

文章编号: 2095-4980(2024)10-1056-07

连续太赫兹单像素亚波长成像系统

王瑞寅^{1a,1b}, 张佳琦^{1a,1b}, 梁家轩^{1a,1b}, 张素恒^{*2}, 田震^{*1a,1b}

(1.天津大学 a.精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; b.佐治亚理工深圳学院, 广东 深圳 518055;
2.河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071002)

摘要: 单像素成像是一种新颖的计算成像技术, 借助于空间光调制, 仅使用一个单像素探测器即可获取物体的图像。为克服太赫兹波段阵列探测器稀缺的难题, 并在近场调制实现亚波长成像, 提出一套基于光泵浦硅晶片的全光调制器的连续太赫兹单像素亚波长成像系统, 可以实现 $\lambda/7.62$ 的空间分辨力。对分辨力测试板的成像结果表明, 对成像细节不特别关注时, 可采用厚硅片获取大调制深度, 并采用压缩重建算法抑制噪声, 平滑输出图像; 若要追求较高的成像空间分辨力, 需采用薄硅片减小调制单元间的串扰, 并采用关联重建算法, 保留更多图像细节。本工作为太赫兹亚波长成像走向实际应用提供了一个新途径。

关键词: 太赫兹亚波长成像; 单像素成像; 压缩感知; 关联重建

中图分类号: TP732.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024162

Research on continuous terahertz single-pixel subwavelength imaging system

WANG Ruiyin^{1a,1b}, ZHANG Jiaqi^{1a,1b}, LIANG Jiakuan^{1a,1b}, ZHANG Suheng^{*2}, TIAN Zhen^{*1a,1b}

(1a.College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
1b.Georgia Tech Shenzhen Institute, Tianjin University, Shenzhen Guangdong 518055, China;
2.College of Physics Science & Technology, Hebei University, Baoding Hebei 071002, China)

Abstract: Single-pixel imaging is a novel computational imaging technique that uses only a single-pixel detector to acquire the image of an object with the help of spatial light modulation. In the terahertz band, to overcome the problem of scarcity of array detectors and realize sub-wavelength imaging in near-field modulation, a continuous terahertz single-pixel subwavelength imaging system is presented based on an optically pumped silicon wafer all optical modulator with a spatial resolution of $\lambda/7.62$. The imaging results on the resolution test chart show that when the imaging details are not of particular interest, thick silicon wafers can be employed to obtain large modulation depths, and the compressive reconstruction algorithm can be adopted to suppress noise and smooth the output images. To pursue higher imaging spatial resolution, thin silicon wafers are needed to reduce the crosstalk between modulation units, and the correlation reconstruction algorithm is employed to retain more image details. This study provides a concise reference for terahertz subwavelength imaging.

Keywords: terahertz subwavelength imaging; single-pixel imaging; compressive sensing; correlated reconstruction

太赫兹波介于微波和红外之间, 具有穿透性强、光子能量低、频谱分辨力高等特性, 使太赫兹成像在安全检查^[1]、无损检测^[2]、材料表征^[3]、生物组织诊断^[4]等应用场景具有极大的潜力。但传统的太赫兹成像技术受限于光学衍射极限, 成像的空间分辨力最高为 $\lambda/2$, 严重限制了太赫兹成像技术的应用场景。因此, 突破衍射极限, 获得亚波长空间分辨图像成为太赫兹成像的研究热点之一。

目前已提出了多种太赫兹亚波长成像技术。近场成像是一类常见的亚波长成像技术, 通过扫描探测太赫兹电磁场中的倏逝波突破极限。目前主要有基于亚波长尺寸孔径的近场成像方案^[5], 亚波长尺寸针尖的近场成像方

收稿日期: 2024-03-18; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 天津市杰出青年科学基金资助项目(20JCJQC00190); 深圳市自然科学基金重点资助项目(JCYJ20200109150212515)

