

文章编号: 2095-4980(2020)03-0351-07

基于空间型调制器的太赫兹波快速成像技术

朱韵樵, 申朝阳, 张 豪, 何雨莲, 文岐业*

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 611731)

摘 要: 为解决主流太赫兹成像技术在成像速度、分辨力、清晰度以及制造成本等方面存在相互制约的问题, 提出一种基于光控型空间调制器的太赫兹波快速成像技术。这一技术利用新型硅基太赫兹调制材料与数字微镜阵列器件(DMD)的集成, 实现了基于单像素太赫兹探测器的快速成像, 进一步分析了太赫兹波束分布特性和高斯背景对成像效果的影响, 并提出了有效的优化方法。实验结果证实这种新型技术能够显著提高成像分辨力和清晰度。

关键词: 太赫兹波; 成像技术; 空间调制器; 单像素探测器; 黑硅

中图分类号: TN761

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019060

Fast imaging technology of terahertz wave based on spatial modulator

ZHU Yunqiao, SHEN Zhaoyang, ZHANG Hao, HE Yulian, WEN Qiye*

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: The mainstream terahertz imaging technology has mutual constraints in imaging speed, resolution, sharpness and manufacturing cost, etc. A fast terahertz wave imaging technology based on a light-controlled spatial modulator is proposed. This technology realizes the single-pixel terahertz detector by integrating the new silicon-based terahertz modulation material with the commercial Digital Light Processing(DLP) device. The influence of terahertz beam distribution characteristics and Gaussian background on imaging results is further analyzed. An effective optimization method is proposed. The rapid imaging results confirm that this new technology can significantly improve the imaging resolution and clarity.

Keywords: terahertz wave; imaging technology; spatial modulator; single-pixel detector; black silicon

太赫兹(THz)波是频率范围为 0.1~10 THz(波长 3 000~30 μm)的电磁波谱。太赫兹波具有带宽大、穿透性强、对人体无电离辐射以及对生物大分子具有特征谱线等波谱特性, 在人体安检^[1]、缺陷检测^[2]和医学诊断^[3]等领域具有广泛的应用前景。根据成像探测的方式不同, 太赫兹成像可分为焦平面阵列式太赫兹探测成像和单点机械扫描太赫兹成像。阵列太赫兹探测器作为焦平面阵列式太赫兹成像系统的探测装置, 其对制作工艺有很高的要求, 制作成本高昂, 且抗干扰的能力弱, 容易被串扰, 对系统环境要求较高^[4]。相对阵列式太赫兹成像, 单点扫描太赫兹成像只使用一个单像素的探测器(Single-Pixel Detector, SPD), 采用机械移动的方式对样品进行扫描成像, 具有成本低, 结构简单, 抗干扰能力强等优点^[5]。但由于 SPD 成像必须采用机械扫描的方式, 成像速度相对较慢, 同时也增加了系统体积。

针对以上成像方法存在的不足, Daniel M. Mittleman 研究小组最近提出了一种利用太赫兹波的空间编码技术结合 SPD 进行成像的新方法^[6]。其核心部分是太赫兹波的空间编码技术, 即太赫兹波在被探测之前经过了一个空间型太赫兹调制器(Spatial Terahertz Modulator, STM), 该调制器在空间上对太赫兹波束(波前)编码成 $M \times N$ 的单元阵列, 每一个单元均可通过调制器进行幅度或相位的调制。被调制的太赫兹波信号被一个单像素的探测器按一定的时间顺序所接收, 形成一个时间序列, 最后通过计算机算法就能够重构出太赫兹的空间分布图像^[7]。在操

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 科学挑战计划项目(TZ2018003); 国家自然科学基金项目资助(51572042, 61831012); 科技部国际科技合作项目资助(2015DFR50870)

作者简介: 朱韵樵(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹成像。email:645179873@qq.com

*通信作者: 文岐业 email:qywen@163.com

作过程中,既可以每次选择一个单元进行调控,从而实现对太赫兹波前进行扫描,也可以结合压缩感知算法,按特定的编码规则同时对多个单元进行调制。简而言之,利用空间编码技术,可以将太赫兹波前的空间分布按一定的编码规则转变为时间分布,这使得利用一个 SPD 即可以在不进行机械扫描的情况下实现太赫兹波成像。这一技术在技术复杂度、速度、成本、分辨力等各方面能达到比较好的综合性能,因此在实际应用中显示出巨大的优越性^[8]。但这一技术面临的主要技术难点是如何制备高性能的空间调制器件,使其在调制深度、调制速度、像元密度、器件插损、可集成度以及制备成本等方面满足太赫兹实时成像的需求。2014年,Willie J. Padilla 小组利用人工电磁超材料成功制作出 8×8 像素的电控型太赫兹空间型调制器^[9],虽然调制深度高,但由于超材料本身的特性,该调制器只能窄带操作,插入损耗大,布线复杂,制作工艺难度很大,因此很难进一步提高像元密度。

