

基于发光二极管的强场太赫兹相机

李尚卿^{1,2}, 欧阳琛^{1,2}, 马景龙¹, 张保龙^{1,2}, 吴晓君^{3**}, 徐继红⁴, 李玉同^{1,2,5*}¹中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190;²中国科学院大学物理学院, 北京 100049;³北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191;⁴德州仪器(中国)有限公司北京办事处, 北京 100190;⁵松山湖材料实验室, 广东 东莞 523808

摘要 报道了一种基于发光二极管(LED)的强脉冲场太赫兹相机,其工作原理是皮秒脉宽的强场太赫兹辐照到LED之后,当太赫兹电场强度大于 50 kV/cm 时,由于碰撞电离效应,LED 两端会产生纳秒脉宽的光伏信号。利用此效应成功制备了扫描式和阵列式的 LED 太赫兹相机,并捕捉到了由铌酸锂倾斜波前技术产生的强场太赫兹焦斑。该相机有成本低、信号强、响应快、成像面积大等特点,并会为发展基于强场非线性效应的太赫兹成像技术提供新思路。

关键词 成像系统; 发光二极管; 强脉冲场太赫兹; 倾斜波前; 太赫兹成像

中图分类号 O437

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2411002

A Light-Emitting Diode-Based Strong-Field Terahertz Camera

Li Shangqing^{1,2}, Ouyang Chen^{1,2}, Ma Jinglong¹, Zhang Baolong^{1,2}, Wu Xiaojun^{3**},
Xu Jihong⁴, Li Yutong^{1,2,5*}¹Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;²School of Physical Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;⁴Beijing Office, Texas Instruments Inc., Beijing 100190, China;⁵Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan, Guangdong 523808, China

Abstract A strong-pulsed-field terahertz camera based on light emitting diode (LED) is reported in this paper. It is based on the operational principle that LED can generate nanosecond pulse-duration photovoltaic signal with a reproducible response to picosecond pulse-duration intense terahertz irradiation due to impact ionization when terahertz electric field strength is larger than 50 kV/cm. By employing this effect, we fabricate scanning and array LED-terahertz cameras. These devices have successfully captured images of focused terahertz beam profile generated in lithium niobate via the tilted pulse front technique. The proposed camera has characteristics of low cost, strong photovoltaic signal, rapid response, and large imaging area. Meanwhile, it would give a new idea in developing terahertz imaging technology based on strong-field nonlinear effect.

Key words imaging systems; light emitting diode; strong-pulsed-field terahertz; tilted pulse front; terahertz imaging

OCIS codes 110.2970; 110.6795; 040.2235

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-06-02; 录用日期: 2021-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(11827807, 61905007)、中国科学院战略重点研究计划(XDA25010000, XDB16010200)

通信作者: *ytli@iphy. ac. cn; **xiaojunwu@buaa. edu. cn

1 引言

强场太赫兹源以其高峰值场强、低光子能量、独特的光学频段(0.1~10 THz)等优势受到太赫兹科研领域的研究人员的广泛关注。它将太赫兹在凝聚态物理、材料科学、生命科学等方面的应用推向了强场非线性效应的新领域^[1-6]。现有强场太赫兹源包括基于飞秒激光与固体^[7-9]、液体^[10]、气体^[11-13]相互作用的等离子体太赫兹源、有机晶体光整流太赫兹源^[14]和铌酸锂倾斜波前太赫兹源^[15-17]等。为了优化这些源或者深入了解其中的物理过程,人们需要对强场太赫兹源的输出场或者样品处的辐照场进行成像。Lombosi 等^[18]运用成像放大法对倾斜波前源出射和传播的太赫兹进行成像,观察并分析了太赫兹光斑移动与泵浦光通量之间的关系。刘浩^[19]用热释电太赫兹相机实现了对飞秒激光等离子体太赫兹源的空间角谱单发成像,发现并解释了纳米柱靶后太赫兹辐射增强的现象。可以预见,随着强场太赫兹成像技术的发展,人们对相关源及应用的认识会更加深入。