*通信作者: 张素恒 email:shzhang@hbu.edu.cn; 田震 email:tianzhen@tju.edu.cn

案^[6]。这类方法空间分辨性能优异，最高可实现亚纳米尺度的空间分辨力，但需要在样本表面逐点扫描，成像时间较长，探测信号弱，成像受噪声影响大。

单像素成像是一种新颖的计算成像技术，借助于空间光调制，仅使用一个单像素探测器即可获取物体的空间分布信息。因此，单像素成像具有成本低、灵敏度高、光谱范围宽等特点，近年来受到广泛关注^[7]。在太赫兹波段，单像素成像技术不但绕过了阵列探测器难以获取的难题，还可以近场调制实现亚波长成像。2016年，R I Stantchev 等^[8]利用数字微镜装置(Digital Micromirror Device, DMD)将光学图案投影到硅晶片上，形成动态太赫兹掩模，实现了 $\lambda/4$ 分辨的非侵入亚波长成像。随后，该课题组采用相同的方法，使用 $6\ \mu\text{m}$ 的超薄硅片实现了 $\lambda/45$ 的亚波长成像^[9]。2019年，CHEN Sichao 等^[10]进一步对 $180\ \text{nm}$ 的二氧化钒薄膜光泵浦，实现了超过 $\lambda/100$ 的亚波长成像。这种全光调制的动态太赫兹掩模调制速度快，再借助于压缩重建算法，可使成像时间大幅缩短。然而这些太赫兹单像素亚波长成像方案都基于脉冲太赫兹源，且需要采用飞秒脉冲激光作为泵浦光，以获取较大的调制深度。因此，这些单像素亚波长成像系统比较复杂，成本较高，运行维护困难，不利于实际应用。

本文提出一套连续太赫兹波单像素亚波长成像系统。该系统采用连续单频太赫兹源照明，使用单点探测器对被调制太赫兹波的强度进行采集。研究发现旋涂聚[2-甲氧基-5-(2-乙基己氧基)-1,4-苯乙炔](Poly[2-methoxy-5-(2-ethylhexyloxy)-1,4-phenylenevinylene], MEHPPV)有机层，通过钝化表面，大幅降低硅晶片中载流子的复合速度^[11]。因此，该系统采用连续输出的半导体绿光激光器泵浦旋涂有机层的硅片作为太赫兹调制器，使该系统复杂度与成本大幅降低。从分辨力测试板的成像可以得出，该系统可以实现 $\lambda/7.62$ 的空间分辨力。此外，本文还详细探究了调制器厚度与图像重建算法对成像质量的影响。实验结果表明，为获取最佳的成像质量，应根据成像需求，选取合适的硅片厚度与重建算法。本工作为太赫兹亚波长成像走向实际应用提供了一个可行方案。

