

太赫兹实时近场光谱成像研究*

冯龙呈¹⁾ 杜琛¹⁾ 杨圣新¹⁾ 张彩虹^{1)2)†} 吴敬波¹⁾²⁾
范克彬¹⁾²⁾ 金飏兵¹⁾²⁾ 陈健¹⁾²⁾ 吴培亨¹⁾

1) (南京大学电子科学与工程学院, 超导电子学研究所, 南京 210093)

2) (紫金山实验室, 南京 211111)

(2022 年 1 月 18 日收到; 2022 年 3 月 23 日收到修改稿)

太赫兹成像在生物医学领域的应用潜力非常大, 针对这个需求, 本文设计并搭建了一种利用光整流和波前倾斜技术产生强场太赫兹信号以及基于电光探测的实时太赫兹 (terahertz, THz) 近场光谱成像系统. 该系统可以进行大视场 THz 成像和紧聚焦 THz 成像的切换使用, 为实现系统集成化应用提供了方法. 并且由于成像是基于传统的太赫兹时域光谱方法, 可以同时获得样品图像光谱幅度和相位信息, 光谱分辨率约 15 GHz. 利用该系统测量研究了一系列微纳加工的样品, 对成像系统的性能进行了分析. 结果表明, 该实时太赫兹近场光谱成像系统在空间分辨率和成像速度上的优越性, 在 1024×512 的像素下, 实时成像帧率高达 20 f/s (1200 张/min). 在大视场 THz 成像下, 空间最优分辨率在 1.5 THz 达 $\lambda/4$; 在紧聚焦 THz 成像下, 空间最优分辨率在 0.82 THz 达 $\lambda/12$, 这些性能使该系统在生物医学成像、生物效应等方面具有很好的应用场景.

关键词: 太赫兹, 近场成像, 时域光谱, 实时帧率**PACS:** 42.15.Eq, 42.30.-d, 42.65.-k, 42.40.My**DOI:** 10.7498/aps.71.20220131

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波 (通常简称为 THz) 通常是指频率 0.1—10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 范围内的电磁辐射, 在电磁波谱中位于微波和红外之间. 太赫兹波具有非常低的光子能量和比微波的更短的波长, 因此太赫兹在物质分析和无损检测等方面具有非常广泛的应用^[1–6]. 由于非常低的光子能量, 不同于目前广泛应用的 X 射线影像学检查面临的辐射电离损伤的潜在危害, 太赫兹成像在生物医学诊断中的应用已经被人们广泛关注^[2,7], 特别是其在肿瘤诊疗中的巨大价值. 因此, 对太赫兹成像系统的深入研究显得尤为重要.

近年来, 诸多太赫兹成像系统已经被报道. 早期, 由 Hu 和 Nuss^[8] 首次提出基于太赫兹时域光谱的成像系统, 该系统完成了太赫兹二维图像的获取, 但是其远场测量受制于衍射极限的限制, 成像分辨率为毫米量级, 且成像时间非常长. 为了解决分辨率的限制, 基于探针扫描太赫兹成像技术^[9,10] 以及基于原子力显微镜成像技术^[11] 可以对样品表面电场进行增强, 实现超高分辨的空间分辨率, 可以突破到亚微米甚至纳米级别, 由于并没有改变逐点扫描的方式, 成像时间较慢, 且对样品与针尖之间的距离要求比较高. 在提升成像时间方面, 基于连续波的 THz 实时快速成像技术^[12] 以及单像素压缩感知成像技术^[13–15] 可以大幅度提升成像的时间, 可以实现样品的实时成像, 但是其缺乏光谱信

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2017YFA0700202, 2021YFB2800701)、国家自然科学基金 (批准号: 61871212, 92163216, 62071217, 62027807)、中央高校基本科研业务费专项资金和江苏省自然科学基金青年基金项目 (批准号: BK20190300) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chzhang@nju.edu.cn

息. 在 1996 年, Wu 等^[16]报道了基于电光取样方法的太赫兹脉冲焦平面成像系统, 该系统首次利用 CCD 相机直接获取样品二维图像信息, 使同时提升成像速度和空间分辨率成为可能. 此后, 人们也通过一些差分探测和光路优化等方法尝试提升系统的信噪比^[17–19], 但依然需要研究太赫兹脉冲与 EO 晶体的相互作用, 实时成像的性能以及结合光谱信息分析空间分辨率.

本文对 LiNbO_3 晶体与不同厚度 EO 晶体的作用效果、实时成像的性能以及时频空间分辨率进行了研究. 利用飞秒激光泵浦非线性晶体产生高强度太赫兹光束, 然后将太赫兹光束分为大视场成像和紧聚焦成像, 用于研究不同应用场景成像效果, 在大视场 THz 成像下, 空间最优分辨率在 1.5 THz 达 $\lambda/4$; 在紧聚焦 THz 成像下, 空间最优分辨率在 0.82 THz 达 $\lambda/12$. 在两种方案之间利用位移台

实现时分复用, 并利用 NIR CCD 相机进行实时成像的性能表征, 在 1024×512 的像素下, 实时采集帧率达 20 f/s (1200 张/min). 本文工作充分平衡系统的成像分辨率与成像速度, 为进一步实现在生物、医学等领域的应用^[20,21]奠定了基础.

