

文章编号: 2095-4980(2021)05-0784-10

## 太赫兹近场成像技术及进展

王倩倩, 崔 彬\*, 杨玉平

(中央民族大学 理学院, 北京 100081)

**摘 要:** 太赫兹(THz)波具有能量低、穿透性强、频带宽等特点, 因而太赫兹成像技术在无损检测、生物医药、安全检测等众多领域得到了广泛应用, 在实际应用中如何提高太赫兹成像的分辨力变得越来越重要。由于太赫兹近场成像技术可突破衍射极限, 获得分辨力为亚微米甚至是纳米量级的高质量图像, 基于近场技术的高分辨 THz 成像技术相继被提出, 并得到了进一步的应用。本文首先阐述了太赫兹近场成像的基本原理; 其次总结了近场成像进展及增强方法; 最后对太赫兹近场成像的未来进行了展望。

**关键词:** 太赫兹; 近场成像; 分辨力

**中图分类号:** TH742.9

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021267

## Terahertz near-field imaging technology and its development

WANG Qianqian, CUI Bin\*, YANG Yuping

(School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Because terahertz(THz) waves have the characteristics of low energy, strong penetration, and broad bandwidth, terahertz imaging technology has been widely used in many fields such as non-destructive testing, biomedicine, and safety testing. How to improve the resolution of terahertz imaging in practical applications is becoming more and more important. Terahertz near-field imaging technology can break through the diffraction limit and obtain high-quality images with submicron or even nanometer resolution, thus high-resolution THz imaging technologies based on near-field methods have been proposed and further applied. This article first describes the basic principles of terahertz near-field imaging; secondly, summarizes its progresses and enhancement methods; and finally prospect the future of terahertz near-field imaging.

**Keywords:** terahertz; near-field imaging; resolution

太赫兹(THz)波是指介于毫米波和红外线之间, 频率在 0.1~10 THz(30  $\mu\text{m}$ ~3 mm)范围内的电磁波<sup>[1]</sup>, 具有诸多优点: 包含有丰富的“指纹谱”信息, 许多生物大分子的转动和振动能级都位于太赫兹波段; 穿透能力强, 可穿透许多在可见光以及红外波段不透明的非极性材料; 光子能量低, 可避免生物活性分子因电离辐射而造成损伤, 实现生物活性样品的无损检测<sup>[2]</sup>。太赫兹成像技术作为太赫兹科学的重要技术之一, 以其独特的优点在生物医学成像、文物鉴别、雷达通信、环境监测、无损检测等方面具有广泛的应用前景。但是, 由于太赫兹波长的限制, 传统的远场成像效果受到衍射极限的影响, 获得的图像分辨力仅在毫米量级<sup>[3]</sup>, 无法满足如生物分子检测等某些领域的高精度成像要求。近场成像可以打破衍射极限的限制, 实现亚波长分辨的高精度测量<sup>[4-5]</sup>。太赫兹近场成像技术是在微波、可见光、红外<sup>[6-7]</sup>等其他波段较为成熟的技术基础上发展起来的。值得一提的是, 它不仅可以实现样品表面的高分辨力无损检测成像, 还具备对内嵌物品实现亚表面信息高精度测量的能力。近场成像突破衍射极限技术的实现主要是靠对太赫兹电磁场中隐矢波的获取和利用, 其成像性能的提升也是从隐矢波方面进行调控: 对太赫兹波的局域增强或增透。成像方法主要分为: 基于亚波长尺寸孔径的近场

收稿日期: 2021-06-29; 修回日期: 2021-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62075248); 国家重点研发计划资助项目(2020YFB2009303; 2017YFB00405402); 中央民族大学青年教师科研能力提升计划资助项目(2021QNPHY99)

\*通信作者: 崔 彬 email:cuibin.robert@163.com

THz 波探测方法<sup>[8-9]</sup>、亚波长尺寸针尖局域增强近场 THz 波探测方法<sup>[10-14]</sup>、通过激光聚焦产生亚波长尺寸 THz 辐射源显微技术<sup>[15-19]</sup>、微纳结构材料局域或增透的 THz 超透镜<sup>[20-23]</sup>等。在研究方向上主要包括样品与针尖耦合系统的相互作用及其对太赫兹探测信号的影响、探针尺寸结构的设计、THz 波经微孔衍射和微纳结构传输、调控等过程模型的建立等内容。

本文将对太赫兹近场成像技术近几年的研究进展进行综述。首先，简要介绍了太赫兹近场成像机制与原理；然后介绍了基于孔径和针尖太赫兹近场成像机制以及相应的增强方法；最后进行了总结与展望。

## 1 太赫兹近场成像基本原理

所谓近场成像是指距离在波长或者亚波长的区域范围的成像。一般来说 THz 波近场成像是指扫描太赫兹近场显微技术，通过局域太赫兹波照射在近场范围内对待测样品进行二维网格扫描，待扫描完所有待测点后，再将收集到的样品数据经计算机特定程序处理后进行成像。在进行二维网格状扫描时，为了提高亚波长量级物体的分辨力，根据海森堡测不准原理，在扫描平面方向上的波数分量必须大于入射太赫兹波的波数，并且垂直方向上的分量为虚数，所以在近场区域会同时存在传播分量和隐矢分量，两者在信息携带和能流传播上存在不同：传播分量有能流传播但不携带超分辨样品信息，振幅与传播场成反比；隐矢分量携带超分辨信息但不能进行能流传播。因此近场成像突破衍射极限的关键是对隐矢波的探测、获取以及利用，这与传统方法利用透镜等光学元件对太赫兹波进行聚焦来提高分辨力有显著区别。

根据用来获取或者耦合隐矢波的亚波长量级的物体与待测样品的相对位置关系，可得到两种近场成像模式：近场照明和近场收集。近场照明顾名思义就是用针尖大小的局域太赫兹波近场照射样品；近场收集是探测样品精细结构散射出来的隐矢波，或者远场探测近场针尖或微孔转化而来的传播场<sup>[2]</sup>。两种模式的成像机制不同，所需解决的问题也不同。由于近场照明是直接照射样品，所以太赫兹波的信号强弱影响成像质量，而近场收集是对隐矢波进行收集然后进行耦合转化，此过程会伴随隐矢波的衍射问题，所以需解决对距离的控制以及耦合转化隐矢波的问题。近场成像也可以根据太赫兹源与信号接收装置的相对位置的不同分为透射成像和反射成像。一般来说，对太赫兹波透过率较高且比较薄的样品采取透射成像，反射成像虽然可对厚度较大的样品进行成像，但是背景噪声干扰严重，信噪比和分辨力都比较差。