1 太赫兹近场单像素亚波长成像系统

1.1 实验装置

太赫兹近场单像素亚波长成像系统实验装置如图1所示，整体光路分为太赫兹成像光路与结构泵浦光路两部分，采用实线和虚线分别表示太赫兹波和泵浦光束。

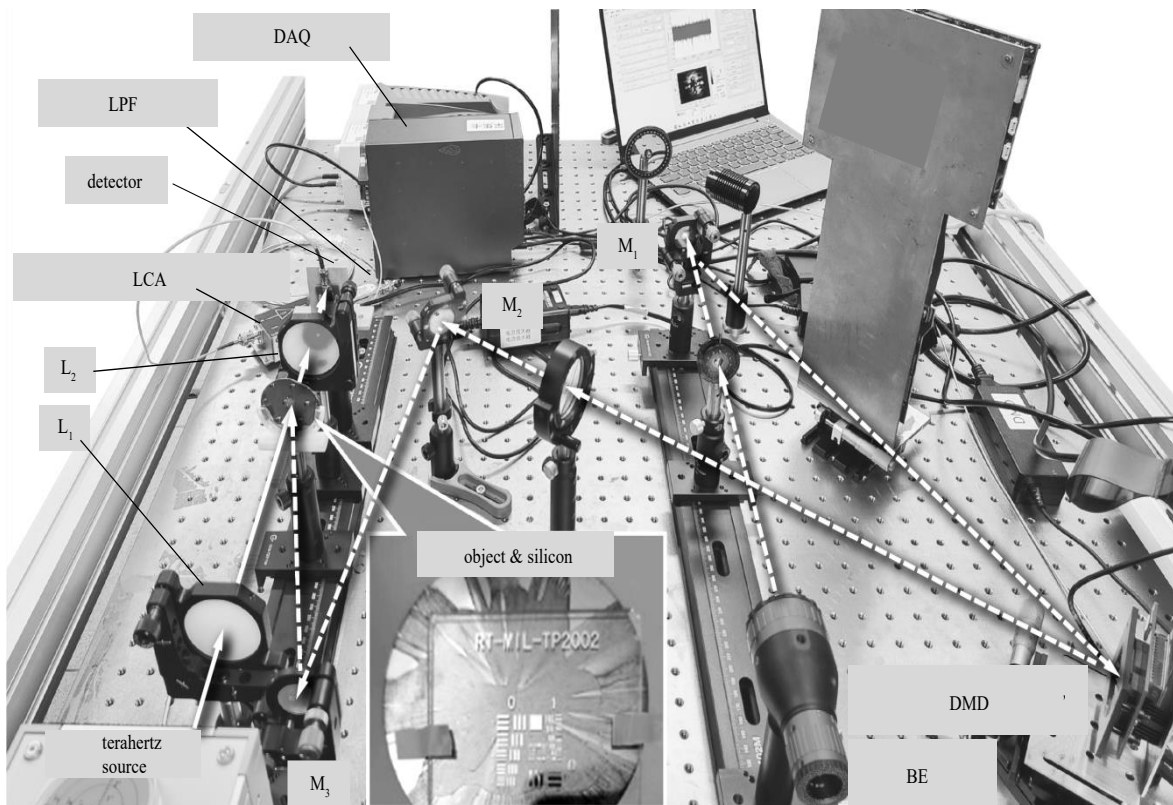


Fig.1 Experimental setup for terahertz near-field single-pixel subwavelength imaging

图1 太赫兹近场单像素亚波长成像实验装置

在太赫兹成像光路中, 连续单频太赫兹源(美国 TeraSense)发出波长为 2.14 mm、功率为 84.9 mW、竖直偏振的太赫兹波。连续太赫兹波经透镜 L_1 准直后, 入射到物体上。物体为 USAF-1951 分辨力测试板, 旋涂有 MEHPPV 的高阻硅片与物体紧密粘贴在一起, 以保证对近场物光波有效调制。经调制后的物光波由透镜 L_2 收集到单点探测器 Detector 的光敏面上。探测信号经低噪声电流放大器(Low-noise Current Amplifier, LCA, 型号为 LCA-200K-20M, 德国 FEMTO 生产)和低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)后, 进入数据采集卡(Data Acquisition, DAQ, 型号为 RZE-004-300, 北京汉通达生产)。在结构泵浦光路中, 由于旋涂了 MEHPPV 的高阻硅片, 可在同等泵浦条件下具有更大调制深度, 因此可使用连续光激光器进行泵浦, 避免了繁琐的延迟线配置, 并大大简化了相应的硬件控制程序, 使整套系统的购置和维修成本更低, 操作更加简单方便, 对人眼的实验安全性更高。本次研究中, 泵浦光源选用了常用易购的半导体激光器(型号为 MGL-FN-532-1W, 长春新产业生产), 发出波长为 532 nm、最大功率 1 W 的激光, 经过扩束器(Beam Expander, BE)后, 由平面镜 M_1 反射到数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD, 型号为 DMD-1K070-02-16, 西安中科微星生产)上。DMD 的反射光透过透镜 L_3 , 再被平面镜 M_2 、 M_3 反射后成像至 MEHPPV 有机涂层, 形成结构泵浦光。旋涂 MEHPPV 的高阻硅片在结构泵浦光的激励下, 产生光生载流子, 形成相应的太赫兹掩模。由于高阻硅片光生载流子弛豫时间相对于 DMD 开关切换时间短, 这种全光调制器可以实现太赫兹波的高速动态空间调制。在实验过程中, DMD 播放调制图案时, 会输出同步信号, 触发 DAQ 同步采集相应的调制信号, 输送给计算机进行图像恢复。

1.2 差分探测

记 N 阶 Walsh-Hadamard 矩阵为 \mathbf{H} , 则二维正交基底矩阵序列 \mathbf{P}_{uv} 可表示为:

$$\{\mathbf{P}_{uv} = \mathbf{H}_u^T \mathbf{H}_v | u, v = 0, 1, \dots, N-1\} \quad (1)$$