实际上,利用光泵浦半导体材料是实现高密度太赫兹空间调制器件的一个重要方法。硅作为现代半导体技术的基础材料,适合于激光泵浦的带隙宽度,是最早被证明可用来实现光控太赫兹调制器件的半导体材料^[10]。硅在激光的照射下产生光生载流子,形成对太赫兹波具有高吸收或高反射的瞬态区域,从而实现对太赫兹波透射的有效调制^[10-11]。在已有的研究中,利用普通高阻硅片已成功制备了可重构的太赫兹波准光部件^[12],实现了太赫兹波前调制和波谱成像^[13]等。更重要的是,随着硅基光电系统和太赫兹应用系统快速崛起,硅基功能器件有望与新兴的硅基光电系统与太赫兹应用系统集成,显著降低系统的开发成本。但常规的高阻硅片对激光(~40%)和太赫兹波(~30%)均表现出一定的反射特性,极大限制了它能达到的调制效果。前期实验证明,在波长为 800 nm 的飞秒激光作用下,硅晶片对 THz 波的调制深度(Modulation Depth, MD)仅为 19.9%。实际上如果泵浦激光强度足够高,硅的太赫兹波调制深度可达到 98.6%^[14]。为提高硅基调制器的调制深度,许多学者通过在硅的表面上覆盖微纳米结构,如金属颗粒膜层^[14]、石墨烯^[15-16]、薄的有机材料^[17]等。这些复合层被证实可以提高调制深度,降低泵浦激光功率。最近,展示了一种用于光控 THz 调制器的硅纳米针尖阵列结构^[18]。该纳米针尖阵列可以同时作为太赫兹波和可见光的减反射层,实现具有显著增强的调制深度、低损耗和宽光谱的太赫兹调制器。该调制器不是在硅上制造异质材料,而是直接从硅衬底蚀刻 SiNT,因此结构稳定。与裸硅制造的调制器相比,使用 SiNT 调制器可以实现近 3 倍的调制深度。更重要的是,由于在硅表面上形成渐变折射率,形成对太赫兹波的抗反射层, SiNT 调制器对太赫兹透射率高达 90%。

本文通过搭建基于空间型太赫兹调制器的成像系统,实现了在太赫兹波段的单像素成像。研究了 2 种不同的空间型太赫兹调制器,对比成像图并进行了分析。研究表明,调制器调制深度的不同,对成像结果有非常明显的影响。在数据处理阶段,采用先对太赫兹波束成像从而消除太赫兹波高斯背景的方法,有效改善了成像的效果。相较于利用已有的太赫兹相机进行成像的方式,本文所提出的太赫兹成像方法具有系统搭建成本低,结构简单,抗串扰能力强和可成像频带宽等优点。

