

探针发射 - 探针探测型太赫兹近场成像系统

王锐思¹, 李高鹏², 刘 熊³, 王 谦³, 邹滨阳³, 袁英豪^{1*}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

²博太赫兹信息科技(武汉)有限公司, 湖北 武汉

³国家电网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆

收稿日期: 2025年4月22日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

研制了一种采用全光纤耦合光路设计的探针发射 - 探针探测型太赫兹近场成像系统, 其特点在于: 系统中的太赫兹辐射源和探测器均采用了探针式光电导天线, 这在国内尚属首次报道。测试结果表明: 系统的光谱范围覆盖0.1~1.0 THz, 动态范围达到45 dB; 利用光电导探测探针对光电导发射探针产生的太赫兹波空间场分布进行了微米级高分辨率成像, 表明光电导发射探针产生的太赫兹波以近似球面波形式向自由空间传播; 将微带线样品靠近光电导发射探针的针尖时, 微带线会显著影响太赫兹波在发射探针和探测探针之间的传输模式。本系统为太赫兹频段的超表面器件等相关领域的科学研究提供了一种高效便捷的测量手段。

关键词

太赫兹近场成像, 光电导探针, 太赫兹时域光谱

Probe Emission-Probe Detection Type Terahertz Near-Field Imaging System

Ruisi Wang¹, Gaopeng Li², Xiong Liu³, Qian Wang³, Binyang Zou³, Yinghao Yuan^{1*}

¹School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²B-THz Information Technology (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan Hubei

³State Grid Chongqing Electric Power Company Electric Power Research Institute, Chongqing

Received: Apr. 22nd, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

A probe emission-probe detection type terahertz near-field imaging system with an all-fiber-

*通讯作者。

文章引用: 王锐思, 李高鹏, 刘熊, 王谦, 邹滨阳, 袁英豪. 探针发射-探针探测型太赫兹近场成像系统[J]. 应用物理, 2025, 15(5): 374-383. DOI: 10.12677/app.2025.155043

coupled optical design was developed. The system is characterized by the use of probe-type photoconductive antennas for both the terahertz radiation source and detector, which was reported for the first time domestically. Test results show that the system covers a spectral range of 0.1~1.0 THz with a dynamic range of 45 dB. Used the photoconductive detection probe, high-resolution imaging at the micrometer level was performed on the spatial field distribution of the terahertz waves generated by the photoconductive emission probe, revealing that the terahertz waves propagate in free space in an approximately spherical wave form. When a microstrip line sample was brought close to the tip of the photoconductive emission probe, the microstrip line significantly affected the transmission mode of terahertz waves between the emission probe and the detection probe. This system provides an efficient and convenient measurement tool for scientific research in related fields such as terahertz-frequency metasurface devices.

Keywords

Terahertz Near-Field Imaging, Photoconductive Probe, Terahertz Time-Domain Spectroscopy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太赫兹时域光谱成像技术凭借其独特的穿透能力、超快时间分辨率,以及超宽带光谱测量能力,使其在精密光谱分析、无损检测等领域展现出广阔的应用价值[1]-[3]。然而,受限于太赫兹的波长较长(1 THz~300 μm),传统太赫兹成像系统的分辨率被限制在亚毫米量级,无法满足细微结构和纳米尺度物质分析等测量领域中对空间分辨率的要求。为了突破衍射极限,实现更高的空间分辨率,研究人员提出了孔径型、电光晶体直接探测型、散射型、光电导探针型等多种太赫兹近场成像技术。

孔径型近场成像技术通过在样品表面附近放置一个尺寸远小于太赫兹波长的物理孔径来实现超衍射极限的空间分辨率。Hunsche 等人首次利用金属薄膜上的亚波长孔径限制太赫兹波,实现了基于孔径的太赫兹近场成像,成功突破了衍射极限[4]。X. Wang 等人利用飞秒激光在空气中产生的等离子体作为动态孔径调制太赫兹波,实现了高分辨率、灵活可控的近场成像[5]。电光晶体直接探测型近场成像技术是一种基于电光效应的太赫兹近场成像方法,通过将电光晶体紧贴样品来直接近场探测太赫兹波的电场分布,实现高分辨率成像。X. Wang 等人采用 ZnTe 作为探测晶体,首次实现了基于电光效应的太赫兹近场成像技术[6]。Blanchard 等人使用 20 μm 厚的 LiNbO₃ 电光晶体,在 0.7 THz 下实现了 14 μm ($\lambda/30$)的空间分辨率[7]。

散射型近场成像和光电导探针型近场成像是目前已报道形成实用化商业产品最多的太赫兹近场成像技术。散射型近场成像技术基于探针散射原理,通过尖锐探针散射样品近场的太赫兹波,突破衍射极限,实现超高空间分辨率。散射型扫描近场成像系统主要分为基于原子力显微镜(Atomic force microscope, AFM)和基于扫描隧道显微镜(Scanning tunneling microscope, STM)的两种类型。在 AFM-based 散射型近场成像方面,Huber 等人首次将 AFM 探针应用于太赫兹近场成像,成功对半导体晶体管进行成像,在 2.54 THz 频率下实现了 40 nm ($\lambda/3000$)的空间分辨率[8]。随后,Maissen 等人通过使用顶点半径为 6 nm 的钨针尖,进一步将空间分辨率提升至优于 15 nm [9]。在 STM-based 散射型近场成像方面,Cocker 团队首次将 STM 探针与太赫兹波结合,成功对 InAs 纳米颗粒进行成像,系统空间分辨率达到 2 nm [10]。Jelic 团队开发的 THz-STM 系统更是实现了 0.3 nm 的超高空间分辨率,能够对硅表面上的单个原子进行成像[11]。散射型近场成像虽能实现纳米级的成像空间分辨率,但是对样品表面平整度要求极高。探测表面粗