2 实验

2.1 实时太赫兹近场光谱成像系统

自主搭建了一套透射式的实时太赫兹近场光谱成像系统, 图 1(a) 是其示意图. 飞秒激光放大器输出激光脉冲中心波长 800 nm, 脉宽 < 100 fs, 重复频率 1 kHz. 根据相干检测原理^[22], 利用 9:1 分束镜 (BS) 将飞秒激光分成泵浦光 (pump beam) 和探测光 (probe beam) 两路光束, 能量较高的光束称为泵浦光, 用于激发非线性电光晶体产生强场

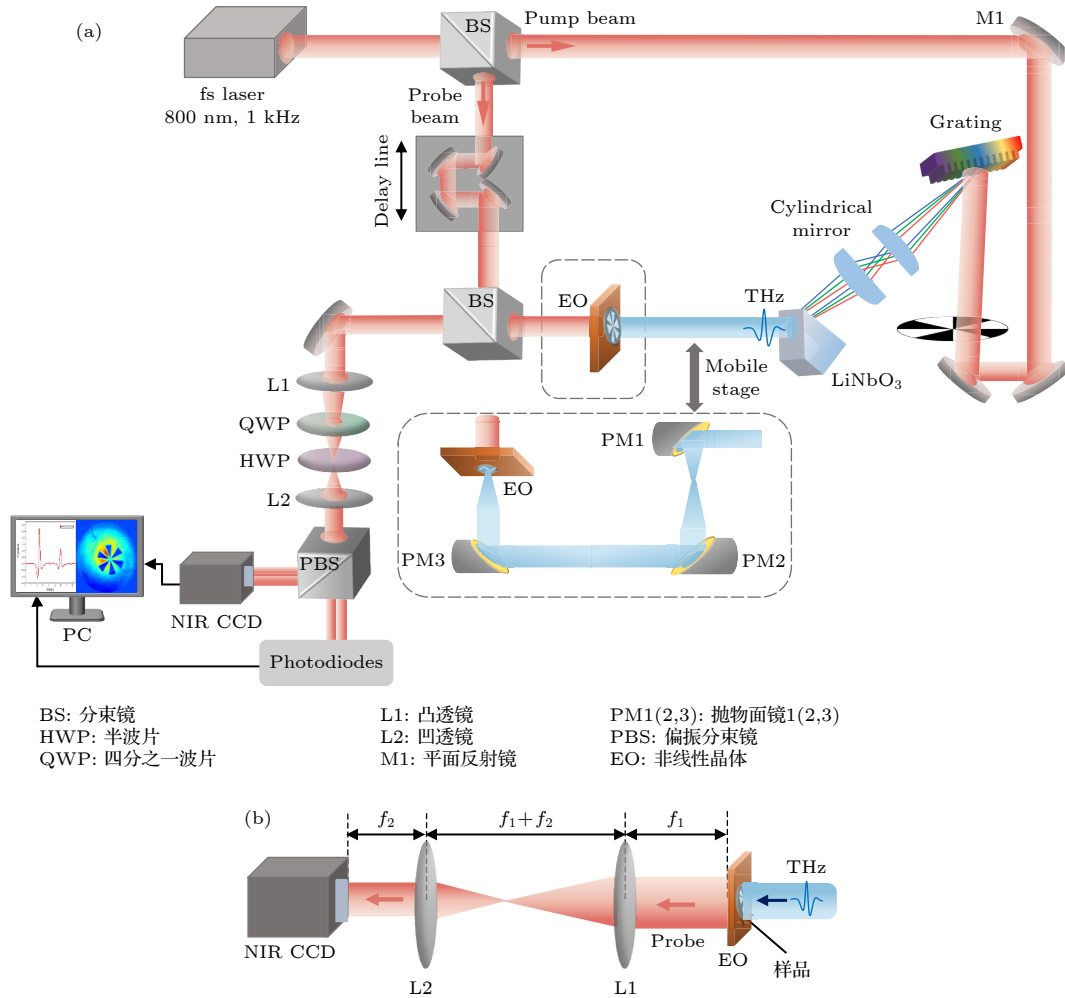


图 1 实时太赫兹近场光谱成像原理图 (a) THz 成像系统结构示意图; (b) THz 实时成像原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of real-time Terahertz near-field spectral imaging: (a) Schematic diagram of THz imaging system; (b) schematic diagram of THz real-time imaging principle.

THz 脉冲, 能量较低的光束称为探测光. 在泵浦光路中, 泵浦光经反射镜 (M1) 和反射光栅 (grating) 到达非线性电光晶体, 这里基于光整流产生强场 THz 的非线性晶体为 LiNbO_3 晶体, 该晶体具有很高的非线性光学系数, 但很难实现共线匹配. 为了提高 THz 的辐射转化效率, 采用光栅对泵浦激光进行波前倾斜, 实现一级衍射光在非线性晶体 LiNbO_3 中的非共线相位匹配来提高太赫兹辐射效率; 在探测光路中, 延迟线用于改变探测光和泵浦光之间的相位差, 探测光经过延迟线后, 与携带样品信息的 THz 脉冲同时到达 EO (electronic optic) 光电晶体, 探测光被 EO 晶体反射后经过四分之一波片 (QWP)、二分之一波片 (HWP) 和偏振分束镜 (PBS) 分成偏振方向互相垂直的两束线偏振光, 这两束线偏振光同时到达 NIR CCD 相机与光电平衡探测器, 这样可以同时获得待测样品的图像信息和光谱信息. 这里选用的 EO 探测晶体为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 厚 $\langle 110 \rangle$ 晶向的 GaP 和 $20\text{ }\mu\text{m}$ 厚 $\langle 110 \rangle$ 晶向的 LiNbO_3 .

太赫兹实时成像原理示意图如图 1(b) 所示, 这里使用复合凸透镜组 L1($f_1 = 500\text{ mm}$) 和 L2($f_1 = 300\text{ mm}$), 将样品紧贴于 EO 探测晶体表面置于 L1 透镜的焦点处, 探测光经过透镜 L1 后聚

焦于复合透镜的共焦点处, 然后经过 L2 后形成平行的光束照射到相机的 CMOS 阵列上. 选用开普勒望远镜系统设计的透镜组是因为探测光在 EO 晶体的二维平面上经过 EO 光电效应直接获得了样品的二维平面信息, 即可以对样品二维平面直接实时面阵成像, 这是和一般对样品逐点扫描成像方式最大的区别, 也是实现实时成像的关键技术. 这里选用的 NIR CCD 相机是 CMOS 面阵相机, 分辨率 2048×1080 , 曝光时间选择 8 ms , 利用斩波器频率 60 Hz 采集一幅含有 THz 信息的图像和一幅不含 THz 信息的背景图像, 两帧图像动态相减, 提升信噪比. 另外, 根据标量衍射理论中的光场传播, 为了突破衍射极限获得高分辨率成像, 可以使用近场成像方式^[23]. 这里我们使用位移台将样品紧贴 EO 晶体, 使两者之间的距离远远小于波长, 减小样品与 EO 晶体之间的衍射, 从而实现了近场探测提高了空间分辨率.