## 2 基于孔径的太赫兹波近场成像

1998 年，Hunsche 等<sup>[24]</sup>第一次基于亚波长孔径实现了 THz 波高分辨成像，利用 220  $\mu\text{m}$  波长的 THz 波对高阻硅基底上的金线进行了空间分辨力为 50  $\mu\text{m}$  的成像，属于基于物理孔径的近场照明模式，如图 1(a)所示。太赫兹波经铝制锥形尖端通光孔局域后近场照明样品，处于远场的光电导天线收集并探测透射的太赫兹波，空间分辨力由孔径的尺寸决定。在照明模式下对基于孔径成像的高分辨机理进行分析，可类比光通过位于理想导电板上宽度远小于波长量级的细缝的过程<sup>[2]</sup>，结果发现光在半缝宽范围内受亚波长结构的扰动，激发携带超分辨信息的隐矢波。物理孔径的另外一种成像模式是收集模式。2000 年，针对照明模式下复杂的针尖设计和间距控制，Mitrofanov 等<sup>[25-26]</sup>设计了带有亚波长孔径的光电导探测器，发明了基于收集模式的扫描近场太赫兹显微技术，并在 0.5 THz 处获得了 7  $\mu\text{m}$  的分辨力，原理如图 1(b)所示。受精细结构散射的 THz 波与图中所示的样品背部高折射率突起耦合，然后通过亚波长孔径传至正对面近场范围内的偶极天线结构进行探测。

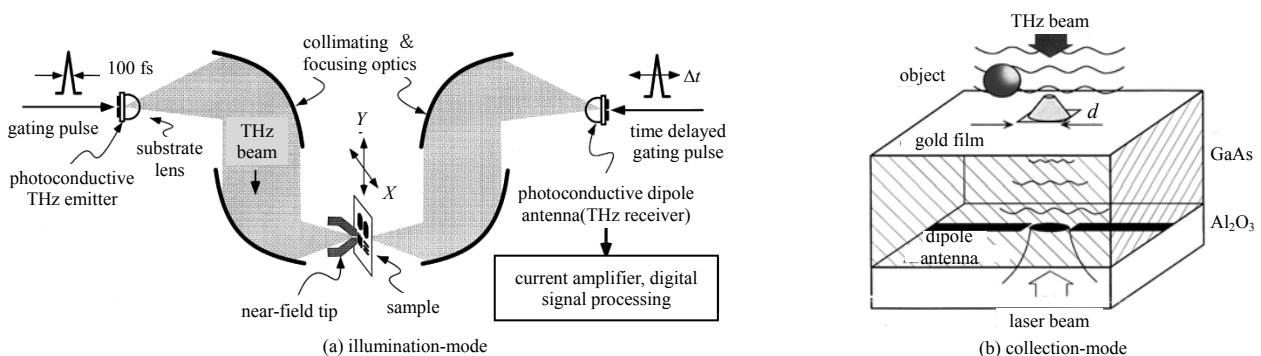


Fig.1 Aperture based THz near-field imaging

图 1 物理孔径型近场成像

在 2010 年, H Zhan 等<sup>[27]</sup>发现两平行板之间的能量随板间距离的减小而呈指数型增加, 据此将物理孔径与平行平板波导相结合, 使太赫兹波聚焦在  $\lambda/250$  以下的等离子体平行板波导中, 通过物理孔径进一步缩小了太赫兹波照射样品的入射光斑。

基于孔径成像的另外一种方法是动态孔径, 其分辨力也取决于局域太赫兹波的孔径大小, 只不过该孔径是由飞秒激光在半导体材料上激发光生载流子形成的动态孔径, 其孔径厚度取决于半导体材料对取样光的吸收深度。早在 2000 年, Chen 等<sup>[28]</sup>报道了有关动态孔径的太赫兹近场成像, 原理如图 2

所示, 经斩波器的泵浦光与太赫兹波共线入射到半导体材料上。样品相对半导体的位置不同, 所处模式也不同。当样品位于半导体正面时, 动态孔径收集样品散射的隐矢波, 此时属于收集模式, 空间分辨力较高; 当样品位于半导体背面时, 动态孔径局域电磁波经半导体晶片照射样品, 属于照明模式, 由于受轻微衍射效应影响, 空间分辨力较低。针对空间分辨力和信号通量、光谱测量能力之间的矛盾, 杨玉平等在 2005~2007 年期间发展了一种高空间分辨力、高通量、超宽带谱的 THz 近场探测与成像新方法, 即近红外聚焦—THz 探测技术, 在国内首先实现了具有微米量级分辨力的 THz 显微成像<sup>[29-30]</sup>, 并具有高灵敏度、光路紧凑、样品不受限制等优点, 分辨力可达到  $20\ \mu\text{m}$ , 如图 3 所示。另外, 利用计算电磁学的理论方法(并矢格林函数和平面波展开法)对 THz 脉冲在近场区的传播特征、衍射效应等问题, 也进行了理论计算和分析<sup>[31]</sup>。2014 年, 南开大学赵佳宇等<sup>[32]</sup>利用飞秒激光在空气中形成的等离子体细丝辐射的 THz 近场成像, 实现了  $20\ \mu\text{m}$ (约  $\lambda/38$ )的分辨力。

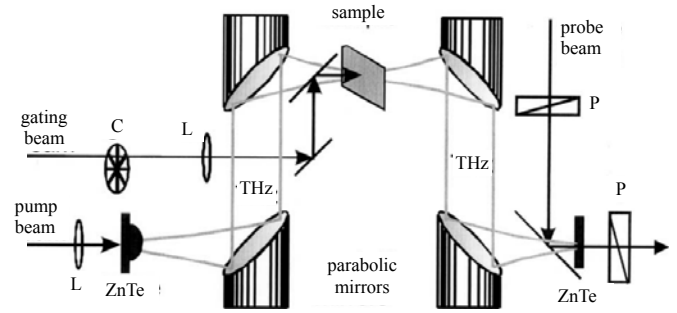


Fig.2 Dynamic aperture based THz near-field imaging  
图 2 动态孔径型近场成像

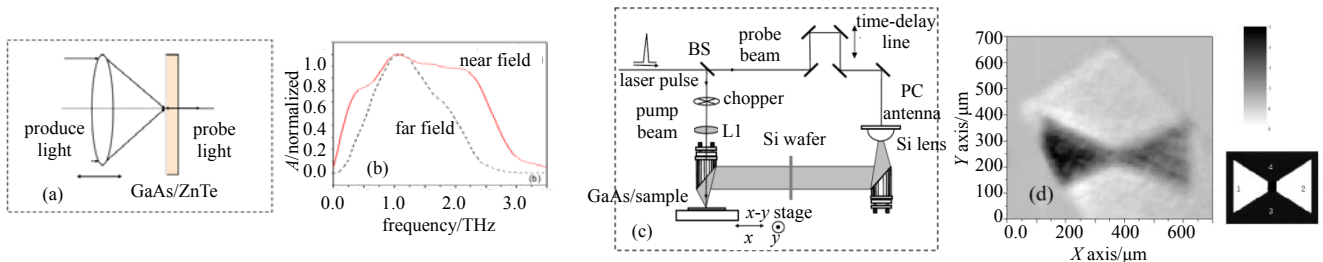


Fig.3 Near-infrared focusing-THz detection technology: (a) and (b) are the schematic diagrams of the near-field detection mode and its broad spectrum characteristics, (c) and (d) are the system diagrams of the far-field detection mode and its super-resolution imaging