糙的样品,容易导致 AFM 探针损坏、STM 隧道电流不稳定;对于 THz-STM,此技术无法测量绝缘样品,这也在一定程度上限制了其应用范围。另一种基于光电导探针的太赫兹近场成像系统虽仅能够实现微米级的分辨率成像,但其显著降低了对实验环境的要求且价格相对低廉,所以在超表面器件研究等需要以微米级分辨率测量太赫兹空间调制场分布的领域中被广泛使用。光电导探针型近场成像系统将传统远场 THz-TDS 系统中的探测天线替换为光电导探测探针,通过探针针尖扫描探测样品表面近场区域,利用微米级尺寸的针尖实现微米级空间分辨率。例如:Wächter 等人设计的锥形光电导探针,实现了对 $10\text{ }\mu\text{m}$ 宽的金属结构的分辨,且带宽达到了 2 THz [12]。Sawallich 等人研制的直接工作于 1550 nm 飞秒激光脉冲的太赫兹光电导近场探针,空间分辨率可达 $10\text{ }\mu\text{m}$ [13]。吉林大学使用基于光电导探针的太赫兹时域光谱扫描成像系统对小鼠脑组织切片进行成像,校准空间分辨率为几微米[14]。重庆应用物理中心开发了一种高性能的光电导探针近场扫描成像系统,成功对单个细胞进行成像,空间分辨率高达 $3\text{ }\mu\text{m}$ [15]。上海理工大学研制了一种全光纤耦合式的太赫兹近场探针光谱成像系统,极大地提高了系统的工作稳定性,形成了一套实用性很高的太赫兹近场成像系统[16]。目前,国内博太赫兹公司也采用光电导探针开发了商业化的太赫兹近场成像仪产品(型号: BT-FTNS2000) [17]。

上述这些已报道的基于太赫兹光电导探测探针的近场成像系统,其太赫兹发射端均采用普通的光电导天线,只有探测端采用了光电导近场探针。尽管该方法可以对太赫兹空间场分布进行微米级测量,但是在某些实验场景中需要把太赫兹波更加有效的耦合进入微带线、拓扑波导等超表面器件。若使用传统的光电导天线辐射源,耦合效率通常极低。为了提高耦合效率,业界最新研制了光电导发射探针来产生太赫兹波,通过将样品靠近发射探针,可以有效的把空间辐射的太赫兹波耦合进入微带线中,实现探针发射-探针探测模式下的太赫兹时域波形测量。这种探针发射-探针探测型的太赫兹近场成像系统目前还没有商业化的产品报道;文献[18]中报道了类似的实验装置,但是采用了复杂的自由空间光路设计,使用非常不便。本文在前期全光纤耦合式太赫兹近场探针光谱成像系统的工作基础上[16],通过将发射端替换为光电导探针型辐射源,形成了一套采用光纤耦合式光路设计的探针发射-探针探测型太赫兹近场成像系统,这在国内尚属首次报道。

2. 系统方案

本文研制的光纤耦合探针发射-探针探测型太赫兹近场成像系统主要由光纤飞秒激光器(fs-laser)、光纤延迟线(ODL)、光纤耦合式光电导发射探针模块(Tx)、光纤耦合式光电导近场探测模块(Rx)、综合控制主机(内部集成了前置电流放大器(TIA)和 A/D 数据采集卡)等组成。整套系统与前期报道的太赫兹近场探针光谱成像系统结构类似[16],最大的区别在于本系统将发射端的光电导天线太赫兹辐射源替换成了光电导发射探针,以便实现太赫兹辐射源与样品间的近场发射。整个系统光路如图 1 所示:从飞秒激光器输出的两束飞秒激光脉冲分别为泵浦光(pump,中心波长 1550 nm)和探测光(probe),泵浦光经过保偏光纤(PMF)传输后,以 FC/APC 接头形式连接至光电导发射探针模块,针尖受光激发产生太赫兹脉冲。探测光经过保偏光纤和光纤延迟线传输后,也以 FC/APC 接头形式连接至光电导近场探测模块,探测模块外接信号线与综合控制主机相连。

上述光电导发射探针是德国 Protomics 公司生产的 TD-1550-Y-BF 型探针[19]。当使用满足激励条件的激光照射至探针的 InGaAs 微悬臂针尖表面时,受光激发探针会直接产生太赫兹脉冲。实验中使用的激光参数为:波长 780 nm ,脉宽 100 fs ,重复频率 100 MHz ,平均功率约 3 mW ,汇聚至探针针尖位置的光斑直径约 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。探测模块中使用的太赫兹光电导探针是 Protomics 公司生产的 TD-800-X-HR 型探针[19]。探测探针的针尖尺寸为微米级,因此以微米级尺度探测空间太赫兹电场。系统中使用的是博太赫兹公司的通用型 THz-TDS 综合控制主机(型号: BT-FTS5500)来控制 ODL 的扫描运动,并同步采集探测探针输出的太赫兹电流信号,然后经过前置电流放大器和 A/D 采样电路再传递给计算机,实现对探测探针扫描