为了适应不同类型样品测量研究需求, LiNbO_3 晶体产生的太赫兹波光路被分为大视场光路和紧聚焦强信号光路. 采用太赫兹相机对光斑进行了测量, 并进行了归一化强度表征, 如图 2 所示. 在大视场光路中, 太赫兹光斑尺寸较大, 直径约为 5 mm

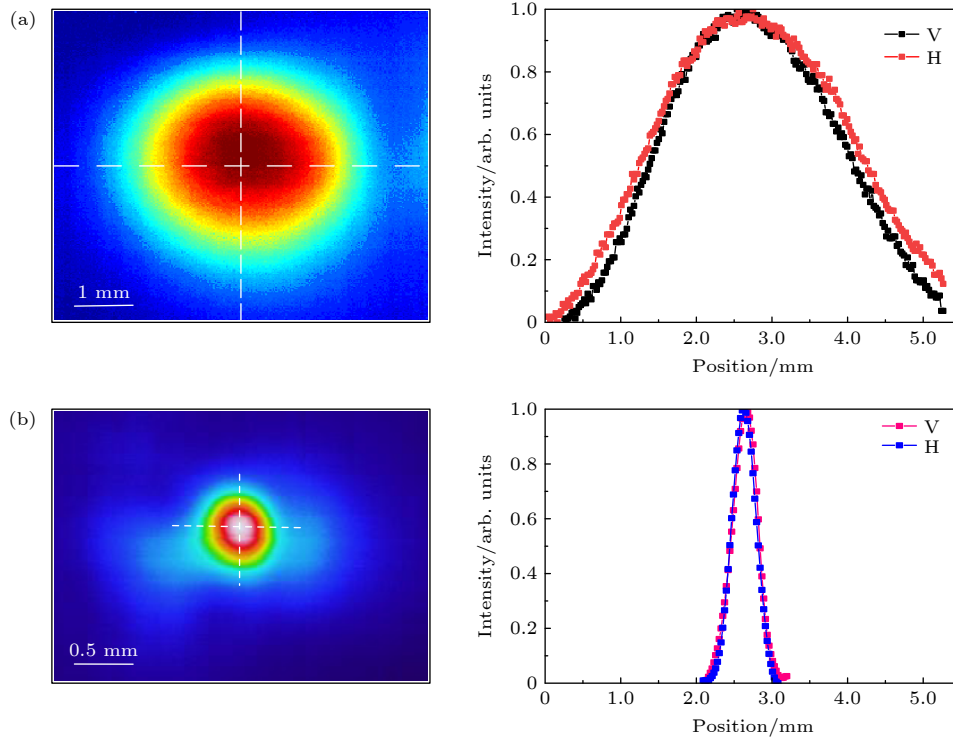


图 2 太赫兹光束图像及横截面轮廓 (a) 大视场光束及横截面轮廓; (b) 紧聚焦光束及横截面轮廓

Fig. 2. Terahertz beam image and cross-sectional profile: (a) Large field of view beam and cross-sectional profile; (b) tightly focused beam and cross-sectional profile.

左右, 具有较大的成像探测面积, 观测视场较大 (光斑如图 2(a) 所示); 聚焦光束利用抛物面镜 (PM1(2, 3)) 进行太赫兹的收集并进聚焦, 聚焦处的太赫兹电场可高达 0.8 MV/cm , 适用于测量研究对 THz 吸收较强、透射信号较小的样品 (光斑如图 2(b) 所示). 我们实现了对两种光束的时分复用探测, 如图 1(a) 中虚线框所示, 两种光束通过电动平移台 (mobile stage) 进行切换使用.

2.2 微纳结构样品制作

为了表征该太赫兹光谱成像系统, 基于微纳加工技术 (光刻、显影、蒸金、剥离) 制作了两种微米尺度的微纳结构样品用于测量研究系统性能. 首先, 选取透明石英作为基底, 这与将结构直接制作在探测晶体上的方法不同^[24], 可以具有很好的灵活性. 然后旋涂 LOR10B 和 AZ1500 两种光刻胶用于剥离工艺, 光刻显影后使用磁控溅射仪蒸镀 200 nm Au 膜, 剥离后得到完整的样品结构, 工艺流程图如图 3(a) 所示.

因为两种光路的光斑面积大小差别较大, 因此

紧聚焦光路采用 $200 \mu\text{m}$ 线宽的‘N’字母进行成像, 而大视场光路采用扇形样品作为成像样品, 扇形样品的直径为 4 mm , 中心最小线宽受制于光刻机的精度误差约在 $5 \mu\text{m}$. 样品设计照片如图 3(b) 所示. 分别将样品结构与探测晶体紧密相贴, 获得近场成像结果, 同时经 NIR CCD 相机实时采集任意时域点处的图像信息.