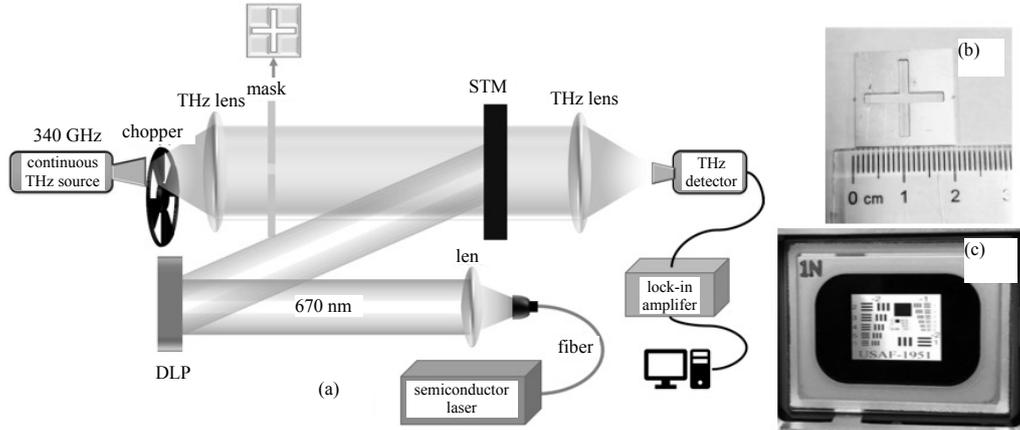
1 基于空间型调制器的太赫兹成像系统及机理

1.1 成像系统结构

搭建的太赫兹成像系统由太赫兹连续波源(Virginia Diodes Inc, VDI)(型号 WR2.8ZBD)、太赫兹透镜、自主研发的空间型太赫兹调制器、肖特基二极管接收器、半导体激光器、数字光控系统(DLP)(型号 7000VIS)、NI 数据采集卡、斩波器、锁相放大器(SSI OE1201)和计算机等装置组成,成像原理见图 1(a)。太赫兹源的中心频率为 340 GHz,功率为 2 mW。实验中,探测信号的噪声很大,当调制信号较弱,信号经常会被噪声淹没,因此使用锁相放大器滤除噪声,提高系统的信噪比。给输入信号添加一个偏离噪声频率的固定调制频率,并将同步的调制信号和从太赫兹探测器上采集到的信号同时作为参数输入,用于锁相放大器滤除噪声。在太赫兹波连续源的后面放置斩波器。系统中使用 2 个聚乙烯太赫兹透镜(直径和焦距都为 500 mm),对太赫兹波进行整形(对太赫兹波进行聚焦和扩束)。太赫兹波束被透镜整形成平行波束(直径约 2 cm),再穿过待成像物体,形成有空间分布的太赫兹波,照射在空间型太赫兹调制器上。从光学系统投影过来的激光光束(中心波长为 670 nm)也一同照射在空间型太赫兹调制器上,由调制器对太赫兹波进行空间编码。经过编码处理的太赫兹波穿过成像物体(本研究采用镂空十字架,见图 1(b))。最后,太赫兹信号被太赫兹透镜聚焦到 SPD 探测器上,将太赫兹波信号转换成电学信号,输入到锁相放大器,经电脑处理数据,重构出图像。

在光学系统部分,最核心是 DLP 数字光学控制器件,它由 2 部分组成:数字微镜阵列(Digital Micromirror Device, DMD)和控制芯片组(Extended Graphics Array, XGA)。DMD 的有效工作面积为 14.0 mm×10.5 mm,包含了 1 024×768 个铝制微米尺寸反射微镜,每一个微镜可单独控制,微镜的可倾斜角度为 12°。图 1(c)为利用 DLP 投影的一个标准 USAF-1951 分辨力图形,该设备至少可以获得 13.68 μm(也是每个微镜的长度)的分辨力。

更重要的是，DLP 投影一个完整图形的速度高达 32 kHz，这满足太赫兹实时成像的要求。然而，DLP 所能承受的激光功率(即抗损伤阈值)跟入射波的波长有关。对于 400 nm 以下或 700 nm 以上的激光，器件的抗损伤阈值仅有 10 mW/cm² 左右，这么低的激光功率很难获得较大的调制深度。而对 400~700 nm 的激光，器件能够承受的激光功率高达 20 W/cm²[19]。基于此，选择中心波长为 670 nm 的半导体激光器作为泵浦激光源，其激光功率密度约为 2 W/cm²，对于 DLP 器件是安全的。



(a) schematic diagram of a single-pixel terahertz imaging system; (b) physical map of the obstruction; (c) physical map of DMD projected with the USAF-1951 resolution pattern

Fig.1 Single-pixel terahertz imaging system based on terahertz spatial modulator

图 1 基于太赫兹空间调制器的单像素太赫兹成像系统

1.2 硅基空间型太赫兹调制器

半导体硅的禁带宽度为 1.12 eV，如果用光子能量大于其禁带宽度的激光照射，会在硅的表面激发出大量的光生载流子，对太赫兹波产生较强的吸收，从而能够阻碍电磁波的通过。利用这个原理可以对太赫兹波进行幅度调制。由于光生载流子的侧向扩散受载流子寿命和迁移率的限制，一定程度上抑制了不同光照区域间的相互影响，光生载流子层的空间分布形状就具有可控性[11]。因此可以通过外加激光控制硅表面载流子的空间分布，实现对太赫兹波的空间编码调控。此外，硅的成本低廉，加工工艺成熟，且易于与现有的硅基太赫兹器件相集成。因此，以硅为代表的半导体材料是构建空间型太赫兹调制器的理想材料。