图 3 近红外聚焦—THz 探测技术: (a)和(b)为近场探测模式示意图及其宽光谱特征; (c)和(d)为远场探测模式系统图及其超分辨成像

在近场使用亚波长孔径是实现近场成像最直接的方式<sup>[33]</sup>, 成像分辨力受孔径尺寸的影响。一般情况下, 随着孔径尺寸的减小, 灵敏度以超线性的方式迅速下降<sup>[34]</sup>。在 2018 年 Giordano 等<sup>[35]</sup>通过将 InAs 纳米线的金属孔径探头集成到  $18\ \mu\text{m}$  的孔径探测器中, 实现了太赫兹干涉近场成像, 如图 4 所示。此外, 也可将近场探头与太赫兹光电导天线(Terahertz-Photo Conductive Antenna, THz-PCA)集成在单个芯片上, 以实现亚波长分辨力。例如, 在 2015 年 Mitrofanov 等<sup>[36]</sup>将孔径探头放置在单个芯片上, 该芯片被分布式布拉格反射器在  $1\ \mu\text{m}$  处与 THz-PCA 分离, 并在天线的有源层附近引入了金纳米天线阵列, 以实现  $2\ \mu\text{m}$  的空间分辨力。然而, 研究结果发现, 孔径引起的强光束衰减会阻碍可利用的动态范围和分辨力<sup>[37]</sup>。通过减小针孔的直径可以提高横向分辨力, 但是当尺寸下降到某个阈值时, 就无法获得信号。

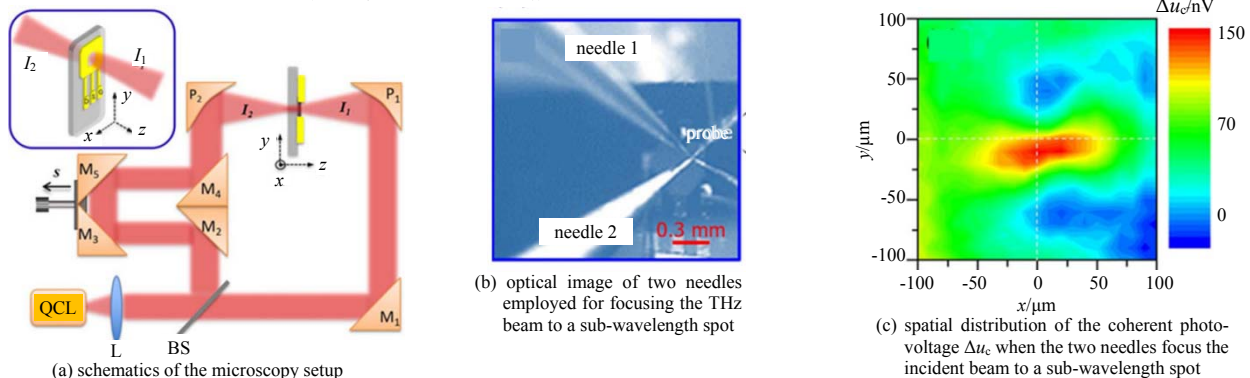


Fig.4 Schematics of the interferometric THz near-field microscopy setup and the near-field probe geometry

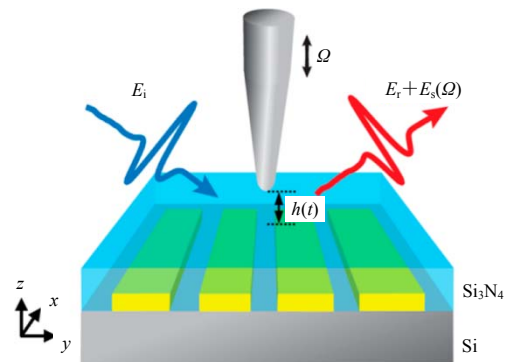
图 4 干涉太赫兹近场显微镜装置的示意图及近场探头几何形状

总的来讲，无论是基于物理孔径还是基于动态孔径的太赫兹波近场成像，都可以通过减小孔径尺寸来提高成像的分辨力。在基于物理孔径的太赫兹波近场成像中，随着孔径尺寸的减小，透过率也随之降低，导致灵敏度和信噪比下降。入射波的偏振状态也会对成像分辨力产生影响。相对于  $p$  偏振光，通常选用电场局域程度更高的  $s$  偏振光进行成像，但是由于截止效应，探测带宽会受到限制；在基于动态孔径的太赫兹波近场成像中，动态孔径的形成依赖于半导体激发足够多的自由载流子，半导体的热积累效应导致复折射率发生改变，虽然可以通过增加动态孔径的尺寸来弥补，但是伴随着取样光功率的降低。

### 3 基于针尖的太赫兹波近场成像

正如前文所述，可利用远场探测经近场微孔或者针尖转化而成的传播场进行近场收集成像。太赫兹波照射具有亚波长尺寸的针尖，然后形成局部太赫兹源，进而近场照明样品，得到带有样品细节信息的隐矢波，最后经针尖耦合可转化为传播波至远场进行探测。针尖是成像的重要部分，其尺寸大小决定成像的空间分辨力。如今，研究人员已设计出多种用于太赫兹局域的不同结构，如锥形探针<sup>[38-39]</sup>、双金属耦合探针<sup>[40]</sup>等。在近场条件控制方面，可结合原子力显微镜技术，利用压电陶瓷或石英音叉控制针尖或孔径到样品表面的间距，进而方便地控制近场条件。基于针尖的近场成像最早可以追溯到 1994 年，Zenhausen 等<sup>[41]</sup>在可见光波段利用硅制探针发展了基于针尖散射的无孔扫描近场显微技术，获得分辨力为 3 nm 的近场光学显微图像。2003 年，Chen 等<sup>[42]</sup>基于可见光波段近场成像的思想，利用扫描近场光学显微镜在中心频率为 2 THz 的波段进行了成像，初步获得了分辨力为 150 nm 的图像，表明了亚微米太赫兹显微镜在细胞水平上对生物组织成像或单个亚微米半导体器件的检测上具有可行性，并且有可能应用在单个量子点上的远红外量子光学领域。2008 年，Janne M. Brok 团队<sup>[43]</sup>报告了 GaP 晶体测量金属结构近场中的太赫兹电场：(110)取向的 GaP 晶体，测量太赫兹电场的  $x$  或  $y$  分量；(001)取向的 GaP 晶体，测量  $z$  分量，所获空间分辨力为 20  $\mu\text{m}$ 。但是，在测量过程中，样品厚度增大的同时，针尖与晶体表面的间距也在增大，导致太赫兹波光斑变大，影响成像效果，所以该方法仅适用于厚度较薄的样品。