点太赫兹场的测量。

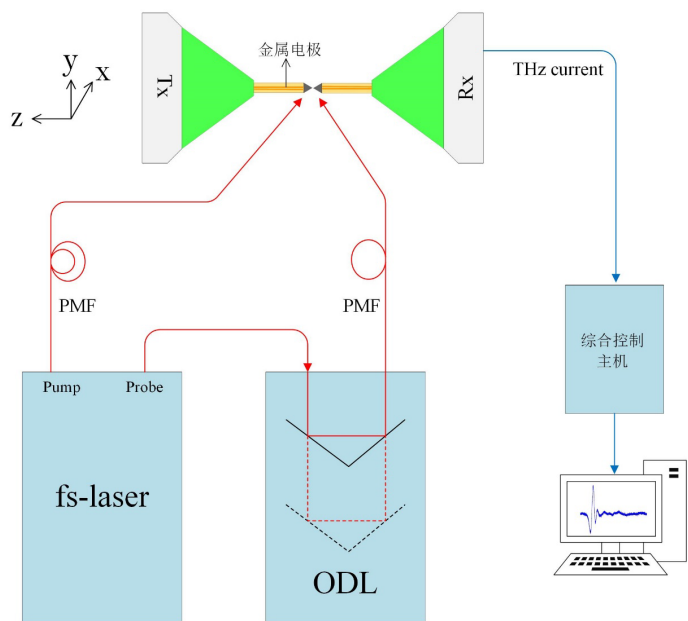


Figure 1. Schematic diagram of probe emission-probe detection type terahertz near-field imaging system
图 1. 探针发射 - 探针探测型太赫兹近场成像系统示意图

为了对太赫兹空间场分布进行逐点扫描采集，需要光电导发射探针或探测探针安装在三维位移台上扫描运动。为了保障探针移动过程中激光始终保持入射探针针尖特定位置，我们将光电导发射探针和探测探针进行了光纤耦合工艺封装[16]，形成了如图 2 所示的光纤耦合式发射模块和探测模块。为验证系统性能，我们将探测端模块安装于电控三维位移台上以调整发射探针和探测探针间的间距，通过电控扫描方式实现对发射探针产生的太赫兹脉冲的空间场分布的精细测量。

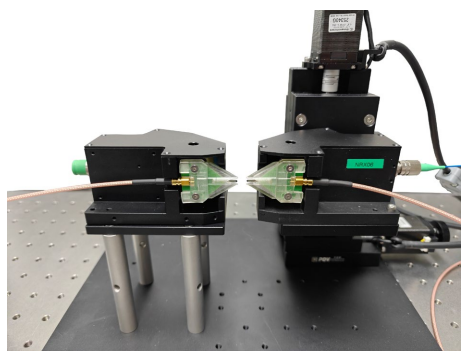


Figure 2. Photo of fiber-coupled emission module and detection module
图 2. 光纤耦合式发射模块和探测模块

3. 测试结果

为了便于描述测试结果，如图 3 所示，定义光电导探针金属电极所在平面为 YZ 平面，其中 Z 轴与金属电极平行，Y 轴与金属电极垂直；定义 Z 表示两个探针针尖之间的间距；当探针针尖正对时，设定 $X = 0$ ， $Y = 0$ 。

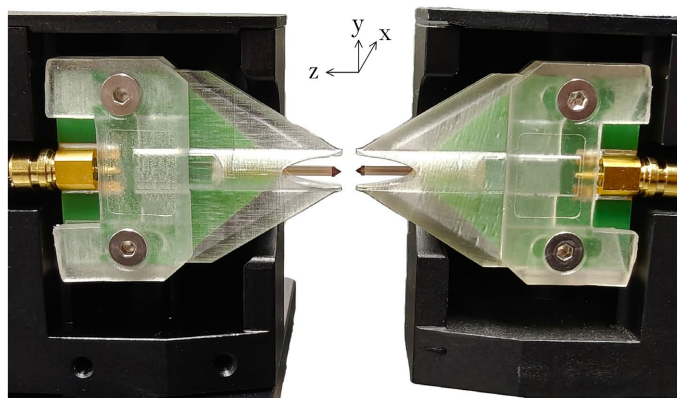


Figure 3. Photo of photoconductive emission probe and detection probe
图 3. 光电导发射探针和探测探针