3 结果分析

3.1 理论分析

首先从理论上分析系统的光谱测量和太赫兹成像空间分辨的影响因素. 对于光谱测量, 构建如图 4 的物理特性模型. 直接测量透过样品的 THz 波的时域脉冲波形, 通过傅里叶变换得到 THz 波脉冲的振幅和相位, 有样品和没有样品数据傅里叶变换的比值可以得到样品的复透射系数, 因此无需 K-K 关系就能得到介电常数的实部和虚部. 在时域波形中, 只取第一个主透射峰时, 薄膜层样品的复透射系数 $H(\omega)$ 可以表示为如下公式^[25]:

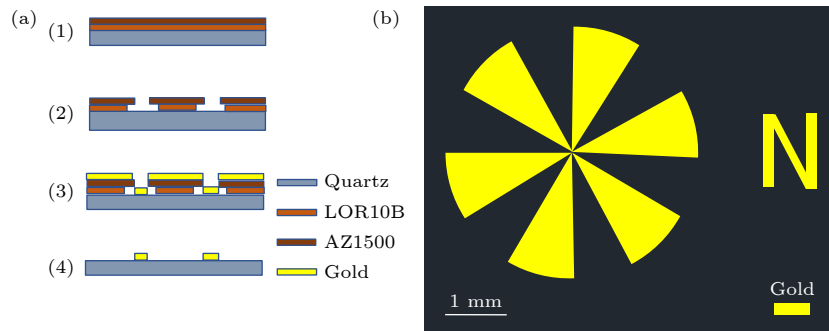


图 3 微结构示意图 (a) 微纳加工流程图; (b) 结构设计图

Fig. 3. Schematic diagram of the microstructure: (a) Micro-nano processing flow chart; (b) structural design drawing.

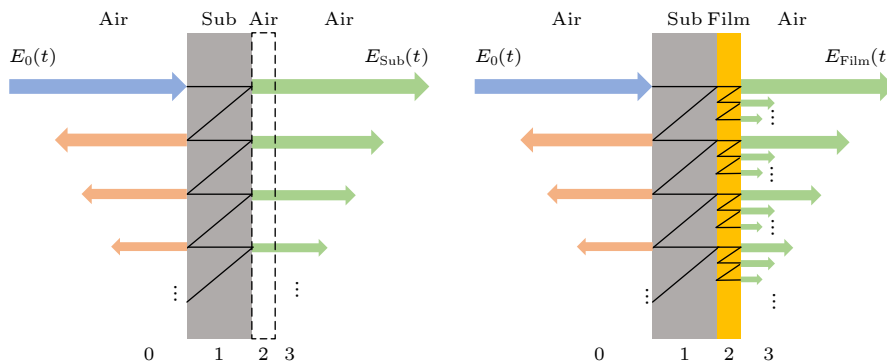


图 4 THz TDS 光谱测量物理特性模型

Fig. 4. Physical characteristic model of THz TDS measurement.

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{film}}(\omega)}{E_{\text{sub}}(\omega)} = \frac{t_{12}t_{23}P_f(\omega, L_2)}{[1 + r_{12}r_{23}P_f(\omega, L_2)]^2 t_{13}P_{\text{air}}(\omega, L_2)}, \quad (1)$$

其中 $E_{\text{film}}(\omega)$ 为样品薄膜时域波形的傅里叶变换; $E_{\text{sub}}(\omega)$ 为基底的时域波形傅里叶变换; t_{12} , t_{23} , t_{13} 分别为太赫兹波通过不同介质的透射系数; r_{12} , r_{23} 为太赫兹波通过不同介质之间的反射系数; $P_f(\omega, L_2)$, $P_{\text{air}}(\omega, L_2)$ 为通过不同介质产生的 THz 波传输变化. $\text{FP} = [1 + r_{12}r_{23}P_f(\omega, L_2)]^2$ 为薄膜中 Fabry-Perot 效应引起的反射信号. 从 (1) 式可以看出, 测得的透射谱主要和样品的光学介电参数有关, 因此样品的光学介电参数不同, 就可以获得不同的 THz 光谱, 即可以获得 THz 光谱成像.

对于太赫兹成像空间分辨率的影响因素, 构建如图 5 所示的物理特性模型. 系统从发射晶体 LiNbO_3 产生太赫兹辐射功率是一样的, 在入射功率一样的情况下, THz 电场和 THz 光斑大小成反比. 大视场下产生的 THz 电场相对较弱, 而紧聚焦小视场下, 产生的 THz 电场则较强. 在 EO 探测中, 探测到的信号满足公式 [26]:

$$\sin^{-1} \left(\frac{I_x - I_y}{I_x + I_y} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} t_{\text{EO}} E_{\text{THz}} L, \quad (2)$$

其中 r_{41} 为探测晶体的非线性系数; t_{EO} 为 EO 探测晶体在 THz 波段的透射系数; L 为 EO 探测晶体的厚度; n_0 为晶体在 800 nm 波段的折射率; E_{THz} 为太赫兹电场强度. 从 (2) 式中可以看出, 较厚的 EO 晶体可以获得更好的信噪比. 但是太赫兹波 (波长几百 μm) 在 EO 探测晶体也存在衍射和吸收, 会影响成像的空间分辨率. 而薄的 EO 晶体可以减少这些影响, 获得较高的成像空间分辨率, 但是又会带来对 EO 晶体电光效应较弱导致信噪比较差的影响. 实验尝试过程中, 尝试了从 20, 100, 300,

500 μm 和 1 mm 等多种厚度的 EO 探测晶体. 最终, 综合考虑信噪比和成像分辨率, 以及购买加工 EO 晶体的因素, 我们在紧聚焦光路中选择效果最佳的 20 μm 的铌酸锂晶体作为 EO 探测晶体; 在大视场光路中, 选择效果最佳的 300 μm 的 GaP 晶体作为 EO 探测晶体.

3.2 紧聚焦 THz 成像结果分析

THz 光谱成像系统的性能关键在于成像的空间分辨率及成像速度. 相比于目前其他基于探针逐点扫描光谱成像而言, 我们的系统在成像速度上得到了很大的提升, 这特别适用于新鲜的生物医学领域组织病理切片的样品, 是太赫兹在生物医学领域广泛应用的可能方面. 由于采用了飞秒激光波段的 NIR CCD 相机, 相当于把 THz 信号转化为飞秒激光信号直接用 NIR CCD 相机采集, 避免了逐点扫描, 直接可以得到完整的一幅图像.