随着太赫兹近场成像的发展，2015 年 Moon 等<sup>[44]</sup>基于原子力宽带脉冲显微镜，通过控制样品到针尖的间距，对嵌入在介电膜中的金属光栅进行了近场成像，获得了亚表面光栅的宽带纳米成像，在 1 THz 处横向分辨力可达 90 nm，原理如图 5 所示。该方法可避免太赫兹波通过微孔时的传播损失，并且在  $p$  偏振光入射时，受局域表面等离子共振效应和基底镜像效应的作用，针尖正下方电场能量密度增强，散射信号强度增大，所以在一定程度上存在针尖增强效应<sup>[45]</sup>。该技术虽然实施起来具有挑战性，但是对于探测通常嵌入背景介质中的固态和生物纳米分子的低能光物质相互作用具有重要意义。原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)在针尖处产生局域增强的太赫兹场，散射的太赫兹波携带针尖下方介电常数  $\epsilon$  的幅度和相位信息，因此能够实现由探针顶点尺寸而不是波长确定的空间分辨力。然而，AFM 尖端的散射效率在太赫兹频率范围内非常低，因此需要使用复杂的信号解调技术、强大的太赫兹激光器、冷却辐射热计和昂贵的太赫兹时域光谱系统来检测尖端散射出的微弱的太赫兹波。此外，控制尖端位置所需的原子力相互作用限制了散射型显微镜在生命科学中的应用。在近场探测中，针对动态孔径导致信噪比下降、针尖尺寸不易掌握、散射的微弱信号提取困难等问题，2016 年天津大学的张学迁等提出了一种高信噪比、高灵敏度、便捷扫描的利用光导天线探针在近场可扫描太赫兹光谱仪 N/F-STs<sup>[39]</sup>。该系统能同时探测横纵电场的幅度和相位信息，如图 6 所示，实现了光路光纤化以及便捷的三维空间扫描，增加了系统的灵活度，在生物学、纳米光谱学、表面等离子体学等领域具有良好的应用前景。通过放置在近场中的小孔从物体上收集太赫兹波，可以获得超过衍射极限的空间分辨力。然而，通过亚波长孔径的光传输基本上受到光的波动性质的限制。2017 年，Oleg Mitrofanov 等<sup>[46]</sup>提出了一种新颖的近场探针架构，将一个基于半导体纳米线(Nano Wires, NW)或晶体黑磷薄片(Black Phosphorus, BP)的 THz 纳米探测器集成到亚波长光阑的隐矢场区域，利用嵌入孔径区域的太赫兹纳米探测器作为用于太赫兹亚波长分辨力成像的探测器，该探头可将倏逝的 THz 场转换为纳米级可探测的信号，实现了对透射波的有效检测，结构如图 7 所示。这种太赫兹近场探测器在一个紧凑的太赫兹成像系统



The tip-sample distance was dithered at the oscillation frequency of a quartz tuning fork and precisely controlled by a tapping-mode AFM system.

Fig.5 THz S-SNOM system  
图 5 THz S-SNOM 系统

中提供室温下的亚波长分辨力, 而不需要飞秒脉冲激光器、原子力相互作用或解调技术, 为紧凑和通用的太赫兹成像技术铺平了道路, 并有望弥合空间分辨力从纳米级到衍射极限, 不断发展的纳米级太赫兹探测器领域, 特别是基于硅的场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)探测器, 可以提高该技术的灵敏度和空间分辨力, 并提供廉价的室温亚波长分辨力太赫兹成像技术。

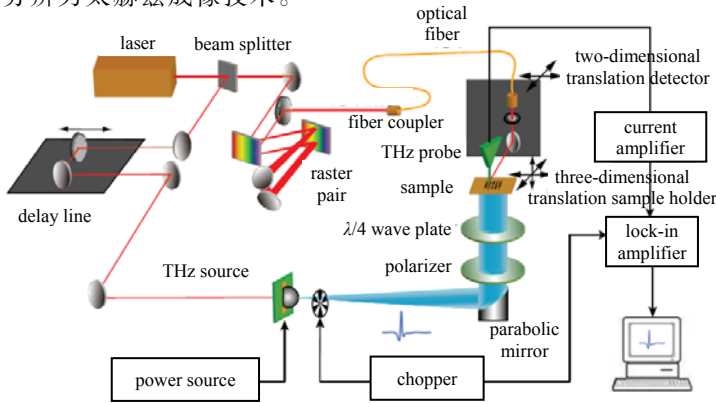
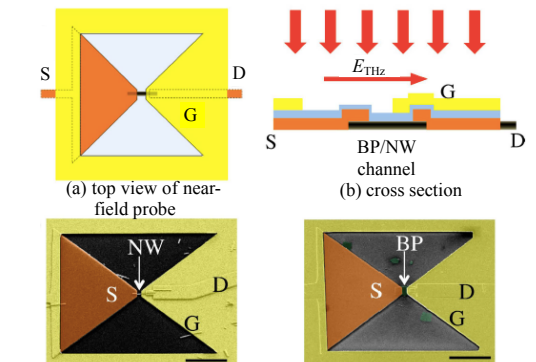


Fig.6 Schematic of the near-field scanning terahertz microscopy(N/F-STs)  
图 6 近场可扫描太赫兹光谱仪(N/F-STs)示意图

扫描近场光学显微镜(Scanning Near-field Optical Microscope, SNOM)的尖端提供了深亚波长空间分辨力、近场增强以及更灵活的应用。然而, 由于太赫兹波长相对较长( $\sim 100 \mu\text{m}$ )且与尖端尺寸( $\sim 20 \text{nm}$ )不匹配等问题, 导致光耦合效率极低, 只有  $10^{-4}$  量级, 限制了成像性能, 因此需要高功率照明源。通过增强样品—针尖的相互作用可实现该要求。2019年, Zhou 等<sup>[47]</sup>研制了一种由介质板一侧的同心环形金属光栅和安装在板另一侧的微尖组成的太赫兹近场源器件(如图 8 所示), 器件上的太赫兹场具有径向极化作用, 可以在几微米体积的深亚波长尺度内聚焦在微尖端附近, 可实现高空间分辨力以及高散射效率。近场能量密度提高了 15 倍, 得益于径向光栅发射的导波谐振模式、器件的轴对称性和入射光束的径向偏振, 可通过改变光栅周期和介质基板厚度来控制器件的谐振频率。具体增强机理为: 在这些谐振频率下, 场能有效地集中到板坯中, 并发射低群速度的谐振波导模式, 并且由于与同心环光栅相对的板坯表面的全反射, 激发了与表面有界的强消逝场。由于器件的圆对称性和入射光束的径向偏振, 预计尖端附近会有较大的倏逝场增强。它可以作为级联聚焦模式的第一级, 为 S-SNOM 提供了一种新的照明方法, 提高了耦合效率, 并且加强了针尖-样品相互作用。近场成像系统的两个最重要的基准是分辨力和工作距离。为了获得更多的聚束和进一步增强通过孔径传输的 THz 光束, 2020 年, 王楠等<sup>[48]</sup>设计了一种新型探针结构, 通过将原始探头与空气透镜结合在一起, 使其带有弯曲(凹)孔径, 该结构消除了阻抗失配导致的太赫兹波在探头孔径处的大量反射, 提高了孔径外近场域内可通过孔径的电场强度, 从而增加了太赫兹波的透射率和聚束, 在  $0.11 \text{ THz}$  下的一维成像分辨力至少为  $10 \mu\text{m}$ , 同时探头尖端到样品的距离增加了约  $4 \mu\text{m}$ , 有望在表面和亚表面太赫兹近场成像场景中有突破性的进步, 对组织和细胞的生物学成像、复合材料/结构的无损检测和超材料的表面等离子体基础表征等应用产生强烈影响。