图 4 所示为光纤耦合探针发射 - 探针探测型太赫兹近场成像系统的时域波形和频域波形的测试结果。分别测试了两探针针尖正对时 $Z = 800\ \mu\text{m}$ 、 $2800\ \mu\text{m}$ 和 $4800\ \mu\text{m}$ 等不同条件下的太赫兹信号情况。从图 4(a)中可以看到, $Z = 800\ \mu\text{m}$ 时, 时域波形峰峰值最大, 信号最好; 随着探针针尖间距的不断增大, 时域波形信号不断衰弱; 相邻波形峰值间距 $6.66\ \text{ps}$, 刚好对应了 $2\ \text{mm}$ 光程所引起的光学延时。从图 4(b)中可以看出: $Z = 800\ \mu\text{m}$ 时, 频谱宽度 $1.0\ \text{THz}$, 动态范围达 $45\ \text{dB}$, 信号最好; $Z = 2800\ \mu\text{m}$ 时, 频谱宽度 $0.95\ \text{THz}$, 动态范围约为 $38\ \text{dB}$; $Z = 4800\ \mu\text{m}$ 时, 频谱宽度 $0.87\ \text{THz}$, 动态范围约为 $35\ \text{dB}$; 频谱信号的强度也随着探针针尖间距的增大而变弱。图 5 所示为将探测模块安装于电控三维位移台上, 对 XY 平面 $10 \times 10\ \text{mm}$ 的范围以 $0.1\ \text{mm}$ 为步进长度进行扫描, 根据每个扫描点测量得到的太赫兹时域波形信号峰峰值的平方值, 绘图得到太赫兹光斑在 XY 平面的二维强度分布图。我们分别测量了 $Z = 800\ \mu\text{m}$ 、 $2800\ \mu\text{m}$ 和 $4800\ \mu\text{m}$ 三种不同条件下的太赫兹光斑强度分布情况。从图 5 中可以看到, 太赫兹光斑并不是理想的圆光斑, 而是呈椭圆形; 太赫兹光斑大小随着探针针尖间距拉大也不断增大。图 6 所示为三种不同探针间距下太赫兹光斑在垂直($X = 0$)和水平方向($Y = 0$)的强度分布曲线。太赫兹光斑呈椭圆形的特性亦可从图中看出: $Z = 800\ \mu\text{m}$ 时, 太赫兹光斑在垂直和水平方向的半高宽度分别约为 $1.4\ \text{mm}$ 和 $2.07\ \text{mm}$; $Z = 2800\ \mu\text{m}$ 时, 垂直和水平方向半高宽约为 $3.08\ \text{mm}$ 和 $4.99\ \text{mm}$; $Z = 4800\ \mu\text{m}$ 时, 垂直和水平方向半高宽约为 $5.92\ \text{mm}$ 和 $6.47\ \text{mm}$; 同时也表明了太赫兹辐射源的发散传输特性。

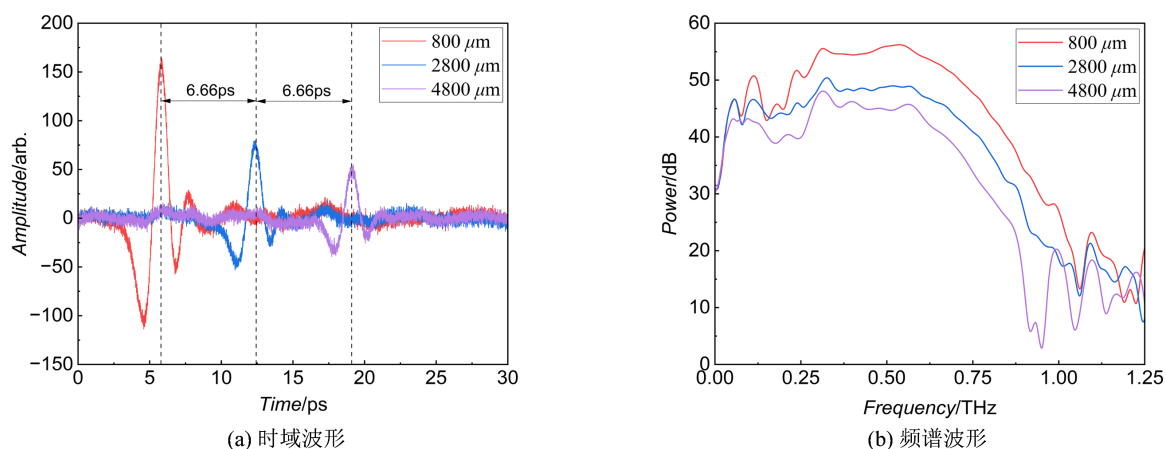


Figure 4. Terahertz time-domain waveforms and frequency-domain waveforms at three different probe spacing conditions
图 4. 三种不同探针间距条件下的太赫兹时域波形和频谱波形情况

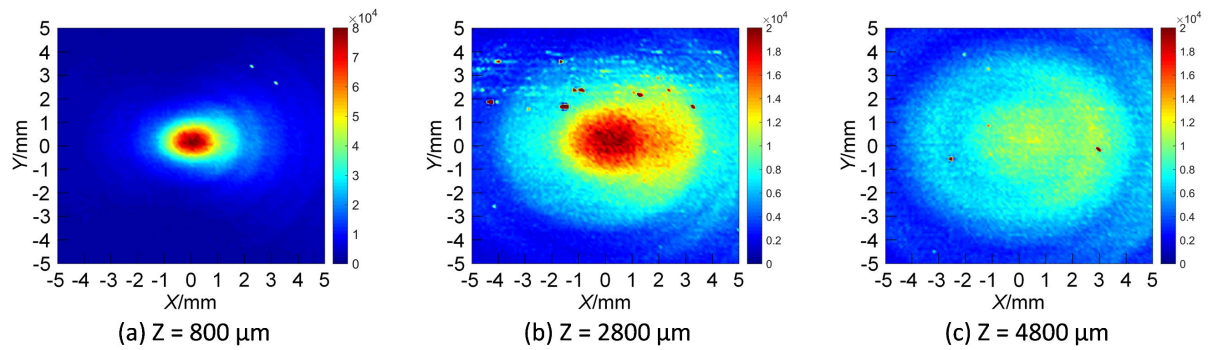


Figure 5. The XY plane two-dimensional intensity distribution of terahertz facula at three different probe spacing conditions