强场太赫兹成像需要依托强场太赫兹源,属于主动式成像。而强场太赫兹源的重复频率一般比较低(<100 Hz),一些基于探针扫描的太赫兹成像方法,如时域光谱成像^[20-21]、压缩感知成像^[22-23]、近场成像^[24-25]、飞行时间成像^[26]等,往往会面临成像时间过长、太赫兹脉冲序列之间有抖动等问题。最有希望解决这些问题的方法是焦平面阵列(FPA)成像,它具有成像速度快、可实现实时和单发成像等优势,这是目前发展强场太赫兹成像技术的重点。现在报道的可以直接对强场太赫兹成像的器件,大多是由弱场连续波的太赫兹 FPA 成像技术发展而来,如 Ophir-Spiricon 公司 Pyrocam 系列型号的热释电相机^[27]、东京大学和日本电气股份有限公司合作的具有氮化物共振微腔结构的微测热辐射计(Microbolometer)相机^[28]等。这些相机具有兼容性,可以对连续和脉冲太赫兹波成像,但通常会有价格过高、调试维修困难、易受其他频段的光干扰等问题。为了解决这些问题,需要充分发挥强场太赫兹源高峰值功率、高峰值场强的特性,利用一些对其有光电响应的结构或材料,探究新的探测思路。

根据 Ouyang 等^[29]的报道,当数皮秒脉宽的强场太赫兹辐照到特定型号的发光二极管(LED)上时,由于场致碰撞电离效应,LED 两端会产生约数纳秒脉宽的光伏信号。该光伏信号是非寻常的负信

号(正极的电压比负极的低),与典型的光电二极管的光伏信号极性不同。因此,LED 可以较好地屏蔽其他波段的光信号,其成本也较低,是一种理想的强场太赫兹探测器。本文进一步地将 LED 发展成为了二维扫描和阵列相机,并捕捉到了倾斜波前强场太赫兹源的焦斑。该强场太赫兹相机具有成本低、信号强、响应快、成像面积大等特点,并会为发展基于强场太赫兹非线性效应的成像技术提供新思路。

2 设计方案及测试结果

2.1 LED 对强场太赫兹探测

LED 探测强场太赫兹实验过程如图 1(a)所示。强场太赫兹由铌酸锂的倾斜波前源^[30]产生,频谱范围为 0~1.0 THz,中心频率为 0.4 THz,重复频率为 10 Hz。为了能测量 LED 对强场太赫兹的光伏响应信号,制备了一个专用的印刷电路板(PCB)。它将 LED 两端和 SMA 接口连接起来,其中 LED 正极接 SMA 中心端子,负极和 SMA 外壳均接地。SMA 接口通过同轴电缆线与示波器(DPO 4104, Tektronix, 美国)连接。当 PCB 上的 LED 置于焦距为 2 inch (1 inch = 2.54 cm)的离轴抛物面镜(OAP)的焦点处时,由于强场太赫兹诱导的碰撞电离效应,示波器上会出现 LED 的光伏响应信号。此时聚焦太赫兹的能量为 80 μ J,直径($1/e^2$)约为 2.5 mm,通量约为 16.3 μ J/mm²,峰值场强约为 1.5 MV/cm。图 1(b)展示了这种强场太赫兹条件下两种 LED 的光伏响应。它们均发蓝色光,型号分别为 16-213/BHC-AN1P2/3T(贴片,亿光电子有限公司,苏州)和 4204-10SUBC/C470/S400-X9-L(插片,亿光电子有限公司,苏州)。两种 LED 光电信号的峰值电压均在百毫伏量级,脉冲宽度均在纳秒量级。插片的信号峰值比贴片的大 7 倍左右,这可能与插片 LED 晶片的发光体积较大有关。插片和贴片 LED 响应率分别约为 0.9 kV/W 和 0.1 kV/W,这与文献^[29]中的数量级较为符合。图 1(c)展示了强场太赫兹在 LED 中激发反常光伏响应的机制。本文选用的蓝色 LED 灯芯由氮化镓(GaN)P-N 结和多层量子阱(MQW)构成。P-N 结的掺杂浓度为 $10^{16} \sim 10^{17}$ cm⁻³。此外,金属电极和 P 掺杂 GaN 还会形成金属-半导体肖特基结。当强场太赫兹(电场 >50 kV/cm)辐照到 LED 上时,太赫兹电场会加速导带(价带)中的电子(空穴)。运动电子(能量大于带隙,约 3.4 eV)与其他价带电子碰撞使更多的电子电离。这样 P-N 结中便产生了