科研人员近场成像的针尖方面开展了一系列研究。在影响探测信号的信噪比方面, 太赫兹波散射信号同时受针尖样品耦合系统和针杆的影响: 当针尖与样品间距未受调制时, 探测信号主要受针杆影响, 分辨力较低; 当针尖按照一定参考频率振动, 并利用锁相放大器探测信号时, 主要受针尖部位影响, 分辨力较高<sup>[49]</sup>。值得一提的是, 在对信号进行高次谐波探测时, 可获得更高的信噪比。另外, 在针尖的材料选择上, 传统方法上多选用金属材质进行制作, 例如钨、铂、铜等, 但是近年来介电常数足够大的电介质材料针尖, 在场增强及信号强度方面与金属探针效果相当, 且瞬态响应更快<sup>[50]</sup>。



(c) Scanning Electron Microscopy (SEM) image of a near-field probe with a  $20 \mu\text{m}$  aperture and an embedded InAs NW as the FET channel  
(d) SEM image of a near-field probe with a  $20 \mu\text{m}$  aperture and an embedded flake of Black Phosphorus (BP)

The electric field (red arrow in (b)) of the THz wave induces oscillating field between the Source(S) and Gate(G) electrodes  
Fig.7 Terahertz near-field probe with an embedded nano-detector

图 7 带有嵌入式纳米探测器的太赫兹近场探头

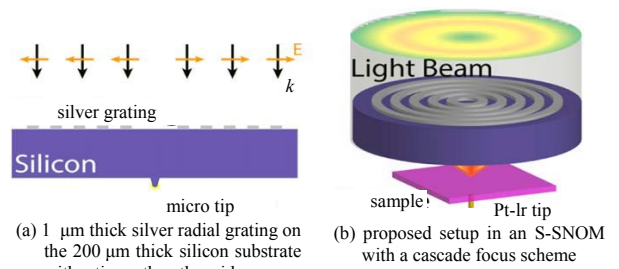


Fig.8 (a) the device with  $1 \mu\text{m}$  thick silver radial grating on the  $200 \mu\text{m}$  thick silicon substrate with a tip on the other side;  
(b) proposed setup in an S-SNOM with a cascade focus scheme

图 8 (a) 在  $200 \mu\text{m}$  厚的硅衬底上具有  $1 \mu\text{m}$  厚的银径向光栅, 另一侧有尖端; (b) 在具有级联聚焦方案的 S-SNOM 中提出的设置

但是，探针的结构设计及制作流程、针尖到样品间距的控制及耦合效应的增强、成像光路的搭建等要求较高，操作复杂；即使与原子力显微镜相结合，从成本上考虑也不是较为理想的方案。除此之外，一些方法还要考虑半导体或者电光晶体材料对性能的影响。

#### 4 基于超材料的太赫兹波近场成像

追求超出衍射极限的超分辨力成像一直是光学领域最重要的研究之一。由于隐矢波的快速衰减，物体亚波长特征的损失将经典成像系统的分辨力限制在了照明波长的一半左右。为了克服这一限制并恢复物体的细节信息，一个基本的思想是增强和检测近场中的隐矢波。例如，在扫描近场光学显微镜中(SNOM)中，尖锐的尖端可产生强烈的局部场增强并同时收集样品的近场信息。然而 SNOM 的高空间分辨力是以靠近样品的尖端进行逐点扫描为代价的，其耗时的特性限制了只能对小面积(通常为  $10\ \mu\text{m}$  甚至更小)样品进行扫描成像。超透镜在对大面积样品进行快速扫描同时实现高分辨力成像方面效果显著。早在 2006 年，Thomas 等<sup>[51]</sup>利用 SiC 材料的超透镜在红外波段进行了高分辨力成像，在红外 S-SNOM 的扫描探针尖端下方和位于尖端下方  $880\ \text{nm}$  的物体之间放置了一个 SiC 超透镜，超透镜是一个  $440\ \text{nm}$  厚的单晶 SiC 膜，其两面都涂有  $220\ \text{nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$  层。夹层的两个表面分别位于镜头的物平面和镜平面，含有不同直径和间距的孔的金膜覆盖在物平面上。为了量化超级透镜提供的分辨力增强，对周期为  $3\ \mu\text{m}$ 、狭缝宽度为  $440\ \text{nm}$  的光栅进行了成像，如图 9 所示。

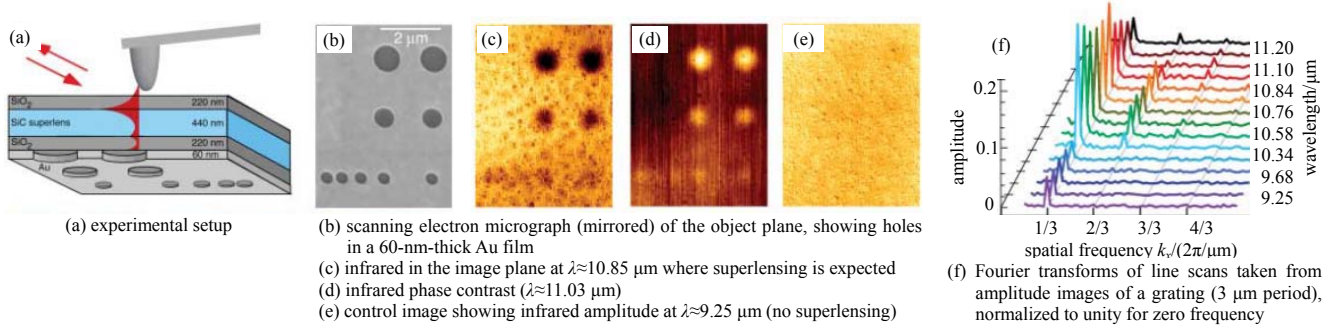


Fig.9 Near-field microscopy through a 880-nm-thick superlens structure

图 9 厚  $880\ \text{nm}$  超透镜结构的近场显微镜

基于超透镜的近场显微技术既不局限于 SiC 透镜，也不局限于红外透镜波长。它可以应用于可见光到太赫兹频率，其中超透镜可以由平坦的金属薄膜、极晶体薄片，甚至人工介质如超材料和光子晶体构成。因此，它为近场探针无法直接获取的各种人造或生物纳米结构的高分辨力光学成像打开了大门。但是，超透镜的应用缺点是工作频率范围较窄，为了克服该限制，在 2012 年，Taubner 等<sup>[52]</sup>设计了在太赫兹波段用于宽带亚波长成像的石墨烯透镜，可通过电压或者化学掺杂来控制 and 调谐工作频率，实现了隐矢波的非共振增强。自从“广义斯涅尔定律”提出以来，超表面通过调整相位和幅度在亚波长尺度来影响光的能力受到关注。另外，超材料在近场耦合效应、衍射极限聚焦以及亚波长分辨力成像上也有诸多研究，尤其是在双场超聚焦方面，同时强制入射电场和磁场聚焦到一个锐化的焦点上，克服了衍射极限，可以提供更多的近场信息。2020 年，Han 等<sup>[53]</sup>在衍射积分公式的基础上，首先推导出超聚焦理论来精确描述渐逝波的指数衰减。然后提出了一种幅度-相位组合的有效参数检索方法并提出了一种同时调整 THz 消失模的幅值和相位来实现电场和磁场超聚焦的近场超表面。