表征该紧聚焦成像系统分辨率时, 我们将微纳加工制作的金属为结构“N”字母样品紧贴于探测晶体表面, “N”最小线宽为 200 μm . 类似于传统的太赫兹时域光谱技术, 改变延迟线位置, 利用光电平衡探测器扫描得到整个时域波形 (图 6(a) 所示), 时域波形包含了全部的频谱信息. 对图 6(a) 经过 FFT 变换后得到频谱图, 如图 6(b) 所示, 在该图中可以看到该样品成像后的有效带宽约 2.0 THz.

首先表征包含全部频谱信息的太赫兹时域图像, 图 6(c) 显示了时域最大值时 (图 6(a) 箭头对应时域值) 的太赫兹图像, 可以看出“N”微结构被很好的显示了出来. 通过 (3) 式定量分析系统的分辨特性:

$$I = (I_0 - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (3)$$

其中 I_0 为实验采集的原始数据信号; I 为归一化后的数值矩阵; I_{\max} 和 I_{\min} 分别为原始数据矩阵中的最大值和最小值, 将上式应用于时域数据和频域数据的归一化处理. 图 6(e) 显示了此时时域图像的空间分辨率, 可以达到约 40 μm . 同时也研究了太赫兹频谱图像的情况, 从频谱图可以看出, 在 0.65 THz 附近信号最强, 这样成像的信噪比和对比度会更好; 随着频率升高, 即波长变短, 分辨率也更好, 对应于样品边缘信息更清晰, 但信噪比降低, 导致样品某些部分会因为信号变差而无法看清. 反之, 随着频率降低, 波长更长, 从而分辨率变差, 如图 6(d) 所示.

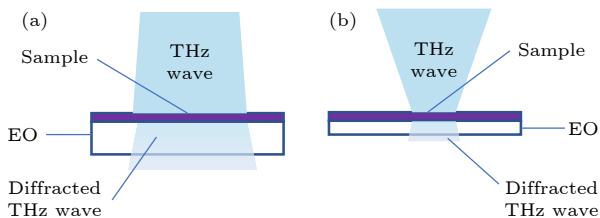


图 5 太赫兹成像物理特性模型 (a) 大视场成像; (b) 紧聚焦成像

Fig. 5. Physical characteristic model of terahertz imaging: (a) Large field of view imaging; (b) tight focus imaging.