图 5. 三种不同探针间距条件下的太赫兹光斑 XY 平面二维强度分布

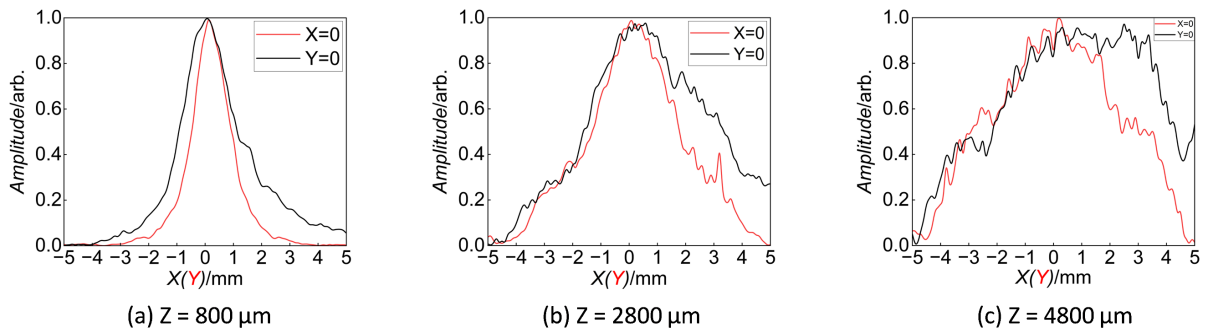


Figure 6. Vertical and horizontal intensity distribution curves of terahertz facula at three different probe spacing conditions

图 6. 三种不同探针间距条件下的太赫兹光斑垂直和水平方向强度分布曲线

根据太赫兹时域光谱系统的采样原理,对图 4(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。我们分别测量了 0.20 THz、0.46 THz 和 0.72 THz 等不同频率时三种不同探针间距条件下的太赫兹相位分布情况。图 7 所示为频率 $f = 0.20$ THz 时三种探针间距下的 XY 平面的太赫兹相位分布,从图中可以看出:太赫兹波在 XY 平面近似呈同心圆形状并以球面波形式向外辐射;太赫兹光斑大小随探针间距增大而增大。图 8、图 9 所示分别为频率 $f = 0.46$ THz 和 $f = 0.72$ THz 时的太赫兹相位分布。对比图 7(a)、图 8(a)、图 9(a): $f = 0.20$ THz 时,同心圆环纹密度最小最稀疏; $f = 0.72$ THz 时,密度最大最密集;同一探针间距条件下,频率越高,太赫兹相位分布波纹越密集。

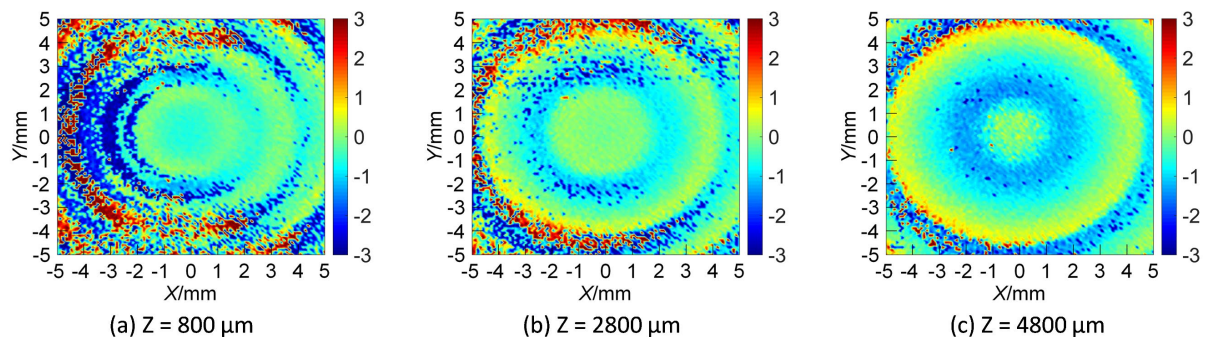


Figure 7. Terahertz phase distribution at $f = 0.20$ THz at three different probe spacing conditions

图 7. $f = 0.20$ THz 时三种不同探针间距条件下的太赫兹相位分布

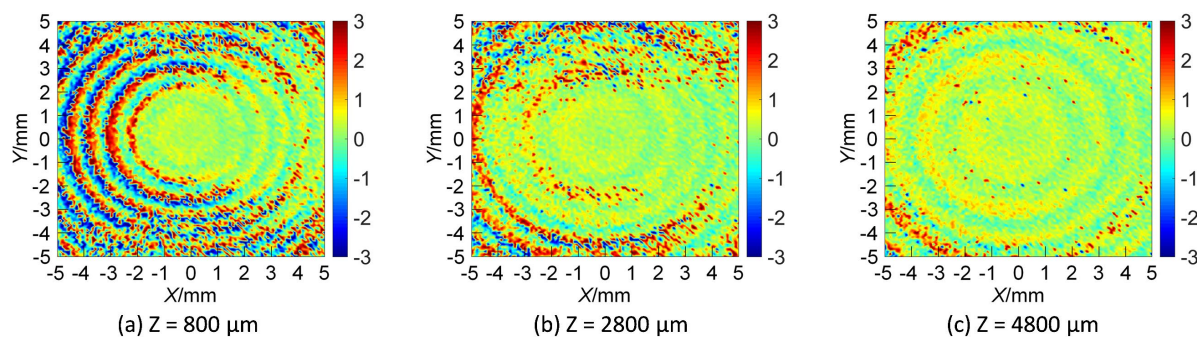


Figure 8. Terahertz phase distribution at $f = 0.46$ THz at three different probe spacing conditions