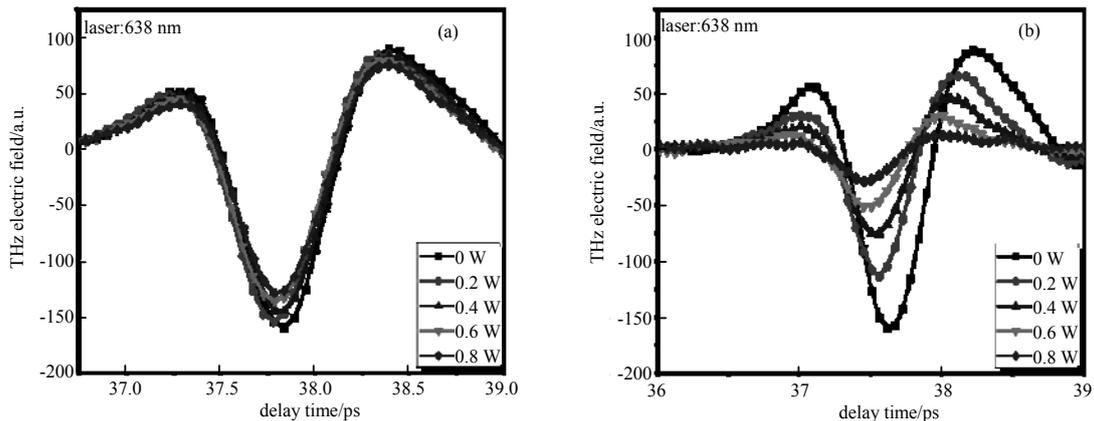


Fig.2 Terahertz time-domain spectrum of (a) high-resistance silicon and (b) microstructured silicon-based modulator structure under 638 nm laser

图 2 638 nm 激光作用下(a)高阻硅片与(b)微结构硅基调制器结构的太赫兹时域谱

本实验采用电阻率大于 1 000 Ω·cm 的高阻硅片。常规的抛光硅片对激光有较高的反射率，对于波长为 400~1 100 nm 之间的光反射率达到 40%，甚至更多，这影响了其对泵浦激光的吸收和利用，需要较强的激光功率才能获得满足要求的调制效果[20]。不仅如此，所反射的激光也增加了对系统的干扰，影响成像质量和效果。为提高空间型调制器的激光利用率并降低反射，研制了一种具有微米结构表面的硅基光控太赫兹调制器。在器件硅表面制备微米级的不规则结构，在空气和硅之间形成渐进的折射率，硅片对激光的反射率减少 20%以下[21]。微结构硅基调制器既能提高激光的利用率，保证在较小的激光功率下获得需要的调制深度，又能够减少反射激光对系统的影响。由于高速 DLP 适合的激光波长在 400~700 nm，因此专门测试了调制器在 638 nm 激光下的调制情况，

采用的测试系统为 Fico 太赫兹时域光谱系统, 测试结果见图 2。结果表明, 硅片和微结构硅基调制器, 随着激光功率的增强, 太赫兹波的透射率均有所下降。但微结构硅基调制器的下降幅度远大于硅片。计算器件在 0.8 W 激光功率下的太赫兹调制深度, 其中硅片的调制深度只有 29%, 而微结构硅基调制器的调制深度高达 90%, 硅基微结构使太赫兹波的调制深度提高了 3 倍。主要原因在于该微米结构保持了较高的激光吸收率(在 638 nm 时的反射率低至 16%), 而且由于表面存在微结构, 使激光和硅的接触面积增加, 从而增加了调制器的有效调控面积, 在单位面积内产生更多的光生载流子。在硅表面上, 刻蚀出的每一个微结构, 其表面积是刻蚀前的 1.73 倍。总之, 在 638 nm 泵浦激光作用下获得高达 90% 的调制深度, 微结构硅基调制器特别适合与 DLP 相结合构建太赫兹空间调制器。