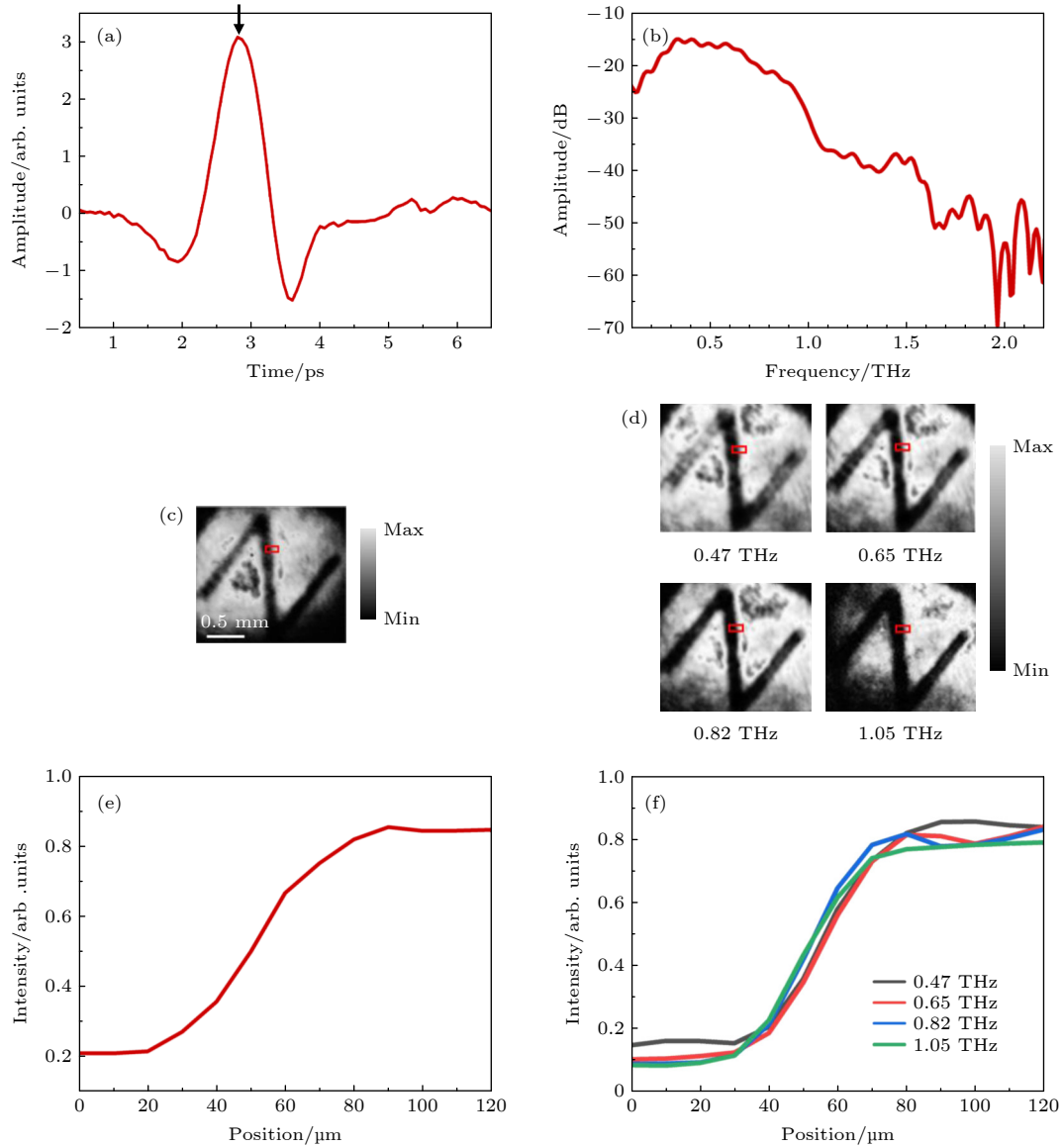


图 6 紧聚焦太赫兹光路“N”结构成像结果分析 (a) 太赫兹时域波形; (b) 太赫兹频域频谱; (c) 时域最大值处对应的 CCD 相机获取的时域样品太赫兹成像; (d) 几个不同频率处的太赫兹成像; (e) 样品时域太赫兹成像分辨率结果分析; (f) 样品频域分辨率结果分析

Fig. 6. THz imaging of the “N” sample by tightly focused THz beam: (a) The terahertz time domain waveform of “N” sample; (b) corresponding terahertz spectroscopy; (c) the temporal THz image from CCD camera when the waveform value is the maximum; (d) corresponding frequency domain THz images; (e) the temporal THz imaging resolution; (f) the frequency THz imaging resolution.

综合频谱图、信噪比和分辨率, 选取了几个频点, 比如 0.47, 0.65, 0.82 和 1.05 THz. 在不同频点位置, 对频域太赫兹成像分辨率进行了分析, 如图 6(f) 所示. 根据文献 [27], 将 THz 信号强度的 10% 至 90% 的变化对应横坐标的变化量作为系统空间分辨率, 可以计算得到紧聚焦光路系统在 0.82 THz 处空间分辨率达 $\lambda/12$, 远远超过了衍射极限.

3.3 大视场 THz 成像结果分析

在大视场光路中, 此时太赫兹场强相对紧聚焦

光束相对较弱, 较厚的 EO 晶体电光效应较强, 可获得更高的信噪比, 但是由于衍射和吸收的存在, 稍微牺牲分辨率, 最终选择 300 μm 的 GaP 晶体作为 EO 晶体. 从发射晶体 LiNbO_3 晶体出射的准平行太赫兹脉冲照射到距离发射源约 12 cm 处的 EO 探测晶体上, 该处的太赫兹光斑如图 2(a) 所示, 该光斑相对紧聚焦光路光斑具有更大的成像面积. 表征该光路的系统分辨率时, 制作了直径 4.0 mm 金属微结构样品, 金属层的厚度为 200 nm, 该厚度大于该 THz 波频段在 Au 中的趋肤深度 [28]. 将样