大量非平衡载流子(浓度约为 10^{17} cm^{-3})。载流子在肖特基和 P-N 结内建电场[电场方向如图 1(c) 中的空心箭头所示]的作用下做漂移运动[运动方向如图 1(c) 中的实心箭头所示]。Ouyang 等^[29]指出此时载流子以肖特基结电场漂移运动为主导,因而 LED 正极积累了大量电子。这是测量到非寻常负光伏信号(LED 正极电压比负极低)的原因,光伏信号的极性与普通光电二极管相反。随着碰

撞电离过程的结束及载流子的累积,载流子漂移运动减弱,扩散复合运动增强,负光伏响应信号经过小于 15 ns 的弛豫过程后逐渐消失。以上是 LED 探测强场太赫兹的物理机制。由图 1(d) 可知,当太赫兹的通量大于 $5 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 时,LED 光伏信号峰峰值(V_{pp})与其具有近似线性的依赖关系,这表明 LED 可以用作扫描/阵列太赫兹相机的像素。

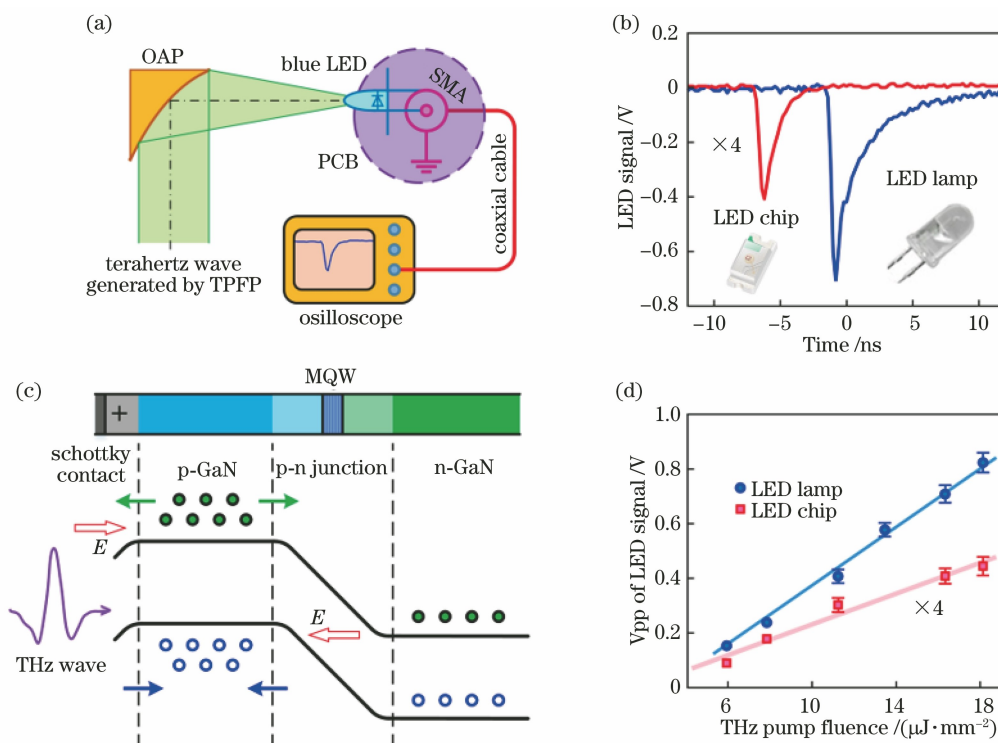


图 1 LED 对强场太赫兹的光电响应。(a)实验布局;(b)两种典型 LED 中的太赫兹激发的光伏信号;
(c)反常光伏响应机制示意图;(d)LED 的 V_{pp} 和太赫兹通量的线性关系