1.3 太赫兹成像原理

DLP 可以精确控制每个微镜的偏转角度, 从而可以精确控制被反射投影在硅片上的激光分布图形。被 DLP 投影在硅片上的光分布图是一种类“黑白”图像, 见图 3。投影的图像由“黑”和“白”2 种基本像素组成: “白”方块代表硅片上有激光照射的区域, 表示该区域的光生载流子浓度相对较高, 对太赫兹波透射有阻碍效果; “黑”方块表示没有激光照射的区域, 几乎不对太赫兹波的透射有影响。因此每一次投影的图案(可以称作 mask), 只有在有光区域的太赫兹波被调制了。太赫兹波穿透过空间型太赫兹调制器后, 其强度就有了空间分布。在被划分的每个小区域内, 太赫兹波透射后的强度不仅与透射前的强度有关, 而且与该区域有无光照有关。因此如果假设每次只把一个小方块区域的光投影到调制器上, 且逐次更改投影区域, 通过对比有、无光照时的信号变化幅度, 得出该光照区域的太赫兹信号强度, 进而可以重构出太赫兹波的强度分布, 即可以对太赫兹波进行成像。

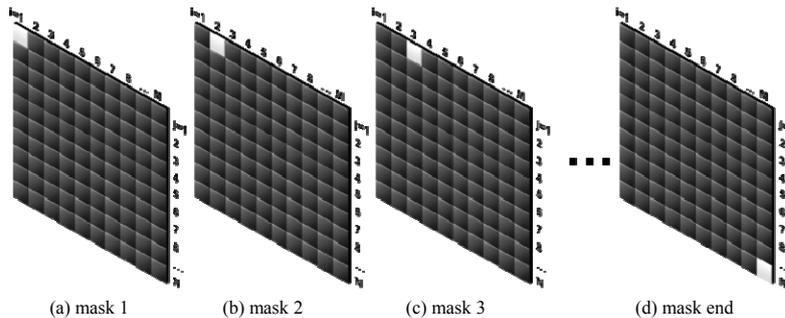


Fig.3 Schematic diagram of laser point-by-point scanning projection

图 3 激光逐点扫描投影示意图

假设太赫兹波和投影激光被划分成一个 $M \times N$ 的矩阵, 并设太赫兹原始的信号分布为 S 。空间型太赫兹调制器相对于太赫兹的透射率分布为 T , 被空间光调制器调制后的信号变为 MS 。 D_k 为在第 k 次投影时探测器接收的太赫兹信号强度, (i, j) 为每次投影时不同区域的空间坐标, 有:

$$S_{i,j} \cdot T_{i,j} = MS_{i,j}, \quad T_{i,j} \in [0,1] \quad (1)$$

$$D_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N MS_{i,j} \quad (2)$$

式中 $T_{i,j}$ 的值与硅中该区域的载流子浓度成反比, 即与该区域处是否有激光照射有关。理想状态下, 如果有光照, 则该区域的透射率 $T_{i,j} = 0$; 没有光照, $T_{i,j} = 1$ 。只有在没有光照的 (i, j) 区域, 太赫兹才能透得过去, 即 $MS_{i,j} = S_{i,j}$ 。 D_k 为所有透过去的太赫兹的强度总和, 该次投影后的信号改变量 I_k 的值, 需要对比没有光照时的太赫兹信号强度 B :

$$I_k = B - D_k \quad (3)$$

实验采用逐点扫描成像, 即在每次投影中, 硅基空间型太赫兹调制器上只在一个区域内有光照射, 且该处的透射率 $T_{i,j} = 0$, 其余为 1, 每次所计算 I_k 的值则代表该处的太赫兹信号强度。只需按顺序依次投影, 就可以完全重构出太赫兹波的信号强度分布 I 。

实际情况中, 由于激光功率密度和太赫兹波强度都呈现高斯分布, 如果按之前的方法成像, 成像结果也会呈现高斯分布, 影响最终的成像效果。为消除这一缺陷, 先在没有成像物体的情况下模拟成像测试过程, 得出背景图像 \bar{I} 。然后在有成像物体时再做一次成像实验, 得到图像 I , 将这 2 个数据代入式(4), 得到最终的重构矩阵 I' 。

$$I'_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{\bar{I}_{i,j}} \quad (4)$$