式中 \mathbf{H}_u 和 \mathbf{H}_v 分别为 \mathbf{H} 的第 u 和 v 行的行向量。对于 Walsh-Hadamard 矩阵, 第 u 行向量 \mathbf{H}_u 中相邻元素符号改变 u 次。因此, 基底矩阵 \mathbf{P}_{uv} 沿行列两方向符号改变次数分别为 u 和 v 。整套基底矩阵序列 $\{\mathbf{P}_{uv}\}$ 包含所有可能的符号变化, 构成 $N \times N$ 维实空间的正交完备集。由于矩阵 \mathbf{H} 由 +1 和 -1 构成, 基底矩阵 \mathbf{P}_{uv} 元素亦为 +1 和 -1。为了适应 DMD 对泵浦光束和光泵高阻硅对太赫兹波进行 0、1 二值调制的特性, 需将基底矩阵 \mathbf{P}_{uv} 转化为两幅互补的基底图案 $\mathbf{P}_{uv}^{(+)}$ 及 $\mathbf{P}_{uv}^{(-)}$:

$$\mathbf{P}_{uv}^{(+)} = \frac{1}{2}(\mathbf{1} + \mathbf{P}_{uv}) \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_{uv}^{(-)} = \frac{1}{2}(\mathbf{1} - \mathbf{P}_{uv}) \quad (3)$$

实验中将基底图案加载至 DMD 上, DMD 调制入射泵浦光束, 产生相应的结构泵浦光。结构泵浦光通过透镜 L_3 成像至高阻硅片, 产生相应的太赫兹掩模。太赫兹掩模再进一步近场调制太赫兹波, 调制太赫兹波经收集透镜 L_2 后被单点探测器记录。对于两幅互补基底图案 $\mathbf{P}_{uv}^{(+)}$ 和 $\mathbf{P}_{uv}^{(-)}$, 探测信号 $y_{uv}^{(+)}$ 和 $y_{uv}^{(-)}$ 可分别表示为:

$$y_{uv}^{(+)} = \eta \langle \mathbf{f}, \mathbf{P}_{uv}^{(+)} \rangle_{\text{F}} \quad (4)$$

$$y_{uv}^{(-)} = \eta \langle \mathbf{f}, \mathbf{P}_{uv}^{(-)} \rangle_{\text{F}} \quad (5)$$

式中: η 为探测器的效率; \mathbf{f} 为近场物光波的采样矩阵; $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\text{F}}$ 代表 Frobenius 内积。

对两探测信号进行差分, 最终得到基底矩阵 \mathbf{P}_{uv} 的调制信号:

$$y_{uv} = \eta \langle \mathbf{f}, \mathbf{P}_{uv} \rangle_{\text{F}} \quad (6)$$

实际上, 差分探测可解决 DMD 与 Hadamard 基底矩阵的适配问题, 并去除实验过程中均匀背景的影响^[12]。

1.3 图像重建

关联重建算法是单像素成像的一种传统的图像重建算法。由式(6)可知, 测量信号 y_{uv} 反映了近场物光波 \mathbf{f} 与基底矩阵 \mathbf{P}_{uv} 的相关度。关联重建以测量信号 y_{uv} 为权重, 对 Hadamard 基底矩阵序列 $\{\mathbf{P}_{uv}\}$ 进行加权叠加, 即可得到重建图像:

$$\hat{\mathbf{f}} = \sum_{u,v=0}^{N-1} y_{uv} \mathbf{P}_{uv} \quad (7)$$

关联算法仅利用基底矩阵与物体间的相关性重建图像，测量次数多，受环境噪声干扰大。压缩重建算法基于压缩感知理论，在图像重建过程中充分考虑了自然图像的稀疏先验，测量次数少，鲁棒性好，受外界噪声影响小，重建图像质量高。Candes 等^[13]提出的最小全变分法，能够有效解决稀疏图像压缩重构的问题，其理论模型为：

$$\begin{cases} \hat{f} = \arg \min \|f\|_{TV} \\ \text{s.t. } y = \Phi f \end{cases} \quad (8)$$