Fig. 1 Photovoltaic response of LED to intense terahertz radiation. (a) Experimental setup; (b) terahertz-field-induced photovoltaic signal in two typical LEDs; (c) schematic of abnormal photovoltaic response mechanism; (d) linear relationship between V_{pp} of LED signal and terahertz pump fluence

2.2 扫描式 LED 太赫兹相机

图 2(a)展示了单像素扫描式 LED 扫描太赫兹焦斑的实验装置。可以看到扫描相机实验与 LED 探测太赫兹的实验略有不同。LED 和 PCB 被固定在由两个步进电机构成的二维平移台上,这样它们可以在太赫兹焦平面内运动。两个步进电机由一台平移台控制器(SHOT-302GS, Sigmakoki, 日本)发出的两路脉冲宽度调制(PWM)信号控制,可以精确定位 LED 的二维坐标。该平移台控制器可以接收个人计算机(PC)的字符串指令,两者通过 RS232-USB 串口连接。一个由 LabView 编写的虚拟仪器自动发送这些指令。此外,该 LabView 虚拟仪器还负责读取和处理示波器中光伏信号,示波器和 PC

由 USB 串口连接。它的程序流程如图 2(b)所示,PC 将指令发送到平移台控制器使 LED 像素移动到初始位置。这时示波器上会出现该处强场太赫兹激发的光伏响应信号。然后 PC 会读取该信号的 V_{pp} 并记录下来。完成之后 LED 会移动到下一处,PC 再记录该处信号的 V_{pp} 。依此循环,直到指定区域被扫描完毕。

为提高扫描相机的信噪比,采用 2.1 小节中的 LED 插片作为像素。图 3(a)为扫描相机采集到的 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ 的太赫兹焦斑。LED 扫描步长为 0.25 mm ,扫描窗口为 5 mm ,扫描路径为“S”型,如图 3(a)中箭头所示。数据采样频率为每次 0.2 s ,每个位置采集 5 次数据并取平均,图像采集时间约为

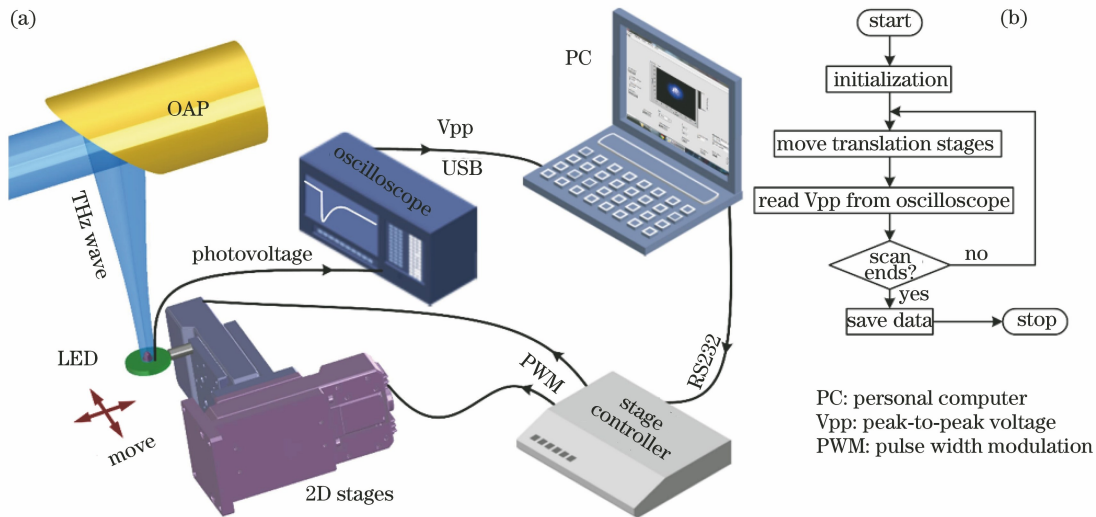


图 2 单像素自动扫描 LED 太赫兹相机。(a) 结构框架; (b) LabView 程序流程

Fig. 2 Automatic scanning LED-terahertz camera with single pixel. (a) Framework; (b) flow chart of LabView program
7 min. 扫描成像与商用相机(Pyrocam IV, Ophir, 以色列)的参考成像[图 3(b)]匹配得很好。