2 成像实验结果分析

通过 DLP 投影, 将空间调制阵列定义为 $M \times N = 15 \times 15 = 225$ 单元, 扫描面积为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$, 因此每个像素单元的尺寸为 1 mm^2 。为简化实验过程, 选择逐点扫描的成像方式。为提高数据采集的精确度和消除实验误差, 每一次投影后都采样 30 次, 然后将其平均值作为该次采集的最终数据。在后期处理数据时, 对最终的图像数据进行归一化处理。为检验成像系统的实际成像能力, 首先对系统的背景信号进行采集测试。即利用微结构硅基调制器, 在没有十字架成像遮挡物体的情况下, 进行一次“成像”实验, 探测背景信息。其结果见图 4(a), 图像的每个像素值表示在该处可控制太赫兹信号的变化量(可以看作在调制器上该像素点调控太赫兹波的能力), 即上文中提到的背景图像。图 4(b)是将图 4(a)的数据进行插值变换之后的 3D 图像, 从中可以看出, 系统的背景呈现高斯分布, 即调制器中间位置的太赫兹调制性能要强于四周。造成这种现象的原因之一是: 泵浦激光的功率密度呈现高斯分布, 激光功率密度是决定光控硅基太赫兹调制器调制性能的一个很重要的参数, 在边缘处的激光功率弱于中间区域, 因此该处的太赫兹调制能力较弱; 原因之二是: 太赫兹波的强度也是高斯分布, 使边缘区域对太赫兹的调制性能更加弱于中间区域。

为实际测试成像系统的成像性能, 在系统中放入有镂空十字架图案的金属片, 并对其成像测试。其结果见图 4(c)。图中的十字架轮廓不够明晰, 由于背景信号呈现高斯分布, 在十字架的垂直方向, 两头的信号强度和中间信号强度差距很明显, 但也可以看出, 边缘并不是完全没有信号, 只是较为微弱。这是由于将 2 个数据在同一个图像中展示时, 如果两部分的数据值相差太大, 信号较弱的部分会显得比实际更弱, 甚至在数量级上可以被忽略。因此为了消除背景信号给最终成像带来的影响, 采用式(4)确定的方法对图像进行滤除背景的数据处理, 其结果见图 4(d)。可明显看出, 相对图 4(c)中没有经过过滤操作的图像, 采用背景滤除方案后, 可以明显的突出微弱信号, 减弱强信号的影响。说明通过滤除预先计算的高斯背景分布数据, 可减小在同一图像中强、弱信号之间的数值差距, 一定程度上消除高斯背景对图像的影响。

同时, 为了说明不同调制深度的空间型调制器对成像结果的影响, 本文利用普通高阻硅片作调制器进行成像实验, 并经背景滤除操作, 见图 4(e)。可以看出, 图 4(e)中的图像中只有中心和垂直方向有较为突出的信号, 水平方向上没有清晰的十字架轮廓。2 个调制器进行成像实验的过程中, 各像素点处的激光功率一样, 但 2 个调制器呈现出不同的成像图像, 主要是因为每个像素点处, 2 个调制器对太赫兹波信号的调制性能不同, 不同调制器对激光的利用率存在差异, 说明调制器的调制深度是影响最终成像效果的重要参数。

在图 4(d)和图 4(e)中, 右边部分的十字架形状都没有清晰显现, 是因为在实验时太赫兹波波束中心、激光光束中心和十字架的中心没有完全重合。从图 4(a)和图 4(b)中能看出来, 图像的右侧几乎没有体现信号的变化量, 因此才造成图 4(a)和图 4(b)中 2 种调制器的成像图中十字架右侧轮廓消失。尤其是在普通硅上表现得更加突出, 这是因为普通硅对激光的利用率很低, 在激光功率低的边缘处, 几乎没有调制效果, 不能清晰测出十字架边缘处的太赫兹波信号强度。