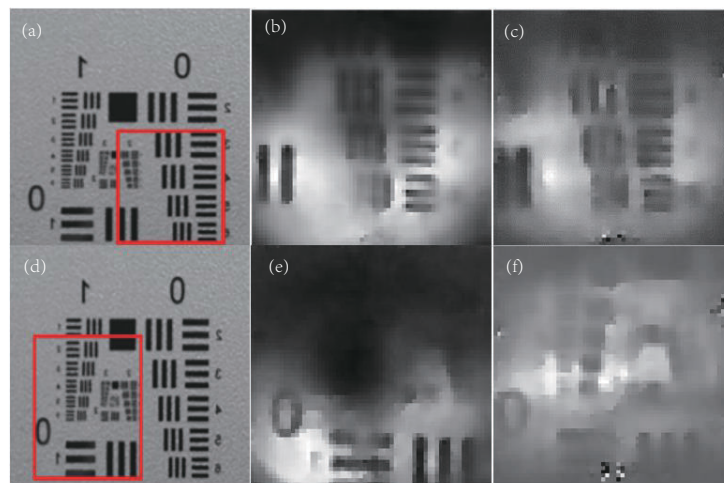
式中： $\|f\|_{TV}$ 表示图像的全变分； y 为所有测量信号 $\{y_w\}$ 构成的列向量； Φ 为测量矩阵，由全部基底矩阵序列 $\{P_w\}$ 构成。Rice 大学 LI Chengbo 提出的 TVAL3 算法，可高效求解最小全变分模型，常用于太赫兹近场单像素亚波长成像^[14]。

2 成像影响因素的探究和分析

实验中，在 DMD 上加载 $N = 64$ 的 Hadamard 基底图案序列，控制成像距离，使高阻硅片上的结构泵浦光的尺寸为 $L \times L = 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。这时硅片上泵浦光的最小结构单元的边长为 $L/N \approx 156 \mu\text{m}$ ，它决定了单像素成像空间分辨力的理论极限为 $\lambda/13.7$ 。为获取较高的成像空间分辨力，进行全采样测量。

2.1 调制器厚度对成像质量的影响

采用求解最小全变分模型的 TVAL3 算法重建图像。实验中选取厚度分别为 $500 \mu\text{m}$ 和 $260 \mu\text{m}$ 的 2 块高阻硅片，旋涂厚度相同的 MEHPPV 有机物，研究调制器厚度对成像质量的影响。首先对分辨力测板中 0 组 4、5、6 单元为主的区域成像，成像区域如图 2(a) 中红色高亮框所示，其中 0 组 6 单元的空间分辨力最高，为 $281 \mu\text{m}$ 。厚度为 $500 \mu\text{m}$ 硅片和 $260 \mu\text{m}$ 硅片成像结果分别如图 2(b)~(c) 所示。然后对分辨力测板中 1 组 2、3、4、5、6 单元为主的区域成像，成像区域如图 2(d) 中红色高亮框所示，其中 1 组 5 单元的空间分辨力已高达 $157 \mu\text{m}$ 。厚度为 $500 \mu\text{m}$ 硅片和 $260 \mu\text{m}$ 硅片成像结果分别如图 2(e) 和 2(f) 所示。



(a) imaging of the resolution plate 0 group; (b) imaging results for $500 \mu\text{m}$ wafer at 0 group; (c) imaging results for $260 \mu\text{m}$ wafer at 0 group; (d) imaging of the resolution plate 1 group; (e) imaging results for $500 \mu\text{m}$ wafer at 1 group; (f) imaging results for $260 \mu\text{m}$ wafer at 1 group

Fig.2 Comparison of experimental imaging results for different wafer thicknesses

图2 不同厚度硅片的成像实验结果对比

对比图 2(b) 和图 2(c) 可知，当物体的空间分辨力远低于单像素成像空间分辨力的理论极限时， $500 \mu\text{m}$ 的硅片成像质量比 $260 \mu\text{m}$ 的硅片成像质量好。这是由于在相同的泵浦条件下，较厚的硅片中载流子扩散的距离更长，通过载流子的碰撞产生载流子的复合更不容易，因此产生的光生载流子的浓度更大，对太赫兹物光波的调制深度也较大，成像的对比度较高，抗噪声干扰的能力较强，成像更平滑。从图 2(b) 可以看出，选择 $500 \mu\text{m}$ 的硅片作为调制器时，成像结果可以清楚地分辨 0 组 6 单元的水平线，因此成像的实际空间分辨为 $281 \mu\text{m}$ 。而太赫兹波的波长为 $\lambda = 2.14 \text{ mm}$ ，因此，本成像系统的实际空间分辨力为 $\lambda/7.62$ 。此外，从图 2 的实验结果还可以看出，对