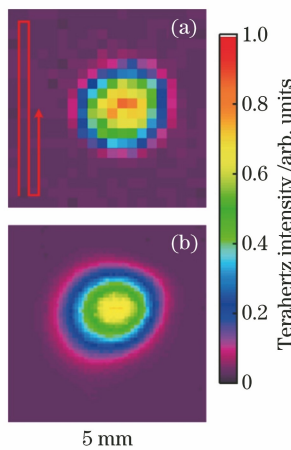


图 3 扫描 LED-THz 相机测试结果。(a) 扫描 LED-THz 焦斑, 箭头表示扫描路径; (b) 商业相机测量的聚焦太赫兹光斑图像

Fig. 3 Test results of scanning LED-THz camera. (a) Scanning LED-THz focal spot with arrow indicating scanning path; (b) image of the focused terahertz spot measured by the commercial camera

2.3 阵列式 LED 太赫兹相机

针对扫描相机成像速度慢、太赫兹脉冲序列之间有抖动等问题, Ouyang 等^[29]用 LED 插片成功制备一维线阵式的 LED 太赫兹相机。本文用 2.1 小节中的 LED 贴片替代了 LED 插片, 改善了空间分辨率(像素间距缩小到了 1.78 mm), 将一维 1×8 阵列拓展到二维 8×8 阵列。这样就需要同时测量 64 道的超快纳秒电脉冲信号。采用电流积分法测

量这些电脉冲, 如图 4(a) 所示。该方法需要待测电流流入积分电路, 因此将 LED 的正极接地, 这与经典光伏二极管的接法不同。可以推导出输出端电压 (u) 与输入电流 (i) 存在以下关系,

$$u = \frac{q}{C} = \frac{\int i dt}{C}, \quad (1)$$

式中: q 为累积电荷; C 为积分电容; t 为积分时间。这种方法的好处是不用测量电脉冲的波形, 测量到的电压与电脉冲的累积电荷成正比。美国德州仪器生产的模拟数字转换芯片 DDC264 集成了 64 个电流积分电路, 可以并行处理 8×8 阵列的 LED 的光电信号, 极大地提高了阵列相机的集成度。

阵列式 LED 太赫兹相机的结构如图 4(b) 所示, 它的工作过程如下。通过场致碰撞电离效应, 强场太赫兹在 LED 阵列中激发多路纳秒脉宽的光电响应信号。多路电流积分芯片 DDC264 运用电流积分法并行地将这些信号转化为多路电压信号, 并被模拟数字转换器(ADC)转换为数字信号。该数字信号又被一片可编程逻辑器件(CPLD)芯片 EPM570 (Altera Company) 处理并通过 USB 接口发送到 PC。一个基于 LabView 程序开发的虚拟仪器可以将这些数据可视化。该 LabView 程序前面板如图 4(c) 所示, 用户可以通过输入控制字来对相机的积分时间、积分电容、数据精度等进行配置, 也可以通过面板按钮进行选择串口、采集和扣除背景、保存数据等操作。图 4(d) 展示了 8×8 LED 阵列太赫兹相机实物照片, 其中探测电路由自主设计, 信号处理电路为一个商用 CPLD 开发板。阵列相机参数如表 1 所示。