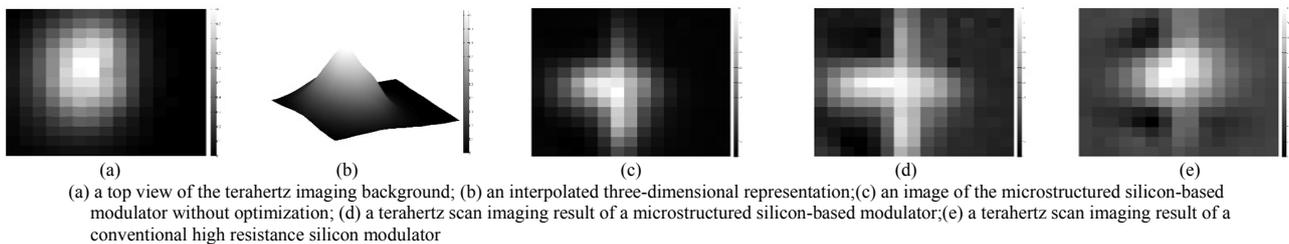


Fig.4 Terahertz imaging results

图4 太赫兹成像结果

3 成像速度分析和压缩感知技术

基于 DLP 光控空间调制器的扫描速度决定于 DLP 的扫描速度, 即 32 kHz , 这一速度远高于机械扫描速度。本次实验中, 系统成像方式是逐点扫描成像, 每次投影的光束都只控制一个像素单元。该成像方法的优点是图像的重构步骤简单, 但缺点是成像所需采集的数据量与成像矩阵的尺寸成正比。如果保证分辨力为 1 mm , 则一个 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的物体需要扫描 225 次。对于常规的人体扫描成像技术, 扫描的人体通常达到 $1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 那么需要扫描 2×10^6 次。由于 DLP 的扫描速度为 32 kHz , 则至少需要 62 s 的扫描时间。如果为了进一步提升成像的分辨力, 就不得不继续提高成像矩阵的尺寸, 这极大地增加了成像时间。为解决这一成像技术缺陷, 可以将信号压

缩感知算法用于太赫兹成像^[22-23]。该技术打破了传统的香农—奈奎斯特采样体系，在采样率远小于传统采样率的情况下能够完成对稀疏信号的采集。实际上早在 2013 年，波士顿大学的 S. David 等利用硅基光控空间型太赫兹调制器实现了太赫兹波全光调制的太赫兹压缩感知成像^[24]。将压缩感知技术应用在太赫兹单像素相机中，可以有效减少投影图片的总量。与逐点扫描成像每次只控制一个像素不同，压缩感知成像中使用的根据压缩感知理论编码的投影图片(也称作 mask 掩模板)每次投影同时控制多个像素。因此在每次采集的数据中都会包含多个像素部分的信息，经过多次(小于传统所必需的投影次数)mask 的投影，每个像素的信息都会包含在压缩采集的数据之中。不仅如此，如果采用特殊的 mask 编码方式(如随机矩阵和 Hadamard 矩阵)，还会一定程度上降低每次采集时的系统误差，提高采集信号的信噪比。再将数据导入电脑进行解码并重构出图像，解码的过程不是编码的简单逆过程，而是以信号稀疏分解中已有的重构算法为依据，在概率意义上实现信号的精确重构或一定误差范围内的近似重构。

基于硅微米结构太赫兹调制器具有动态调制深度和调制，本文仿真分析了压缩感知方法提高成像速度的可行性，其结果见图 5。图 5(a)为目标图片，其尺寸为 11×11 ，总共 121 个像素点，按照传统的扫描方法，需要 121 次采集才能重构该图片。图 5(c)~图 5(d)都是利用压缩感知重构的图片，采用稀疏贝叶斯(Sparse Bayesian Learning, SBL)信号重构算法。采集次数分别为 44 次、52 次和 54 次。从图 5(d)可以看出，在压缩度为 45% 时，可以完全重构出目标图案。通过仿真发现，采用压缩感知技术，可以有效减少采集次数，提高成像速度。

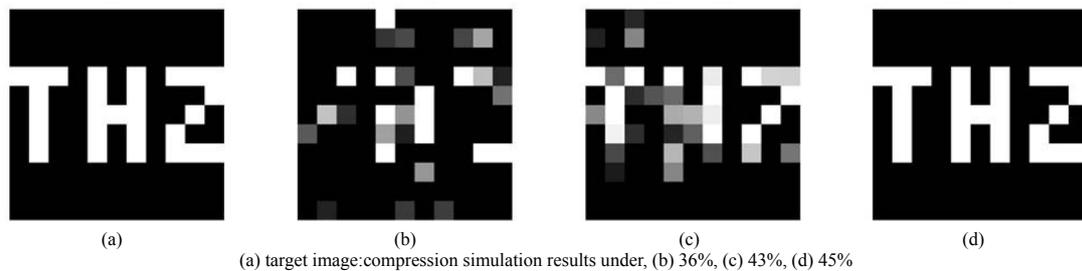


Fig.5 Diagrams of compression perception reconstruction effect under different compression levels