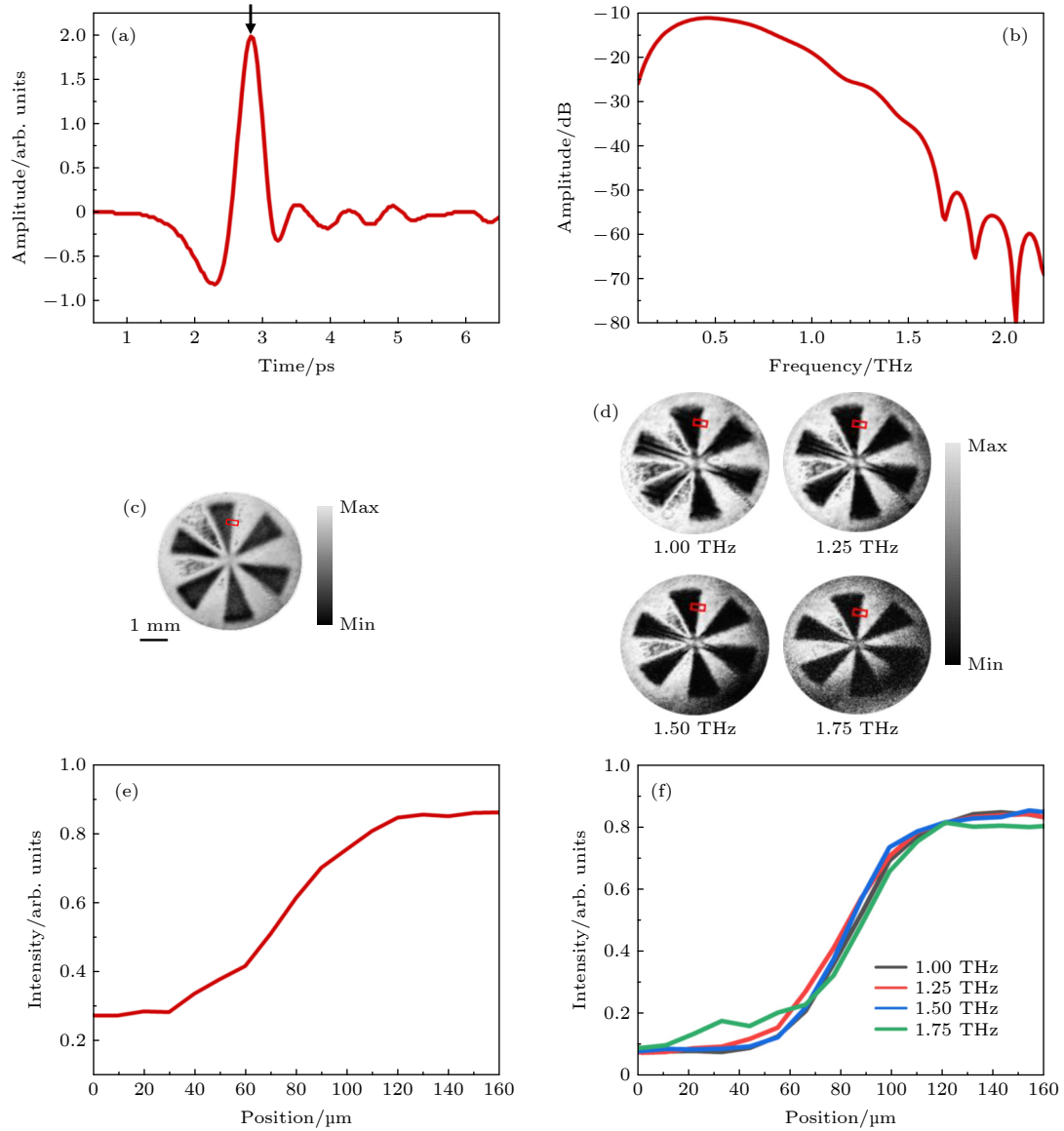


图 7 大视场光路下扇形样品的太赫兹成像结果 (a) 样品太赫兹时域波形; (b) 对应的样品太赫兹频谱; (c) 样品时域最大值处太赫兹成像; (d) 不同频率下太赫兹成像; (e) 样品时域分辨率分析; (f) 样品频域分辨率结果

Fig. 7. THz imaging by large parallel THz beam: (a) The terahertz time domain waveform of the sample; (b) corresponding terahertz spectroscopy; (c) the temporal THz image from CCD camera when the waveform value is the maximum; (d) corresponding frequency domain THz images; (e) the temporal THz imaging resolution; (f) the frequency THz imaging resolution.

品紧贴于探测晶体表面, 通过改变探测光路中的延迟线位置, 利用光电平衡探测器扫描得到整个时域波形 (图 7(a) 所示), 对时域波形进行快速傅里叶变换可以获取频谱信号, 如图 7(b) 所示, 在该图中可以看到该样品成像后的有效带宽约为 2.0 THz.

首先表征包含全部频谱信息的太赫兹时域图像, 图 7(c) 显示了时域最大值时 (图 7(a) 箭头对应时域值) 的太赫兹图像, 可以清楚地看出扇形金属微结构, 中心处线宽接近此时时域最佳分辨效果. 通过 (2) 式定量分析此时系统的分辨特性, 图 7(e) 显示了此时时域图像的分辨率, 可以达到约 60 μm .

同时也研究了太赫兹频谱图像的情况, 从频谱图可以看出低频的频谱图像有较好的成像信噪比和对比度, 随着频率的升高, 即波长变短, 分辨率也更好, 信噪比降低, 对应于样品边缘信息更清晰, 如图 7(d) 所示.

综合频谱图、信噪比和分辨率, 选取 1.0, 1.25, 1.5 和 1.75 THz, 在这些不同频点位置, 分析了对应的分辨效果, 图 7(f) 显示了对应频域图像的分辨率, 根据文献 [27], 将 THz 信号强度的 10% 至 90% 的变化对应横坐标的变化量作为系统空间分辨率, 可以计算得到大视场光路系统在 1.5 THz 处分辨

率达 $\lambda/12$, 实现了超过衍射极限的效果. 这样, 可以稳定进行大视场的生物组织实时成像. 该系统光路在生物医学领域具有非常好的应用潜力.

4 结 论

本文介绍了利用 LiNbO_3 晶体产生强场 THz 脉冲的实时太赫兹近场光谱成像系统. 该系统既可以获得样品的图像信息又可以获得光谱信息. 该系统在探测模块实现紧聚焦光束和大视场光束的时分复用探测, 而且较传统的远场太赫兹时域光谱系统, 它具有更高的空间分辨率和更快的成像速度. 在 1024×512 像素下, 20 f/s 的实时帧率使其在生物医学领域具有非常好的应用前景. 另外, 该系统在太赫兹微结构以及表面等离子体器件等方面也具有很好的应用, 可以推动太赫兹科学技术领域的进一步发展.

参考文献

- [1] Ferguson B, Zhang X C 2002 *Nat. Mater.* **1** 26
- [2] Wang L P, Wu X, Peng Y, Yang Q R, Chen X H, Wu W W, Zhu Y M, Zhuang S L 2020 *Biomed. Opt. Express* **11** 2570
- [3] Wang X K, Cui Y, Dan H, Sun W F, Ye J S, Zhang Y 2009 *Opt. Commun.* **282** 4683
- [4] Yang X, Zhao X, Yang K, Liu Y P, Liu Y, Fu W L, Luo Y 2016 *Trends Biotechnol.* **34** 810
- [5] Ortolani M, Lee J S, Schade U, Hübers H W 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 081906
- [6] Jiang Z, Zhang X C 1999 *Opt. Express* **5** 243
- [7] Peng Y, Shi C, Wang L, Wu X, Zhu Y 2019 *Terahertz Sci. Appl.* TW2F.3
- [8] Hu B B, Nuss M C 1995 *Opt. Lett.* **20** 1716
- [9] Chen H T, Kersting R, Cho G C 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3009
- [10] Xu Y H, Zhang X Q, Wang Q, Tian Z, Gu J Q, Ouyang C M, Lu X C, Zhang W T, Han J G, Zhang W L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 024101 (in Chinese) [许悦红, 张学迁, 王球, 田震, 谷建强, 欧阳春梅, 路鑫超, 张文涛, 韩家广, 张伟力 2016 *物理学报* **65** 024101]
- [11] Cocker T L, Jelic V, Hillenbrand R, Hegmann F A 2021 *Nat. Photonics* **15** 558
- [12] Lee A W, Hu Q 2005 *Opt. Lett.* **30** 2563
- [13] Chan W L, Charan K, Takhar D, Kelly K F, Baraniuk R G, Mittleman D M 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 121105
- [14] Stantchev R I, Sun B, Homett S M, Hobson P A, Gibson G M, Padgett M J, Hendry E 2016 *Sci. Adv.* **2** e1600190
- [15] Chen S C, Feng Z, Li J, Tan W, Du H L, Cai J W, Ma Y C, He K, Ding H F, Zhai Z H, Li Z R, Qiu C W, Zhang X C, Zhu L G 2020 *Light Sci. Appl.* **9** 1
- [16] Wu Q, Hewitt T D, Zhang X C 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1026
- [17] Wang X K, Cui Y, Sun W F, Ye J, Zhang Y 2010 *Opt. Commun.* **283** 4626
- [18] Hirori H, Doi A, Blanchard F, Tanaka K 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 091106
- [19] Zhu L G, Li Z R, Pu Y K 2010 *Opt. Commun.* **283** 1873
- [20] Li Z X, Yan S H, Zang Z Y, Geng G S, Yang Z B, Li J, Wang L H, Yao C Y, Cui H L, Chang C, Wang H B 2020 *Cell Proliferation* **53** e12788
- [21] Han J G, Zhu Y M, Zhang Y X 2019 *Chin. J. Lasers* **46** 0614000 (in Chinese) [韩家广, 朱亦鸣, 张雅鑫 2019 *中国激光* **46** 0614000]
- [22] Wang X K, Cui Y, Sun W, Zhang Y, Zhang C 2007 *Opt. Express* **15** 14369
- [23] Hillenbrand R, Keilmann F 2001 *Appl. Phys. B* **73** 239
- [24] Dio A, Blanchard F, Tanaka T, Tanaka K 2011 *J. Infrared Millimeter Waves* **32** 1043
- [25] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M 2001 *JOSA A* **18** 1562
- [26] Blanchard F, Razzari L, Bandulet H C, Sharma G, Morandotti R, Kieffer J C, Ozaki T, Reid M, Tiedje H F, Haugen H K, Hegmann F A 2007 *Opt. Express* **15** 13212
- [27] Huber A J, Keilmann F, Wittborn J, Aizpurua J, Hillenbrand R 2008 *Nano Lett.* **8** 3766
- [28] Andreev V G, Angeluts A A, Vdovin V A, Lukichev V F 2015 *Tech. Phys. Lett.* **41** 180