水平线的成像比竖直线的效果要好，这是因为太赫兹波为竖直线偏振。若需要成像不出现空间异性，可采用圆偏振太赫兹波照明。

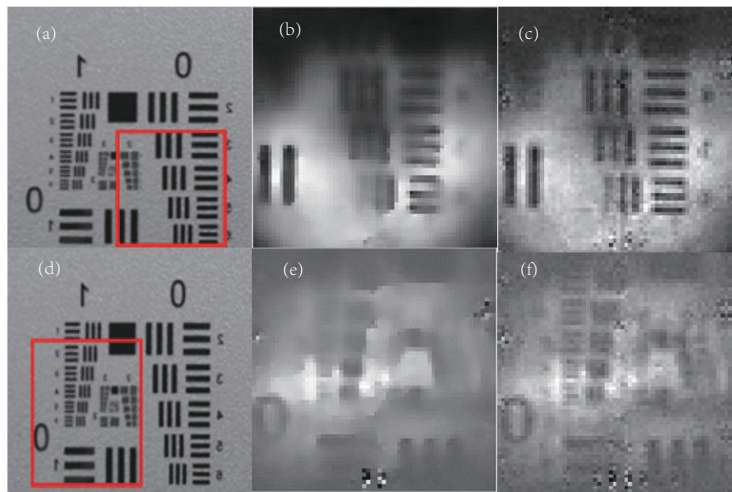
当物体的空间频率接近单像素成像空间分辨力的理论极限时，从图 2(e)可以看出，500 μm 的硅片对分辨力测板中 1 组的成像完全失效。而在 260 μm 的硅片成像结果图 2(f)中，却可以分辨出 1 组 2、3、4、5、6 单元的轮廓。这是因为光生载流子在 500 μm 厚的硅片中扩散比较大，太赫兹掩模中各调制单元间串扰明显，限制了成像的实际空间分辨力无法达到理论极限，使成像失效。而对于 260 μm 厚的硅片，调制单元间串扰减小，成像的实际空间分辨力提升，成像细节丰富。

在泵浦条件相同时，应该根据成像需求，选择合适厚度的调制器，获取较大的调制深度和能够容忍的串扰水平，实现最佳的成像效果。

2.2 重建算法对成像质量的影响

以前许多太赫兹近场单像素成像的研究工作中，经常采用基于最小全变分的压缩重建算法。因为这类算法可以实现大压缩率的欠采样成像，有效提升了成像速度，同时具有很强的噪声抑制能力，重建图像比较平滑。本文实验发现，即使在全采样时，压缩重建算法仍会牺牲成像的分辨力和对比度，而简单的关联重建算法却能获取更多的图像细节和较高的对比度。

利用 500 μm 硅片作为调制器，对图 3(a)中红框内的感兴趣区域成像，TVAL3 算法重建的图像如图 3(b)所示，而关联重建图像如图 3(c)所示。对比图 3(b)和 3(c)可知，关联重建图像空间分辨力更高，对比度更大，但噪声也比较明显。利用 260 μm 硅片作为调制器，对图 3(d)中红框内的感兴趣区域成像，TVAL3 算法重建的图像如图 3(e)所示，而关联重建图像如图 3(f)所示。对比图 3(e)和 3(f)可以看出，关联重建图像可以分辨出 1 组各单元内的水平线。



(a) imaging of the resolution plate 0 group; (b) compressive reconstructed images for 500 μm wafer; (c) correlated reconstructed images for 500 μm wafer; (d) imaging of the resolution plate 1 group; (e) compressive reconstructed images for 260 μm wafer; (f) correlated reconstructed images for 260 μm wafer

Fig.3 Comparison of experimental imaging results between compressive and correlated reconstruction algorithms

图 3 压缩与关联重建算法成像实验结果比较

综合调制器厚度和重建算法对成像质量的影响可知，当对成像细节不特别关注时，可采用厚硅片以获取大调制深度，并采用压缩重建算法来抑制噪声，平滑输出图像；若要追求较高的成像空间分辨力，需采用薄硅片以减小调制单元间的串扰，并采用关联重建算法，保留更多图像细节。