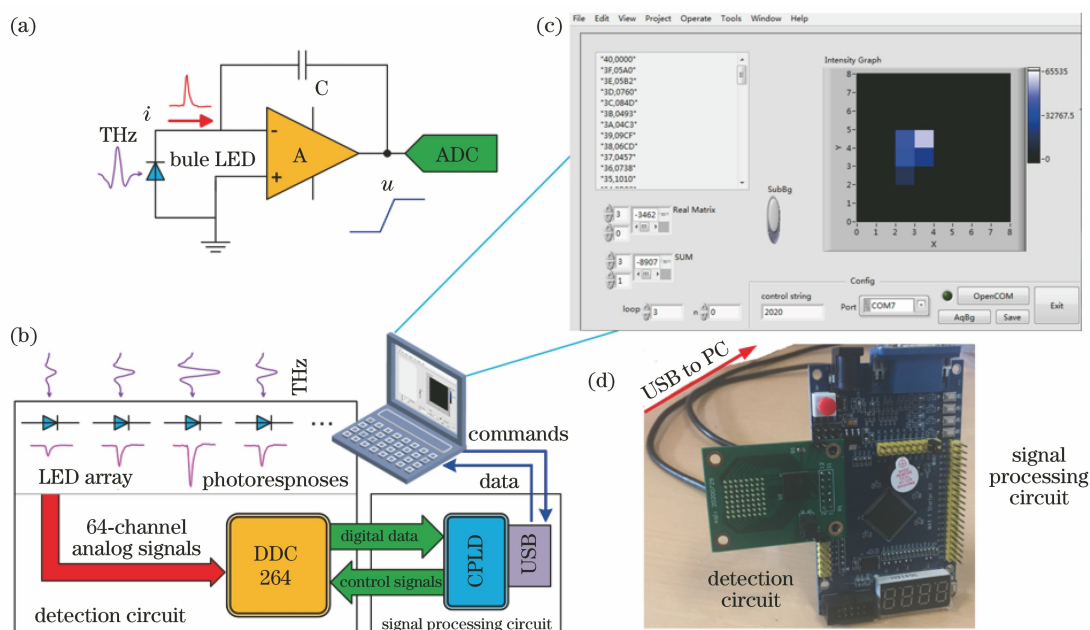


图 4 阵列式 LED 太赫兹相机。(a) 电流积分电路; (b) 结构框架; (c) LabView 前面板; (d) 硬件模块照片
 Fig. 4 Terahertz camera based on LED array. (a) Current integration circuit; (b) framework; (c) front panel of LabView program; (d) photograph of hardware module

表 1 部分阵列式 LED 太赫兹相机的参数

Table 1 Partial parameters of the array LED-THz camera

Parameter	Value	Description
THz e-field strength	$> 50 \text{ kV/cm}$	Threshold value of nonlinear impact ionization effect
Responsivity	0.1 kV/W	
Spatial resolution	1.78 mm	Defined by the distance between two adjacent pixels
Number of pixels	64	8×8 array
Integral time	$0.1\text{--}1 \text{ s}$	Set by LabView program; restricted by repetition rate of THz pulses (10 Hz in this work)
Data resolution	$20 \text{ bit} / 16 \text{ bit}$	Set by LabView program

由图 1 (b) 可以看出, 同等太赫兹场强条件下 LED 贴片的响应信号较 LED 插片弱。为了能获得更多的光感应像素数量, 将 OAP 焦距换为 4 inch 。与此同时将单发太赫兹能量提升到了 1 mJ , 通量提高到了约 0.2 mJ/mm^2 , 峰值场强提高到了约 5.3 MV/cm 。经过这些努力, 聚焦太赫兹光斑扩大到了约 4 mm [如图 5(a) 虚线椭圆所示。由商用相机灵敏度^[27]可知, 椭圆内太赫兹光通量大于约 $1 \mu\text{J/mm}^2$]。在积分时间为 0.2 s , 积分电容为 3 pF 的条件下, 阵列相机上采集到了 $4\sim 5$ pixel 的太赫兹光伏信号[图 5(b)]。虽然该二维 LED 太赫兹相机空间分辨率和像素数量仍有不足, 但是它实现了实时成像, 证明了以后发展更高像素密度和数量的 LED 太赫兹相机的可行性。

此外, 本相机的数据还可以用来估算 LED 的积累电荷(q)和载流子浓度(n),

$$q = Cu = C \frac{XV_{\text{REF}}}{Y \cdot (2^N - 1)}, \quad (2)$$

$$n = q/eL^3, \quad (3)$$

式中: u 为测量的输出端电压; X 为输出数据值; Y 为累计发次; N 为数据位数; V_{REF} 为参考电压; L 为载流子扩散长度; e 为元电荷常数。代入 $C = 3 \text{ pF}$ 、 $X_{\text{max}} \approx 40000$ 、 $Y = 2$ 、 $N = 16$ 、 $V_{\text{REF}} = 3.3 \text{ V}$ 、 $L = 10 \mu\text{m}$ 、 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 可以得出单发太赫兹(峰值场强约 5.3 MV/cm) 在 LED 贴片中激发了约 3 pC 的转移电荷, 载流子浓度约为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。这与文献[29]中的估计的数量级比较符合。