Research on terahertz real-time near-field spectral imaging^{*}

Feng Long-Cheng¹⁾ Du Chen¹⁾ Yang Sheng-Xin¹⁾ Zhang Cai-Hong^{1)2)†}

Wu Jing-Bo¹⁾²⁾ Fan Ke-Bin¹⁾²⁾ Jin Biao-Bing¹⁾²⁾

Chen Jian¹⁾²⁾ Wu Pei-Heng¹⁾

1) (*Institute of Superconductor Electronics, School of Electronic Science and Engineering,
Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

2) (*Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China*)

(Received 18 January 2022; revised manuscript received 23 March 2022)

Abstract

In this paper, a real-time near-field high-resolution THz (terahertz, THz) spectral imaging system is designed and built by using optical rectification and wave-front tilting to generate strong-field terahertz signals and based on electro-optical detection. The system can switch between large beam THz imaging and tight-focusing THz imaging, which provides a method for implementing the integrated application of the system. Since the imaging is based on the traditional THz time-domain spectroscopy method, the spectral amplitude and phase information of the sample can be obtained simultaneously. The spectral resolution is about 15 GHz. A series of micromachining samples is measured and studied by using the system, and the performance of the imaging system is analyzed by using the micron structure. The results show the superiority of the real-time high-resolution terahertz spectral imaging system in terms of spatial resolution and imaging speed. The real-time imaging frame rate is up to 20 f/s (1200 frames/min) at 1024 pixel \times 512 pixel. In the large-field THz imaging, the optimal spatial resolution reaches $\lambda/4$ at 1.5 THz. In the tightly focused THz imaging, the optimal spatial resolution reaches $\lambda/12$ at 0.82 THz. These properties make the system suitable for the applications in biomedical imaging, biological effects and other areas .

Keywords: terahertz, near-field imaging, time-domain spectroscopy, real-time frame rate

PACS: 42.15.Eq, 42.30.-d, 42.65.-k, 42.40.My

DOI: 10.7498/aps.71.20220131

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2017YFA0700202, 2021YFB2800701), the National Nature Science Foundation of China (Grant Nos. 61871212, 92163216, 62071217, 62027807), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant No. BK20190300).

[†] Corresponding author. E-mail: chzhang@nju.edu.cn

太赫兹实时近场光谱成像研究

冯龙呈 杜琛 杨圣新 张彩虹 吴敬波 范克彬 金飏兵 陈健 吴培亨

Research on terahertz real-time near-field spectral imaging

Feng Long-Cheng Du Chen Yang Sheng-Xin Zhang Cai-Hong Wu Jing-Bo Fan Ke-Bin Jin Biao-Bing Chen Jian Wu Pei-Heng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 164201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220131

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220131>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

太赫兹雷达散射截面的仿真与时域光谱测量

Simulations and time-domain spectroscopy measurements for terahertz radar-cross section

物理学报. 2019, 68(16): 168701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190552>

飞秒传输表面等离激元的近场成像表征与激发效率的调控

Near-field imaging of femtosecond propagating surface plasmon and regulation of excitation efficiency

物理学报. 2021, 70(10): 107101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201827>

应用太赫兹焦平面成像方法研究氧化镁晶体在太赫兹波段的双折射特性

Birefringence characteristics of magnesium oxide crystal in terahertz frequency region by using terahertz focal plane imaging

物理学报. 2020, 69(20): 208702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200766>

太赫兹散射式扫描近场光学显微镜中探针与样品相互作用及其影响探究

Tip-sample interactions in terahertz scattering scanning near-field optical microscopy and its influences

物理学报. 2021, 70(24): 248703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211715>

基于人工表面等离激元探针实现太赫兹波的紧聚焦和场增强

Tight focus and field enhancement of terahertz waves using a probe based on spoof surface plasmons

物理学报. 2020, 69(5): 054201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191531>

高速太赫兹探测器

Ultrafast terahertz detectors

物理学报. 2018, 67(9): 090702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180226>