2.3 字母的成像结果

为进一步验证上述结论，对如图 4(a)所示的字母“RT-MI”进行成像。采用 500 μm 硅片作为调制器，利用 TVAL3 压缩重建的图像如图 4(b)所示(比例尺为 2 mm)。此时成像整体比较平滑，噪声被有效抑制，字母“R”成像的对比度较高，易于辨识；而对细节丰富的字母“M”，则成像比较模糊，不易辨识。采用 260 μm 硅片作为调制器，关联重建的图像如图 4(c)所示(比例尺为 2 mm)。此时所有字母成像的细节都比较丰富，易于辨识，但由于调制深度变小，重建算法抗噪能力差，图像整体对比度不高，噪声较大，这些实验结果与上述结论一致。

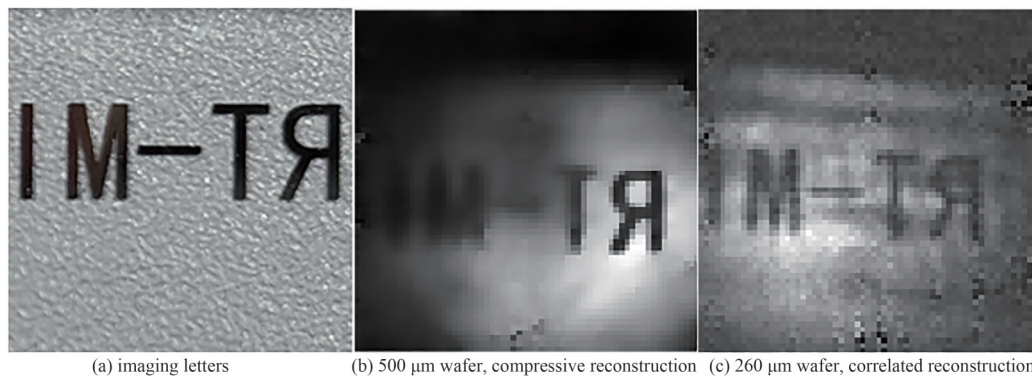


Fig.4 Experimental results for imaging letters

图4 字母成像的实验结果

3 结论

本文提出了一套连续太赫兹单像素亚波长成像系统，结构简单，成本低廉。该系统采用旋涂了MEHPPV的硅晶片作为调制器，仅需连续输出的半导体激光器作为泵浦源，即可形成太赫兹掩膜，从而实现连续单频太赫兹波的有效调制。本文利用该系统成功实现了空间分辨率为 $\lambda/7.62$ 的亚波长成像。实验结果表明，硅片越厚，调制深度越大，成像对比度越高，噪声越小，但调制单元间的串扰也越大，成像的实际空间分辨力会随之降低。此外，本文还发现，压缩重建算法，虽然抗噪能力较强，输出图像比较平滑，但会牺牲成像的空间分辨力。即使在全采样的情况下，压缩重建相较于关联重建仍会引起成像细节丢失。因此，追求较高的成像空间分辨力，应采用关联重建算法。

目前，采用260 μm 硅片已出现太赫兹波调制深度不足的现象，成像噪声较大，对比度不高。若要进一步提升系统的空间分辨能力，需采用更薄的硅片。因此后续工作可采用半导体调Q激光器进行泵浦，以提高太赫兹波的调制深度，改善成像质量。随着系统复杂度与成本的降低，太赫兹单像素亚波长成像会逐步走向实际应用。