图 8. $f = 0.46$ THz 时三种不同探针间距条件下的太赫兹相位分布

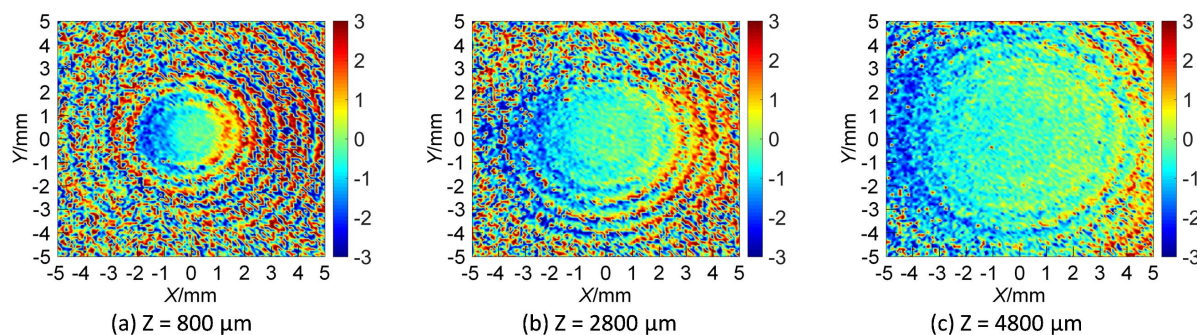


Figure 9. Terahertz phase distribution at $f = 0.72$ THz at three different probe spacing conditions

图 9. $f = 0.72$ THz 时三种不同探针间距条件下的太赫兹相位分布

为了测试与探针平行的平面(YZ)的太赫兹空间场分布, 在 $X = 0$ 时, 对 YZ 平面 8×8 mm 的范围以 0.1 mm 为步进长度进行扫描, 并根据每个扫描点测量得到的时域数据和频域相位数据, 绘图得到了图 10 所示的太赫兹光斑在 YZ 平面的二维强度分布图和 $f = 0.20$ THz 时的相位图。从图 10 中可以看到, 太赫兹波以类似点源辐射形式向外发散, 且强度不断衰减; 太赫兹相位分布呈同心圆环状向外发散。综合上述 XY 面和 YZ 面的测试结果表明: 光电导发射探针产生的太赫兹波, 以近似球面波形式向自由空间传播。

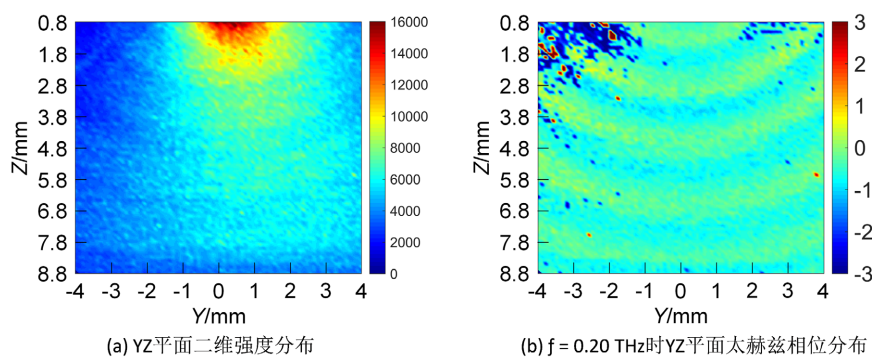


Figure 10. The intensity and phase distribution of terahertz facula in the parallel plane of probe (YZ plane)

图 10. 探针平行面 YZ 面太赫兹光斑的强度和相位分布

为了检验光电导发射探针产生的自由空间太赫兹波与超表面等器件的耦合效果, 我们在光电导发射探针和探测探针之间放置了微带线(Microstrip line, MSL)样品, 对比测试了样品与探针不同间距下的太赫

兹波耦合传输情况。实验方案如图 11 下：将光电导发射探针垂直于微带线样品，使发射探针产生的太赫兹脉冲耦合进入微带线，并通过微带线传输；在微带线的另一端用探测探针接收太赫兹脉冲。图 12 中所示的样品包含 13 个平行 MSL，每个 MSL 的长度为 15 mm，宽度为 30 μm ；这些线被放置在 4.5 mm $\times$ 15 mm 的单个芯片上；该样品基板包含 Au 基研磨平面及 57 μm 厚的聚丙烯(Polypropylene)介电层，其中 57 μm 厚的聚丙烯介电层由 37 μm 厚的聚丙烯顶层和 20 μm 厚的共聚物丙烯酸酯胶粘剂(Copolymer acrylate adhesive)层组成。发射探针与探测探针的间距为 $G = 7 \text{ mm}$ ；发射探针与微带线样品的间距为 H 。图 13 为不同 H 条件下，MSL 耦合传输的太赫兹脉冲的时域波形信号。其中，无样品条件下的时域波形视为参考波形，即接收探针所能直接接收的空间太赫兹辐射脉冲，通过对比不同 H 条件下的时域波形与无样品条件下的时域波形，验证太赫兹脉冲与 MSL 样品的耦合情况。从图 13(a)中可以看出： $H = 500 \sim 1000 \mu\text{m}$ 时，太赫兹时域波形的主峰强度随 H 的增大而不断升高，表明激发形成了沿 MSL 传输的表面波模式； $H = 1000 \mu\text{m}$ 时，太赫兹脉冲耦合进入 MSL 样品的效率最高。从图 13(b)中可以看到， $H = 1500 \mu\text{m}$ 时，时域波形主峰相较于参考波形增大，相较于 $H = 1000 \mu\text{m}$ 时减小； $H = 2000$ 、 $3000 \mu\text{m}$ 时的时域波形主峰与参考波形重合，且有向下的次峰，通过延时可以判断次峰由 MSL 样品表面反射回来的太赫兹脉冲所造成。通过对图 13 的分析可以得出以下结论： $H = 500 \sim 1000 \mu\text{m}$ 时，太赫兹脉冲耦合进入 MSL 样品的效率随 H 增加不断提高， $H = 1000 \mu\text{m}$ 时达到最高，为最有效的 MSL 表面波传输模式的激发距离； $H = 1000 \sim 1500 \mu\text{m}$ 时，耦合效率开始下降； $H = 2000 \mu\text{m}$ 之后的时域波形主峰与参考波形重合，表明没有激发形成 MSL 的表面波传输模式。