手性超表面可以实现巨大的手性光学响应，这种特性已经从光波段扩展到了其他电磁波段。基于超材料设计的太赫兹近场成像超透镜，不仅能增强携带样品细节信息的隐矢波，并且由于其是一种平面成像器件，可对大面积样品进行快速扫描。2020 年，Li 等<sup>[54]</sup>将图形化和电掺杂石墨烯引入由双层 C 形裂环谐振器(Split Ring Resonators, SRRs)组成的超反射镜中。石墨烯的电掺杂改变了超表面腔体的吸收损失，结构表现为手性超表面和普通金属镜之间的切换，可看作“开”和“关”的状态。根据该方法设计了超表面用于近场成像，结构如图 10 所示。成像部分，当超表面处于“开”状态时，由于不同区域引起不同的圆极化吸收，入射波分别为左旋圆偏振光(Left-handed Circularly Polarized, LCP)和右旋圆偏振光(Right-handed Circularly Polarized, RCP)时出现互补图样(“0”标记反射弱区域，“1”标记反射有效区域)；处于“关”状态时，相当于普通金属反射镜，成像效果如图 11 所示。在 2021 年，Li 团队<sup>[55]</sup>又设计了一种新型石墨烯调谐手性超表面，低电阻率硅表面的单层石墨烯作为反射介质，在石墨烯和硅之间施加电压可得到手性开关。该超表面反射 LCP，而吸收 RCP，其镜像超表面吸收 LCP 而反射 RCP。若只考虑 THz 反射强度，将这些超表面及其镜像结构排列成一个图案，分别检测 LCP 和 RCP 反射场，可对该图案进行成像。

基于各种超材料设计的超透镜, 不仅能让携带样品信息的隐矢波在传播中得到增强, 实现高分辨力成像, 还因为是一种平面成像器件, 可对大面积样品进行快速检测。相较于传统透镜, 超透镜在亚波长聚焦、隐矢波放大从而突破衍射极限的太赫兹近场成像上具有重要意义。另外, 基于超材料的微纳结构设计在对太赫兹波的超衍射传输、耦合增强以及亚波长聚焦等方面有着重大意义, 但是现阶段对太赫兹波段超材料透镜的作用机制的研究工作较少, 未来可深入研究, 优化结构, 突破超透镜工作频率较窄的限制。

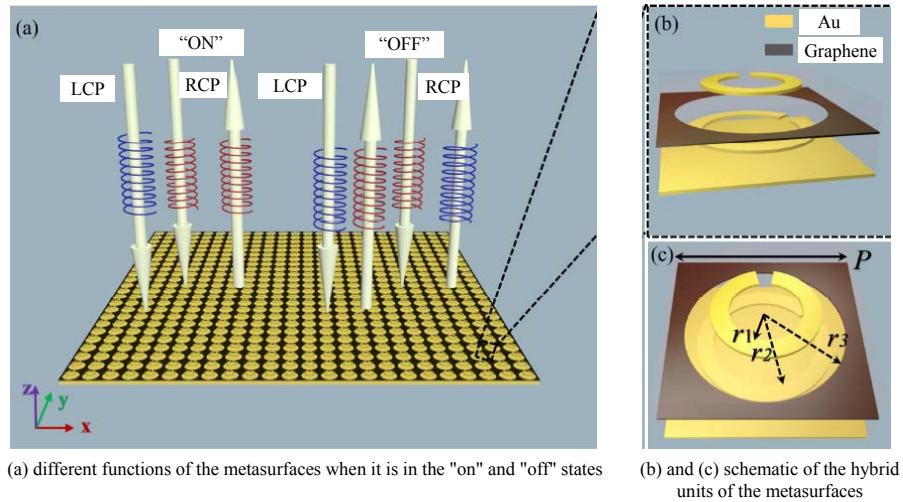


Fig.10 Schematic diagram of the hybrid active chiral metasurfaces

图 10 混合活性手性超表面示意图

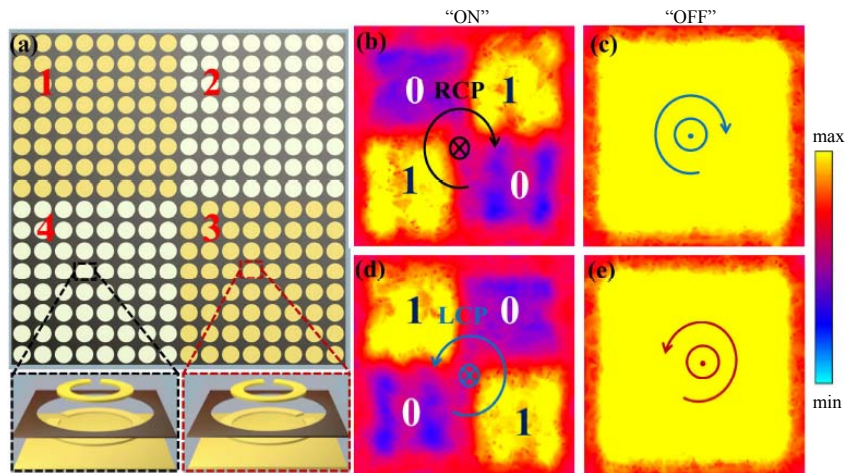


Fig.11 Active chiral metasurfaces for dynamic terahertz near field digital imaging: (a) units arrangement of the metasurfaces; (b)–(e) near-field patterns of the metasurface at  $z=150\ \mu\text{m}$  in “on” and “off” states ( $f=0.722\ \text{THz}$ )

图 11 用于动态太赫兹近场数字成像的主动手性超表面: (a) 超表面的单位排列; (b)–(e)  $z=150\ \mu\text{m}$  处“开”和“关”状态( $f=0.722\ \text{THz}$ )的超表面近场图案

## 5 总结与展望

本文首先介绍了近场机制相关概念和原理, 进而介绍了几种基本的近场成像方式: 基于孔径、针尖、超材料的几种太赫兹近场成像方法。不难发现, 突破衍射极限进而实现高精度高分辨力的太赫兹近场成像的关键是对亚波长源的获取和耦合处理。早期太赫兹波段时域光谱系统和可见光波段扫描近场光学显微技术的发展促进了太赫兹近场成像的发展。成像孔径尺寸、针尖形状、材料以及相对位置、超材料的材质选择以及结构设计都是影响太赫兹近场成像分辨力、灵敏度以及信噪比等性能的因素: 减小孔径可以使成像分辨力得到提高, 但牺牲了灵敏度和信噪比; 针尖可耦合携带样品细节信息的隐矢波, 并且成像分辨力由针尖尺寸决定; 基于超材料的超透镜不仅可以增强携带样品细节信息的隐矢波, 和针尖型等点扫描方式相比, 扫描效率高, 可实现对大面积样品的快速探测。针对以上 3 种成像方式, 归纳总结了几项具有代表性的工作于表 1 中。