图 5 不同压缩程度下的压缩感知重构效果图

4 结论

本文研究了单像素太赫兹成像系统的成像原理，并进行了成像系统的搭建。完成了成像实验，并分别对实验室自制的微结构硅基调制器的光控太赫兹调制器和利用普通高阻硅作调制器的成像结果进行了对比分析。结果表明，表面微米结构很大程度上提升了硅对激光的吸收和利用率，提升了成像效果，更重要的是，在短波长激光波段内有着较好的调制效果。因此采用微结构硅基调制器，DLP 的使用性能达到最大。实验中采用的高斯背景消除方法也对提升成像效果起到了显著作用。本实验采用逐点扫描的成像方式，验证了单像素太赫兹相机的可行性，但还存在着成像时间成本高的缺陷。为此，可以采用压缩感知技术，减少投影 mask 数量和成像的时间，实现快速成像。

参考文献：

- [1] FEDERICI John F, SCHULKIN Brian, HUANG Feng, et al. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(7): 266–280.
- [2] CHAN W L, DEIBEL J, MITTLEMAN D M. Imaging with terahertz radiation[J]. Reports on Progress in Physics, 2007, 70(8): 1325–1379.
- [3] MARKELZ A G, ROITBERG A, HEILWEIL E J. Pulsed terahertz spectroscopy of DNA, bovine serum albumin and collagen between 0.1 and 2.0 THz[J]. Chemical Physics Letters, 2000, 320(31): 42–48.
- [4] ODA N. Uncooled bolometer-type Terahertz focal plane array and camera for real-time imaging[J]. Comptes Rendus Physique, 2010, 11(7–8): 496–509.
- [5] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716–1718.
- [6] CHAN W L, MATTHEW L, BARANIUK R G, et al. Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval[J]. Optics Letters, 2008, 33(9): 974–976.
- [7] KANNEGULLA A, JIANG Z, RAHMAN S M, et al. Coded-aperture imaging using photo-induced reconfigurable aperture arrays for mapping terahertz beams[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014, 4(3): 321–327.

- [8] CHAN W L,CHARAN K,DHARMPAL T,et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2008,93(12):121105-1–121105-3.
- [9] WATTS C M,SHREKENHAMER D,MONTOYA J,et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014,8(8):605–609.
- [10] VOGEL T,DODEL G,HOLZHAUER E. High-speed switching of far-infrared radiation by photoionization in a semiconductor[J]. *Applied Optics*, 1992,31(3):329–337.
- [11] OKADA T,TANAKA K. Photo-designed terahertz devices[J]. *Scientific Reports*, 2011,121(1):1–5.
- [12] CHENG L J,LIU L. Optical modulation of continuous terahertz waves towards cost-effective reconfigurable quasi-optical terahertz components[J]. *Optics Express*, 2013,21(23):28657–28667.
- [13] XIE Z W,WANG X K,YE J S. Spatial terahertz modulator[J]. *Scientific Reports*, 2013,3347(3):1–4.
- [14] WEN T L,ZHANG D N,WEN Q Y. Enhanced optical modulation depth of terahertz waves by self-assembled monolayer of plasmonic gold nanoparticles[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016,4(12):1974–1980.
- [15] WEIS P,GARCIA-POMAR J L,HOH M. Spectrally wide-band terahertz wave modulator based on optically tuned graphene[J]. *ACS Nano*, 2012,6(10):9118–9124.
- [16] WEN Q Y,TIAN W,MAO Q. Graphene based all-optical spatial terahertz modulator[J]. *Scientific Reports*, 2014(4):7409-1–7409-5.
- [17] ZHANG B,HE T T, SHEN J L. Conjugated polymer-based broad band terahertz wave modulator[J]. *Optics Letters*, 2014,39(21):6110–6113.
- [18] SHI Z W,CAO X X,WEN Q Y. Terahertz modulators based on silicon nanotip array[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(2):1700620-1–1700620-8.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. DLP product description[EB/OL]. (2019)[2019–01–10]. <http://www.ti.com.cn/product/en/DLP7000>.
- [20] STANTCHEV R I,PHILLIPS D B,HOBSON P,et al. Compressed sensing with near-field THz radiation[J]. *Optica*, 2017, 4(8):989–992.
- [21] 金浓,朱韵樵,申朝阳,等. 硅基金字塔结构光控太赫兹调制器[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019,17(2):195–199. (JIN Nong,ZHU Yunqiao,SHEN Zhaoyang,et al. Silicon-based pyramid structure light-controlled terahertz modulator[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019,17(2):195–199.)
- [22] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006,52(4):1289–1306.
- [23] CANDÈS E J,TAO T. Decoding by linear programming[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005,51(12):4203–4215.
- [24] SHREKENHAMER D,WATTS C M,PADILLA W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2013,21(10):12507–12518.