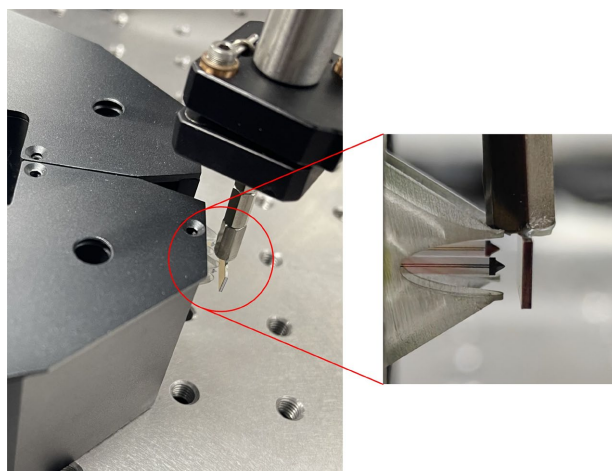


Figure 11. Photo of the microstrip line sample testing

图 11. 微带线样品测试实物图

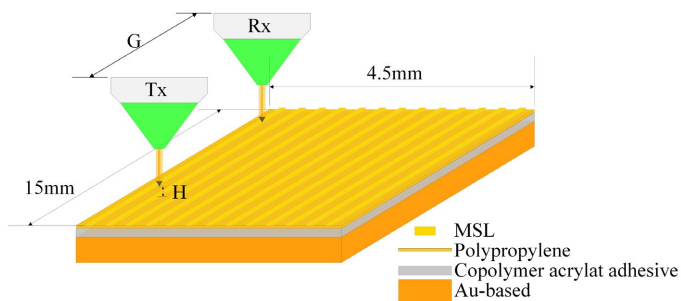


Figure 12. Schematic diagram of the microstrip line sample structure

图 12. 微带线样品结构示意图

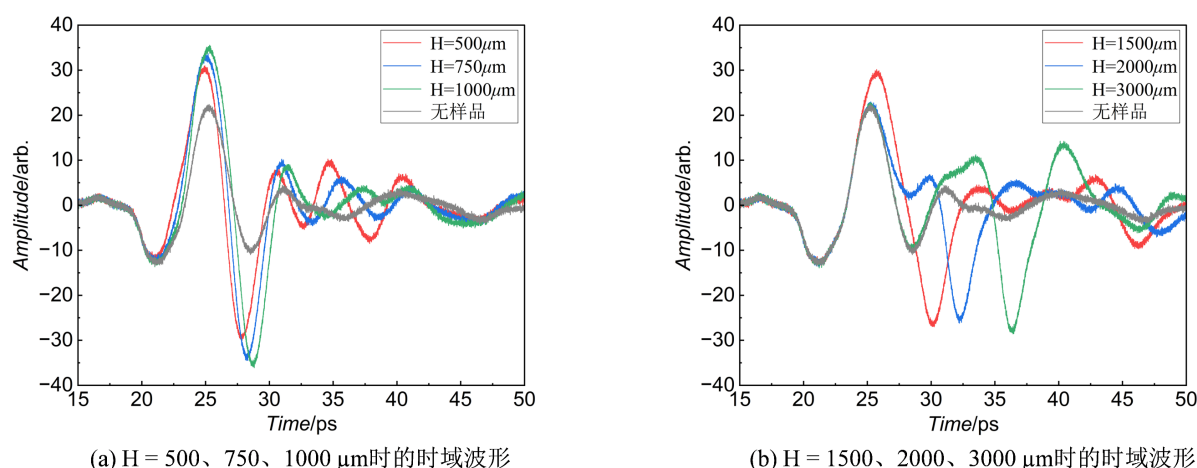


Figure 13. Terahertz time-domain waveforms with multiple different spacing H of emission probe and MSL