参考文献：

- [1] TAKIDA Y, NAWATA K, MINAMIDE H. Security screening system based on terahertz-wave spectroscopic gas detection[J]. *Optics Express*, 2021,29(2):2529–2537. doi:10.1364/OE.413201.
- [2] TAO Yuheng, FITZGERALD A J, WALLACE V P. Non-contact, non-destructive testing in various industrial sectors with terahertz technology[J]. *Sensors*, 2020,20(3):712. doi:10.3390/s20030712.
- [3] 金玉环,朱凤霞,封建欣. 基于太赫兹技术的复合材料无损检测研究综述[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2023,21(11):1295–1305. (JIN Yuhuan, ZHU Fengxia, FENG Jianxin. Review of nondestructive testing of composites based on THz technology[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2023,21(11):1295–1305.) doi:10.11805/TKYDA 2022237.
- [4] JIANG Liwen, ZHANG Ke, YAO Yixin, et al. Terahertz optoacoustic detection of aqueous salt solutions[J]. *iScience*, 2022,25(7):104668. doi:10.1016/j.isci.2022.104668.
- [5] HUNSCHE S, KOCH M, BRENER I, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1/6): 22–26. doi:10.1016/S0030-4018(98)00044-3.
- [6] SAWALLICH S, GLOBISCH B, MATHEISEN C, et al. Photoconductive terahertz near-field detectors for operation with 1550 nm pulsed fiber lasers[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016,6(3):365–370. doi:10.1109/TTHZ.2016. 2549365.
- [7] YANG Xingye, TIAN Zhen, CHEN Xieyu, et al. Terahertz single-pixel near-field imaging based on active tunable subwavelength metallic grating[J]. *Applied Physics Letters*, 2020,116(24):241106. doi:10.1063/5.0010531.
- [8] STANTCHEV R I, SUN Baoqing, HORNETT S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. *Science Advances*, 2016,2(6):e1600190. doi:10.1126/sciadv.1600190.
- [9] STANTCHEV R I, PHILLIPS D B, HOBSON P, et al. Compressed sensing with near-field THz radiation[J]. *Optica*, 2017,4(8):989–992. doi:10.1364/OPTICA.4.000989.
- [10] CHEN Sichao, DU Lianghui, MENG Kun, et al. Terahertz wave near-field compressive imaging with a spatial resolution of over $\lambda/100$ [J]. *Optics Letters*, 2019,44(1):21–24. doi:10.1364/OL.44.000021.
- [11] HE Ting, ZHANG Bo, WANG Guocui, et al. High efficiency THz-wave modulators based on conjugated polymer-based organic films[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016,49(7):075111. doi:10.1088/0022-3727/49/7/075111.

- [12] ZHAO Yanan, WANG Li, BIAN Shuanglong, et al. Single-pixel real-part and magnitude imaging system based on digital micromirror device[J]. Applied Physics Letters, 2023,123(19):191103. doi:10.1063/5.0176097.
- [13] CANDLES E J,TAO T. Decoding by linear programming[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2005,51(12):4203-4215. doi:10.1109/TIT.2005.858979.
- [14] LI Chengbo. An efficient algorithm for total variation regularization with applications to the single pixel camera and compressive sensing[J]. Dissertations&Theses Gradworks, 2011(11510):115102Y. doi:10.1117/12.2568954.

作者简介:

王瑞寅(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像 .email:wangruiyin@tju.edu.cn.

梁家轩(1995-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹光声成像.

张佳琦(1995-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像.

张素恒(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为关联成像与计算成像.

田震(1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为太赫兹调控与探测.

(上接第1055页)

- [8] 刘焯. 多层LCP电路中过孔互联结构的建模研究[D]. 西安:西安邮电大学, 2024. (LIU Ye. Modeling study of via hole interconnection structure in multilayer LCP circuit[D]. Xi'an,China:Xi'an University of Posts&Telecommunications, 2024.) doi: 10.27712/d.cnki.gxayd.2023.000043.
- [9] GAO Dong, YANG Biao, DUAN Xidong, et al. Research on the influence of vias on signal transmission in multi-layer PCB[C]// 2017 the 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments(ICEMI). Yangzhou,China:IEEE, 2017: 406-409. doi:10.1109/ICEMI.2017.8265976.
- [10] JIZAT M N, YUSOFF Z, MOHD MARZUKIA S, et al. Insertion loss and phase compensation using a circular slot via-hole in a compact 5G millimeter wave(mmWave) butler matrix at 28 GHz[J]. Sensors, 2022,22(5):1850. doi:10.3390/s22051850.
- [11] ZHANG Yaojiang, FAN Jun, SELLI G, et al. Analytical evaluation of via-plate capacitance for multilayer printed circuit boards and packages[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(9): 2118-2128. doi: 10.1109/TMTT.2008.2002237.

作者简介:

郑磊(1983-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波毫米波电路与系统 .email:zhengl21@mail.tsinghua.edu.cn.

金颖康(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁波成像与安检应用.