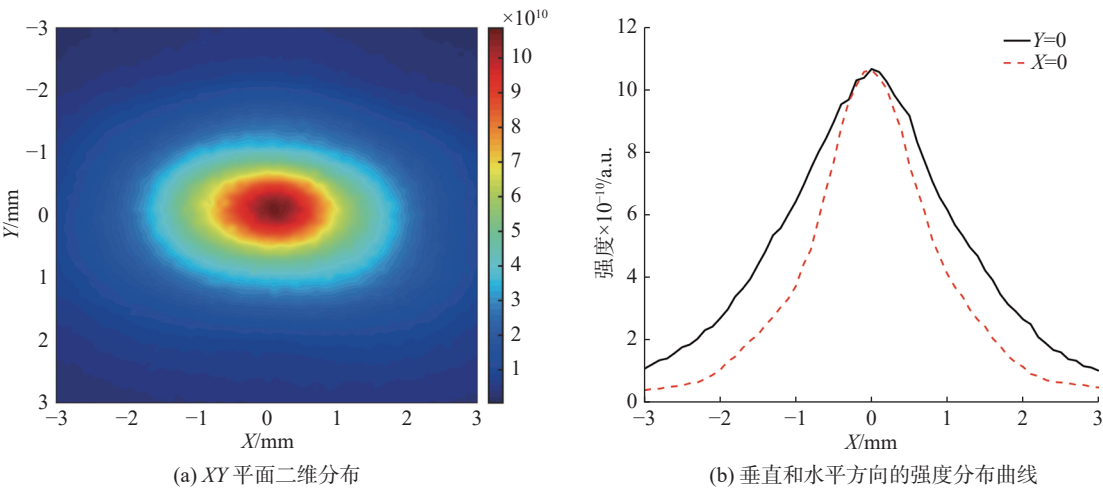


图 8 太赫兹辐射源的电场强度分布图

Fig.8 The electric field strength distribution of terahertz radiation source: (a) two-dimensional distribution; (b) vertical and horizontal distribution curves

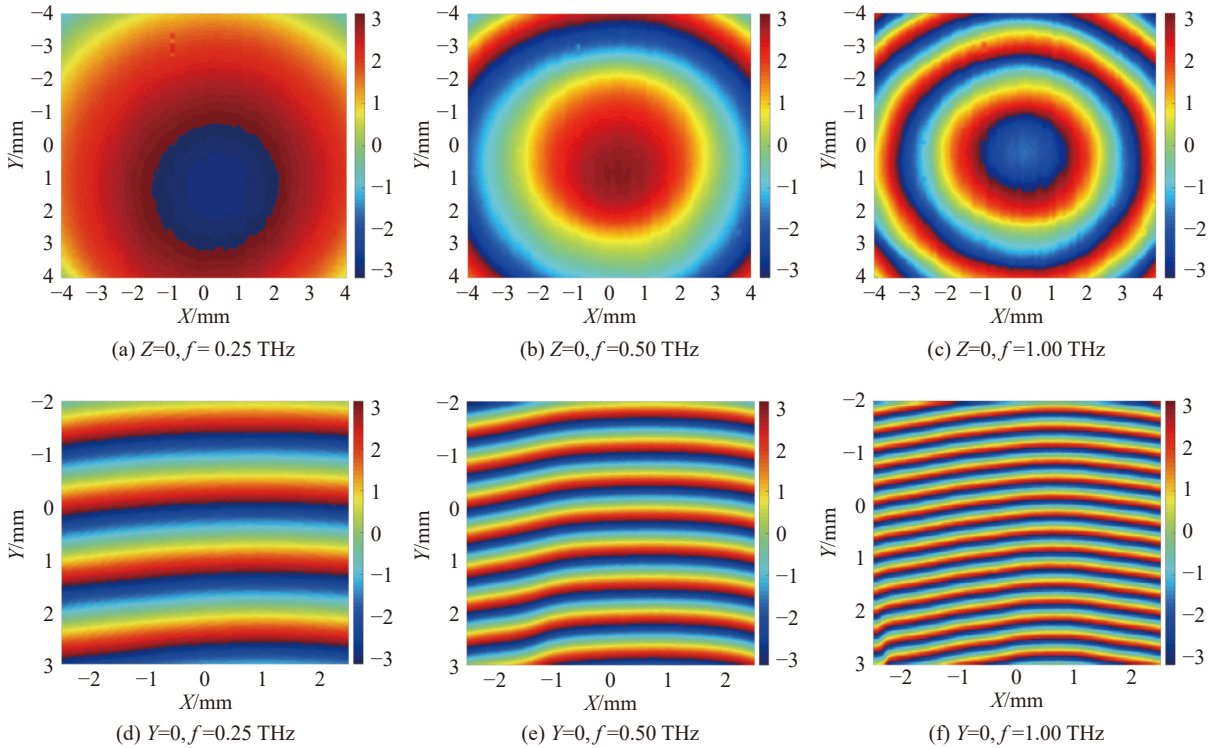


图 9 不同频率的太赫兹相位分布

Fig.9 Terahertz phase distribution at different frequencies.