图 13. 发射探针与 MSL 多种不同间距 H 条件下的太赫兹时域波形情况

4. 结论

本文首次报道了一种基于光电导发射探针的光纤耦合式的探针发射-探针探测型太赫兹近场成像系统。系统光谱范围覆盖 $0.1 \sim 1.0 \text{ THz}$ ，动态范围达到 45 dB 。通过将发射或探测探针安装在电控三维位移台上，实现了对太赫兹波的空间场分布的微米级分辨率扫描成像。得益于光电导发射探针针尖的微米级尺寸设计，将微带线样品靠近探针针尖时，发射探针产生的空间太赫兹波可以耦合到微带线中传输。本系统为在太赫兹波段开展对微带线、拓扑波导等超表面器件的科学研究提供了一种高效便捷的测量手段。

基金项目

国家电网公司总部科技项目(5108-202218280A-2-361-XG)。

参考文献

- [1] Němec, H., Kužel, P. and Sundström, V. (2010) Charge Transport in Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion Studied by Time-Resolved Terahertz Spectroscopy. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **215**, 123-139. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2010.08.006>
- [2] Yakovlev, E.V., Zaytsev, K.I., Chernomyrdin, N.V., Gavdush, A.A., Zotov, A.K., Nikonovich, M.Y., et al. (2016) Non-destructive Testing of Composite Materials Using Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *SPIE Proceedings*, Brussels, 29 April 2016, 201-207. <https://doi.org/10.1117/12.2227321>
- [3] Fu, X., Liu, Y., Chen, Q., Fu, Y. and Cui, T.J. (2022) Applications of Terahertz Spectroscopy in the Detection and Recognition of Substances. *Frontiers in Physics*, **10**, Article 869537. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.869537>
- [4] Hunsche, S., Koch, M., Brener, I. and Nuss, M.C. (1998) THz Near-Field Imaging. *Optics Communications*, **150**, 22-26. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(98\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(98)00044-3)
- [5] Wang, X., Ye, J., Sun, W., Han, P., Hou, L. and Zhang, Y. (2022) Terahertz Near-Field Microscopy Based on an Air-Plasma Dynamic Aperture. *Light: Science & Applications*, **11**, Article No. 129. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00822-8>
- [6] Wang, X., Cui, Y., Hu, D., Sun, W., Ye, J. and Zhang, Y. (2009) Terahertz Quasi-Near-Field Real-Time Imaging. *Optics Communications*, **282**, 4683-4687. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.09.004>
- [7] Blanchard, F., Doi, A., Tanaka, T., Hirori, H., Tanaka, H., Kadoya, Y., et al. (2011) Real-Time Terahertz Near-Field Microscope. *Optics Express*, **19**, 8277-8284. <https://doi.org/10.1364/oe.19.008277>
- [8] Huber, A.J., Keilmann, F., Wittborn, J., Aizpurua, J. and Hillenbrand, R. (2008) Terahertz Near-Field Nanoscopy of Mobile Carriers in Single Semiconductor Nanodevices. *Nano Letters*, **8**, 3766-3770. <https://doi.org/10.1021/nl802086x>
- [9] Maissen, C., Chen, S., Nikulina, E., Govyadinov, A. and Hillenbrand, R. (2019) Probes for Ultrasensitive THz

- Nanoscopy. *ACS Photonics*, **6**, 1279-1288. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b00324>
- [10] Cocker, T.L., Jelic, V., Gupta, M., Molesky, S.J., Burgess, J.A.J., Reyes, G.D.L., *et al.* (2013) An Ultrafast Terahertz Scanning Tunnelling Microscope. *Nature Photonics*, **7**, 620-625. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.151>
- [11] Jelic, V., Iwaszczuk, K., Nguyen, P.H., Rathje, C., Hornig, G.J., Sharum, H.M., *et al.* (2017) Ultrafast Terahertz Control of Extreme Tunnel Currents through Single Atoms on a Silicon Surface. *Nature Physics*, **13**, 591-598. <https://doi.org/10.1038/nphys4047>
- [12] Wächter, M., Nagel, M. and Kurz, H. (2009) Tapered Photoconductive Terahertz Field Probe Tip with Subwavelength Spatial Resolution. *Applied Physics Letters*, **95**, Article 041112. <https://doi.org/10.1063/1.3189702>
- [13] Sawallich, S., Globisch, B., Matheisen, C., Nagel, M., Dietz, R.J.B. and Gobel, T. (2016) Photoconductive Terahertz Near-Field Detectors for Operation with 1550-Nm Pulsed Fiber Lasers. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, **6**, 365-370. <https://doi.org/10.1109/tthz.2016.2549365>
- [14] Geng, G., Dai, G., Li, D., Zhou, S., Li, Z., Yang, Z., *et al.* (2018) Imaging Brain Tissue Slices with Terahertz Near-Field Microscopy. *Biotechnology Progress*, **35**, e2741. <https://doi.org/10.1002/btpr.2741>
- [15] Li, Z., Yan, S., Zang, Z., Geng, G., Yang, Z., Li, J., *et al.* (2020) Single Cell Imaging with Near-Field Terahertz Scanning Microscopy. *Cell Proliferation*, **53**, e12788. <https://doi.org/10.1111/cpr.12788>
- [16] 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.
- [17] <https://www.b-thz.com/product/terahertz-near-field-imaging-system-based-on-photoconductive-probe>
- [18] Yang, Q., Wang, D., Kruk, S., Liu, M., Kravchenko, I., Han, J., *et al.* (2022) Topology-Empowered Membrane Devices for Terahertz Photonics. *Advanced Photonics*, **4**, Article 046002. <https://doi.org/10.1117/1.ap.4.4.046002>
- [19] TeraSpike Microprobe Series. <https://protemics.com/index.php/products/teraspike-nfm>