表 1 不同近场成像方式比较  
Table1 Comparison of different near-field imaging methods

method	work group	resolution	application	limitation
physical aperture (lighting mode)	Nuss, et al. <sup>[24]</sup>	Resolution depends on the size of the physical aperture, up to 50 $\mu\text{m}$	gold wire on silicon substrate	1) complex hole design and spacing control 2) low transmission efficiency 3) serious loss of spectral components and signal
physical aperture (collection mode)	Mitrofanov, et al. <sup>[25]</sup>	Resolution depends on the size of the physical aperture, up to 7 $\mu\text{m}$	the metal substance in the chip	1) serious loss of energy and spectral components 2) limited penetration distance 3) difficulty in production and limited samples
dynamic aperture	Zhang, et al. <sup>[56]</sup>	Resolution depends on the focal size of the femtosecond laser, 14 $\mu\text{m}$	circuits and metal patterns in the chip	1) low throughput, low transmission efficiency 2) need semiconductor substrate 3) limited sample
needle tip (far field test)	Chen, et al. <sup>[42]</sup>	Affected by tip size, high resolution, 150 nm	metal grating on semi-insulating silicon substrate	1) low-pass light, narrow bandwidth 2) limited sample thickness and detection distance 3) the probe is fragile and easily damaged, but difficult to adjust
needle tip (near field test)	Moon, et al. <sup>[44]</sup>	Affected by tip size, 90 nm	metal grating embedded in dielectric film	1) complicated spacing control 2) can only image the surface of the sample
subwavelength THz radiation source (laser emission)	Tonouch, et al. <sup>[15-16]</sup>	Resolution depends on the focal size of the femtosecond laser, 20 $\mu\text{m}$	integrated circuit defect detection, super current distribution in superconductivity, etc.	1) limited sample thickness and detection distance 2) difficult to achieve higher resolution 3) complex signal during near-field detection
needle tip + laser emission	Mittleman, et al. <sup>[14]</sup>	Resolution depends on the tip, 20 nm	metal nanoparticles and nanorods	1) limited sample 2) need semiconductor substrate 3) high spatial positioning requirements
hyperlens	Taubner, et al. <sup>[52]</sup>	Resolution up to $\lambda/20$	periodic grating	narrow working frequency range

基于以上所述内容，未来对太赫兹近场成像研究上可从以下几方面入手：

- 1) 在针尖制作材料上，除了传统的钨、铂、铜、铝等金属，也可选择介电常数足够大的电介质针尖，其场增强效果及散射信号强度与金属探针的效果相当。
- 2) 在太赫兹发射源和探测技术上，可探寻输出功率更大、宽调谐性能更优的发射源，增强太赫兹波的发射功率；优化探测技术的灵敏度，提高太赫兹波的有效利用率。
- 3) 以实现太赫兹近场成像装置的简便、经济以及紧凑化为目的，深入研究阵列、超透镜、波导等微纳结构在太赫兹波的传输、耦合、聚焦等方面的作用机理，另外深入发掘以石墨烯为代表的新型材料在太赫兹波非共振增强方面的应用前景。
- 4) 结合超分辨率重建等图像处理技术，使太赫兹近场成像在软硬件方面共同得到提升，获得高质量图像。
- 5) 探索太赫兹近场成像在生物医学检测或无损检测等更多方面的应用。

#### 参考文献：

- [1] MITTLEMAN D. Device physics: a terahertz modulator[J]. Nature, 2006,444(7119):560-561.
- [2] 刘宏翔,姚建铨,王与焯,等. 太赫兹波近场成像综述[J]. 红外与毫米波学报, 2016,35(3):300-309,376. (LIU Jianhong, YAO Jianquan,WANG Yuye,et al. Overview of near field imaging of terahertz waves[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016,35(3):300-309,376.)
- [3] BHATTACHARYA A,RIVAS J G. Full vectorial mapping of the complex electric near-fields of THz resonators[J]. APL Photonics, 2016,1:137-184.
- [4] MITROFANOV O,RENAUD C C,SEEDS A J. Terahertz probe for spectroscopy of sub-wavelength objects[J]. Optics Express, 2012,20(6):6197-6202.
- [5] MAISSEN C,SCALARI G,VALMORRA F,et al. Ultrastrong coupling in the near field of complementary split-ring resonators[J]. Physical Review, 2018,98(11):119901-1.
- [6] LI P,WANG T,BCKMANN H,et al. Graphene-enhanced infrared near-field microscopy[J]. Nano Letters, 2014,14(8):4400-4405.
- [7] KAWANO Y. Terahertz sensing and imaging based on nano-structured semiconductors and carbon materials[J]. Laser & Photonics Reviews, 2012,6(2):246-257.
- [8] WATSON D W,JENKINS S D,RUOSTEKOSKI J,et al. Toroidal dipole excitations in metamolecules formed by interacting plasmonic nanorods[J]. Physical Review B, 2015,22(12):15088-15096.
- [9] 王冠文,祁峰,李玉峰. 太赫兹近场合成孔径成像与焦平面成像对比[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(6):962-966,983. (WANG Guanwen,QI Feng,LI Yufeng. Comparison of terahertz near-field synthetic aperture imaging and focal plane imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(6):962-966,983.)
- [10] MATHEISEN C,SAWALLICH S,NAGEL M,et al. High-speed near-field imaging system based on photoconductive terahertz microprobes[C]// International Conference on Infrared,Millimeter,and Terahertz Waves. Mainz,Germany:IEEE, 2013.