太赫兹辐射源的光斑在 XY 平面呈现近似圆光斑, 且频率越高光斑直径越小; 在 XZ 平面明显呈现近似水平的等间距条纹变化, 表明了太赫兹辐射源的近似平行光传输特性。

为了检验系统的近场成像分辨率, 本文对图 10 (a) 所示的宽度为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、周期为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的金属条光栅样品进行了太赫兹成像测试。为了保证属于近场成像模式, 探针与样品表面的间距 (即

图 1 中标示的尺寸 g) 尽可能小。成像时保持探针静止, 将样品进行二维扫描运动, 横向和纵向扫描步进长度分别设置为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 和 0.2 mm , 利用每个位置点获得的频谱曲线在 1 THz 位置的强度值绘图, 得到成像结果如图 10 (b) 所示: 可以清晰地分辨样品的金属光栅周期结构, 表明系统的成像分辨率优于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。实际上, 进一步缩小探针与样品表面的间距 g , 理论上能获得更高的成像分辨率。

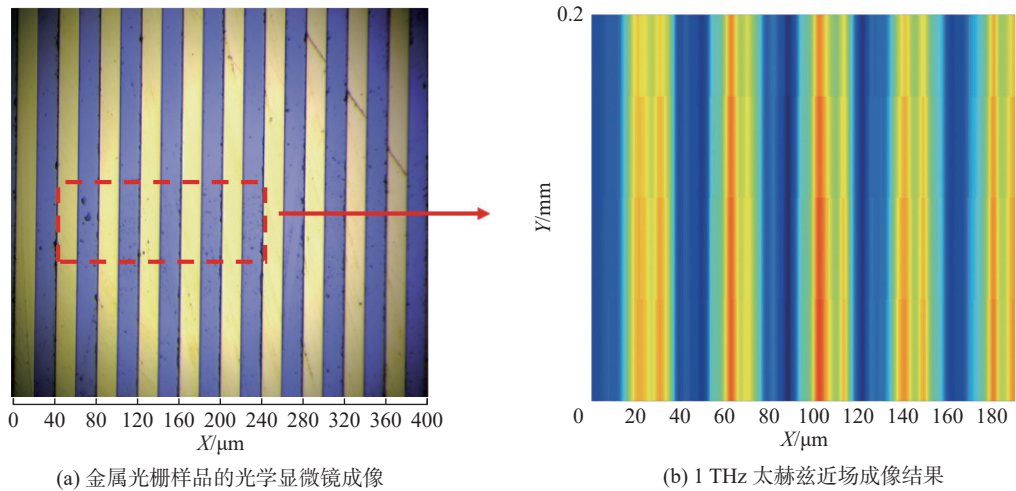


图 10 近场成像分辨率测试用金属光栅样品的光学显微镜成像及 1 THz 太赫兹近场成像结果

Fig.10 Optical microscope imaging of metal grating sample for near-field imaging resolution test and terahertz near-field imaging result at 1 THz.

3 结 论

本文报道了一种全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统。光谱范围覆盖 0.1~2.0 THz，动态范围达到 60 dB，光谱采样速度高达 0.1 s/谱，近场成像分辨率优于 20 μm。不同于已报道的自由空间光路结构的太赫兹近场探针成像系统，本系统采用了全光纤结构设计，太赫兹辐射源和探针式探测器之间可以根据测量需求灵活调节而不需要重新校准光路，极大地提高了系统工作的稳定性、实用方便性。此外，值得说明的是：为了满足对不同偏振态下的太赫兹电场测量需求，本文所设计的光纤耦合式太赫兹近场探针探测模块中，其光电导探针部分的设计采用了可拆卸式光机设计方案，使用者可以方便地更换探测探针。本文的研究为太赫兹科学研究提供了一种高性能且实用性强的太赫兹近场光谱成像测量系统。

参考文献：

[1] 姚建铨. 太赫兹技术及其应用 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2010, 22(6): 703–707.
[2] 牧凯军, 张振伟, 张存林. 太赫兹科学与技术 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(3): 221–230, 237.
[3] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910–928.
[4] MITTLEMAN D M. Twenty years of terahertz imaging [Invited][J]. Optics Express, 2018, 26(8): 9417–9431.
[5] YANG Y P, SHI Y L, YAN W, et al. A new microscopy for THz radiation[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(9): 4079–4083.
[6] MAISSEN C, CHEN S, NIKULINA E, et al. Probes for

ultrasensitive THz nanoscopy[J]. ACS Photonics, 2019, 6(5): 1279–1288.
[7] WÄCHTER M, NAGEL M, KURZ H. Tapered photoconductive terahertz field probe tip with subwavelength spatial resolution[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(4): 041112.
[8] VAN HOOFF N J J, TER HUURNE S E T, RIVAS J G, et al. Time-resolved terahertz time-domain near-field microscopy[J]. Optics Express, 2018, 26(24): 32118–32129.
[9] HUNSCHKE S, KOCH M, BRENER I, et al. THz near-field imaging[J]. Optics Communications, 1998, 150(1-6): 22–26.
[10] 许悦红, 张学迁, 王球, 等. 基于光导微探针的近场/远场可扫描太赫兹光谱技术 [J]. 物理学报, 2016, 65(3): 036803.
[11] GENG G S, DAI G B, LI D D, et al. Imaging brain tissue slices with terahertz near - field microscopy[J]. Biotechnology Progress, 2019, 35(2): e2741.
[12] LI Z X, YAN S H, ZANG Z Y, et al. Single cell imaging with near-field terahertz scanning microscopy[J]. Cell Proliferation, 2020, 53(4): e12788.
[13] 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.
[14] GALLAGHER W J, CHI C C, DULING I N III, et al. Subpicosecond optoelectronic study of resistive and superconductive transmission lines[J]. Applied Physics Letters, 1987, 50(6): 350–352.
[15] GRISCHKOWSKY D, KEIDING S, VAN EXTER M, et al. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(10): 2006–2015.