3 结 论

LED 作为强场太赫兹探测器, 具有成本低、信号强、响应快、不易受其他频段光干扰等特点。本文将发展成为了一种二维扫描式和阵列式 LED 太

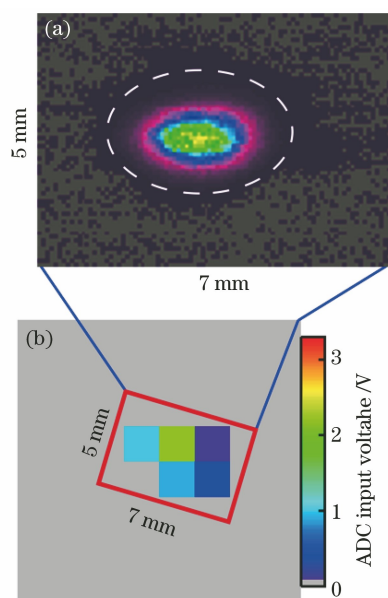


图 5 阵列式 LED 太赫兹相机测试结果。(a)商用相机捕捉的太赫兹焦斑;(b)阵列相机捕捉的太赫兹焦斑
Fig. 5 Test results of array LED-terahertz camera. (a) Terahertz focal spot captured on a commercial camera; (b) terahertz focal spot captured by array camera

赫兹相机原型,并对倾斜波前源的太赫兹焦斑进行了成像。其中,扫描相机采用 LabView 虚拟机实现了自动扫描成像,空间分辨率较高,但成像时间较长。 8×8 阵列相机运用电流积分法实现了实时成像,但像素数量不足。在未来的研究中,有望将与 mini-LED 或 micro-LED 结合,提高成像的空间分辨率。本文所开发的 LED 太赫兹相机和强场太赫兹的特点和需求相结合,特别适用于对强场太赫兹源的成像。

参 考 文 献

- [1] Matsunaga R, Tsuji N, Fujita H, et al. Light-induced collective pseudospin precession resonating with Higgs mode in a superconductor [J]. *Science*, 2014, 345(6201): 1145-1149.
- [2] Kampfrath T, Tanaka K, Nelson K A. Resonant and nonresonant control over matter and light by intense terahertz transients [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 680-690.
- [3] Liu M, Hwang H Y, Tao H, et al. Terahertz-field-induced insulator-to-metal transition in vanadium dioxide metamaterial [J]. *Nature*, 2012, 487(7407): 345-348.
- [4] Lange C, Maag T, Hohenleutner M, et al. Extremely nonperturbative nonlinearities in GaAs driven by atomically strong terahertz fields in gold metamaterials [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(22): 227401.
- [5] Chin W, Piuze F, Dimicoli I, et al. Probing the competition between secondary structures and local preferences in gas phase isolated peptide backbones [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2006, 8(9): 1033-1048.
- [6] Cui Y, Li N, Wang X K, et al. Measurement of agricultural chemicals with terahertz spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(s1): 270-273. 崔焯, 李娜, 王新柯, 等. 基于太赫兹光谱技术的液体农药检测 [J]. *光学学报*, 2009, 29(s1): 270-273.
- [7] Liao G Q, Li Y T, Zhang Y H, et al. Demonstration of coherent terahertz transition radiation from relativistic laser-solid interactions [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(20): 205003.
- [8] Liu H, Liao G Q, Zhang Y H, et al. Study of backward terahertz radiation from intense picosecond laser-solid interactions using a multichannel calorimeter system [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e6.
- [9] Liao G Q, Liu H, Scott G G, et al. Towards terawatt-scale spectrally tunable terahertz pulses via relativistic laser-foil interactions [J]. *Physical Review X*, 2020, 10(3): 031062.
- [10] Dey I, Jana K, Fedorov V Y, et al. Highly efficient broadband terahertz generation from ultrashort laser filamentation in liquids [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1184.
- [11] Kim K Y, Taylor A J, Glowacki J H, et al. Coherent control of terahertz supercontinuum generation in ultrafast laser-gas interactions [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(10): 605-609.
- [12] Kuk D, Yoo Y J, Rosenthal E W, et al. Generation of scalable terahertz radiation from cylindrically focused two-color laser pulses in air [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(12): 121106.
- [13] Jiang G T, Zhang L L, Wu T, et al. THz wave generation from air plasma induced by off-axis vortex beam [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614026. 蒋广通, 张亮亮, 吴同, 等. 离轴涡旋光束诱导空气等离子体产生太赫兹波 [J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614026.
- [14] Shalaby M, Hauri C P. Demonstration of a low-frequency three-dimensional terahertz bullet with extreme brightness [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5976.
- [15] Wu X J, Ma J L, Zhang B L, et al. Highly efficient generation of 0.2 mJ terahertz pulses in lithium