- [11] 孟坤,朱礼国,刘乔,等. 一种太赫兹波远场探测超衍射分辨成像仪: CN103499392A[P]. 2014. (MENG Kun,ZHU Liguó, LIU Qiao,et al. A super-diffraction resolution imager for terahertz wave far-field detection: CN103499392A[P]. 2014.)
- [12] MOON K,PARK H,KIM J,et al. Subsurface nanoimaging by broadband terahertz pulse near-field microscopy[J]. *Nano Letters*, 2015,15(1):549–552.
- [13] DEAN P,MITROFANOV O,KEELEY J,et al. Apertureless near-field terahertz imaging using the self-mixing effect in a quantum cascade laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2016,108(9):976.
- [14] KLARSKOV P,KIM H,COLVIN V L,et al. Nanoscale laser terahertz emission microscopy[J]. *ACS Photonics*, 2017,4(11):2676–2680.
- [15] KIWA T,TONOUCHI M,YAMASHITA M,et al. Laser terahertz-emission microscope for inspecting electrical faults in integrated circuits[J]. *Optics Letters*, 2003,28(21):2058–2060.
- [16] YAMASHITA M,KAWASE K,OTANI C,et al. Imaging of large-scale integrated circuits using laser terahertz emission microscopy[J]. *Optics Express*, 2005,13(1):115–120.
- [17] YANG Y P,YAN W,LI W. A reflected terahertz-emission microscopy[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007,24(1):169–171.
- [18] 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.
- [19] ZHAO J Y,CHU W,GUO L J,et al. Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air[J]. *Scientific Reports*, 2014(4):3880–3887.
- [20] ISHIHARA K,OHASHI K,IKARI T,et al. Terahertz-wave near-field imaging with subwavelength resolution using surface-wave-assisted bow-tie aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2006,89(20):201120.
- [21] CHEN H,MA S H,WU X M,et al. Diagnose human colonic tissues by terahertz near-field imaging[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015,20(3):036017–036021.
- [22] XU Y H,ZHANG X Q,TIAN Z,et al. Mapping the near-field propagation of surface plasmons on terahertz metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2015,107(2):021105-1–021105-5.
- [23] CHEN S C,DU L H,MENG K,et al. Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over  $\lambda/100$ [J]. *Optics Letters*, 2019,44(1):21–24.
- [24] HUNSCHE S,KOCH M,BRENER I,et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998,150(1–6):22–26.
- [25] MITROFANOV O,BRENER I,HAREL R,et al. Terahertz near-field microscopy based on a collection mode detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2000,77(22):3496–3498.
- [26] MITROFANOV O,BRENER I,WANKE M C,et al. Near-field microscope probe for far infrared time domain measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2000,77(4):591–593.
- [27] ZHAN H,MENDIS R,MITTLEMAN D M. Superfocusing terahertz waves below  $\lambda/250$  using plasmonic parallel-plate waveguides[J]. *Optics Express*, 2010,18(9):9643–9650.
- [28] CHEN Q,JIANG Z,XU G X,et al. Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture[J]. *Optics Letters*, 2000,25(15):1122–1124.
- [29] YANG Yuping,SHI Yulei,YAN Wei,et al. A new microscopy for THz radiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005(9):4079–4083.
- [30] YANG Yuping,YAN Wei,WANG Li. A reflected terahertz emission microscopy,chin[J]. *Physics Letters*, 2007,24(1):169–171.
- [31] YAN Wei,YANG Yuping,CHEN Hua. Terahertz electric field in a three-layer system produced by parallel dipoles with a Gaussian spatial profile[J]. *Physical Review*, 2007,75(8):085323–085331.
- [32] ZHAO Jiayu,CHU Wei,GUO Lanjun,et al. Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air[J]. *Scientific Reports*, 2014,4(1):3880–3887.
- [33] GUERBOUKHA H,NALLAPPAN K,SKOROBOGATIIY M. Toward real-time terahertz imaging[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018,10(4): 843–938.
- [34] 薛占强. 太赫兹近场超分辨率成像技术研究及实现[D]. 绵阳:西南科技大学, 2018. (XUE Zhanqiang. Research and realization of terahertz near-field super-resolution imaging technology[D]. Mianyang,China:Southwest University of Science and Technology, 2018.)
- [35] GIORDANO M C,LEONARDO V,OLEG M,et al. Phase-sensitive terahertz imaging using room-temperature near-field nanodetectors[J]. *Optica*, 2018,5(5):651–657.
- [36] MITROFANOV O,BRENER I,LUK T S,et al. Photoconductive terahertz near-field detector with a hybrid nanoantenna array cavity[J]. *Nano Letters*, 2015,2(12):3880–3886.
- [37] DEAN P,MITROFANOV O,KEELEY J,et al. Apertureless near-field terahertz imaging using the self-mixing effect in a quantum[J]. *Applied Physics Letters*, 2016,108(9):091113–091117.

- [38] CHEN X Z,LIU X,GUO X D,et al. THz near-field imaging of extreme subwavelength metal structures[J]. ACS Photonics, 2020(7):687–694.
- [39] 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):235–246. (XU Yuehong,ZHANG Xueqian,WANG Qiu,et al. Near-field/far-field scannable terahertz spectroscopy technology based on light guide microprobe[J]. Acta Physica Sinica, 2016,65(3):235–246.)
- [40] MITROFANOV O,RENAUD C C,SEEDS A J. Terahertz probe for spectroscopy of sub-wavelength objects[J]. Optics Express, 2012,20(6):6197–6202.
- [41] ZENHAUSERN F,O'BOYLE M P,WICKRAMASINGHE H K. Apertureless near-field optical microscope[J]. Applied Physics Letter, 1994,65(13):1623–1625.
- [42] CHEN Hou-Tong,KERSTING Roland,CHO Gyu Cheon. Terahertz imaging with nanometer resolution[J]. Applied Physics Letters, 2003,83(15):3009–3011.
- [43] ADAM J L,BROK J M,PLANKEN P C M,et al. THz near-field measurements of metal structures[J]. Comptes Rendus Physique, 2008,9(2):161–168.
- [44] MOON K,PARK H,KIM J,et al. Subsurface nanoimaging by broadband terahertz pulse near-field microscopy[J]. Nano Letters, 2015,15(1):549–552.
- [45] HAYAZAWA N,TARUN A,TAGUCHI A,et al. Development of tip-enhanced near-field optical spectroscopy and microscopy[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009,48(8S2):08JA02-7.
- [46] OLEG Mitrofanov,LEONARDO Viti,ENIRCO Dardanis,et al. Near-field terahertz probes with room-temperature nanodetectors for subwavelength resolution imaging[J]. Scientific Reports, 2017,7(1):44240–44249.
- [47] ZHOU Xinfeng,GUO Xuguang,SHKURINOV A,et al. Concentric-ring-grating-induced strong terahertz near-field enhancement on a micro-tip[J]. Journal of Optics, 2019,21(10):105005–105011.
- [48] WANG Nan,ZHANG Xiaoxuan,LIANG Jie,et al. Novel configuration of aperture-type terahertz near-field imaging probe[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2020,53(29):295102-1–7.
- [49] 汤恒河,黄铁军,刘濮鲲. 一种低成本太赫兹高分辨率近场扫描成像系统[C]// 2018 年全国微波毫米波会议论文集(下册). 成都:中国电子学会:中国电子学会微波分会, 2018:4. (TANG Henghe,HUANG Tiejun,LIU Pukun.A low-cost terahertz high-resolution near-field scanning imaging system[C]// Proceedings of the 2018 National Microwave and Millimeter Wave Conference(Volume 2). Chengdu,China:Chinese Institute of Electronics:Microwave Branch of Chinese Institute of Electronics, 2018:4.)
- [50] KURIHARA T,YAMAGUCHI K,WATANABE H,et al. Dielectric probe for scattering-type terahertz scanning near-field optical microscopy[J]. Applied Physics Letter, 2013,103(15):151105–151109.
- [51] TAUBNER T,KOROBKIN D,URZHUMOV Y,et.al. Near-field microscopy through a SiC superlens[J]. Science, 2006(313), 1595–1595.
- [52] LI Peining,TAUBNER T. Broadband subwavelength imaging using a tunable graphene-lens[J]. ACS Nano, 2012,6(11): 10107–10114.
- [53] HAN Fengyuan,LIU Pukun. Terahertz near-field metasurfaces: amplitude–phase combined steering and electromagnetostatic dual-field superfocusing[J]. Advanced Optical Materials, 2020,8(6):1901331–1901342.
- [54] LI Jie,LI Jitao,YANG Yue,et al. Metal-graphene hybrid active chiral metasurfaces for dynamic terahertz wavefront modulation and near field imaging[J]. Carbon, 2020(163):34–42.
- [55] LI Jitao,LI Jie,ZHENG Chenglong,et.al. Dynamic control of reflective chiral terahertz metasurface with a new application developing in full grayscale near field imaging[J]. Carbon, 2020(172):189–199.
- [56] CHEN Q,ZHANG X. Semiconductor dynamic aperture for near-field terahertz wave imaging[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2001,7(4):608–614.

#### 作者简介:

王倩倩(1997–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究太赫兹光谱和成像.email: 1432049884@qq.com.

崔彬(1982–), 男, 博士, 讲师, 主要研究太赫兹调控与成像.

杨玉平(1976–), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为太赫兹光谱与成像、太赫兹功能器件与太赫兹生物传感.