- niobate at room temperature with sub-50 fs chirped Ti: Sapphire laser pulses[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7107-7116.
- [16] Zhang B L, Li S Q, Chai S S, et al. Nonlinear distortion and spatial dispersion of intense terahertz generation in lithium niobate via the tilted pulse front technique[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(10): 959-964.
- [17] Wu X J, Guo F W, Ma J L, et al. High-energy strong-field terahertz pulses based on tilted-pulse-front technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(6): 0614008.
吴晓君, 郭丰玮, 马景龙, 等. 基于倾斜波前技术的高能强场太赫兹辐射脉冲源[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614008.
- [18] Lombosi C, Polónyi G, Mechler M, et al. Nonlinear distortion of intense THz beams[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(8): 083041.
- [19] Liu H. Studies of fast electrons and terahertz radiation in intense laser-solid interactions [D]. Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
刘浩. 强激光与固体靶相互作用中超热电子与太赫兹辐射的研究[D]. 北京: 中国科学院物理研究所, 2019.
- [20] Harris Z B, Virk A, Khani M E, et al. Terahertz time-domain spectral imaging using telecentric beam steering and an f - θ scanning lens: distortion compensation and determination of resolution limits [J]. *Optics Express*, 2020, 28(18): 26612-26622.
- [21] Fischer B M, Hoffmann M, Helm H, et al. Terahertz time-domain spectroscopy and imaging of artificial RNA[J]. *Optics Express*, 2005, 13(14): 5205-5215.
- [22] Zhao Y Q, Zhang L L, Zhu D C, et al. Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(s1): s111003.
赵亚芹, 张亮亮, 祝德充, 等. 基于压缩传感的单点太赫兹成像[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s111003.
- [23] Wang Y Y, Ren Y C, Chen L Y, et al. Terahertz wave wide-beam imaging technology based on block compressive sensing theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0407001.
王与焯, 任宇琛, 陈霖宇, 等. 基于分块压缩感知理论的太赫兹波宽光束成像技术[J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0407001.
- [24] Hunsche S, Koch M, Brener I, et al. THz near-field imaging[J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1/2/3/4/5/6): 22-26.
- [25] Mitrofanov O, Lee M, Hsu J W P, et al. Collection-mode near-field imaging with 0.5-THz pulses [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(4): 600-607.
- [26] Li C Y, Zhang H F, Qu L, et al. Application of terahertz time-of-flight imaging to lacquer box [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0604001.
李晨毓, 张宏飞, 曲亮, 等. 太赫兹飞行时间成像在漆盒上的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0604001.
- [27] Pyroelectric array cameras [EB/OL]. (2020-01-01) [2020-05-31]. https://www.ophiropt.com/laser-measurement/sites/default/files/Pyrocam_1.pdf.
- [28] Nemoto N, Kanda N, Imai R, et al. High-sensitivity and broadband, real-time terahertz camera incorporating a micro-bolometer array with resonant cavity structure[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(2): 175-182.
- [29] Ouyang C, Li S Q, Ma J L, et al. Terahertz strong-field physics in light-emitting diodes for terahertz detection and imaging [J]. *Communications Physics*, 2021, 4: 5.
- [30] Zhang B L, Ma Z Z, Ma J L, et al. 1.4-mJ high energy terahertz radiation from lithium niobates [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2021, 15(3): 2000295.