

340 GHz 稀疏 MIMO 阵列实时 3-D 成像系统

崔振茂^{1,4}, 高敬坤², 陆彬^{1,4}, 陈鹏^{1,4}, 何月^{1,4}, 秦玉亮², 成彬彬^{1,4*},
刘乔³, 何晓阳¹, 邓彬², 邓贤进^{1,4}

- (1. 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;
2. 国防科技大学空间电子信息技术研究所, 湖南 长沙 410073;
3. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;
4. 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200)

摘要:介绍了一种基于稀疏 MIMO (Multiple Input and Multiple Output) 阵列的 340 GHz 三维成像系统. 系统采用水平放置的 4 发 16 收稀疏 MIMO 阵列配合垂直维的聚束扫描实现方位维的高分辨率成像, 每个发射通道的波形为 16GHz 带宽的线性调频连续波信号, 通过脉冲压缩实现距离维的高分辨率. 测试结果表明, 在 4 m 的探测距离(光程)上, 成像系统方位向、垂直向和距离向的分辨率分别达到 14 mm、10 mm 和 12 mm, 通过对人体隐藏枪支的三维成像实验验证了系统对人体携带危险品的探测能力.

关键词:太赫兹雷达; 稀疏 MIMO; 太赫兹阵列; 三维成像; 站开式; 人体安检
中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

Real time 3D imaging system based on sparse MIMO array at 340 GHz

CUI Zhen-Mao^{1,4}, GAO Jing-Kun², LU Bin^{1,4}, CHEN Peng^{1,4}, HE Yue^{1,4}, QIN Yu-Liang²,
CHENG Bin-Bin^{1,4*}, LIU Qiao³, HE Xiao-Yang¹, DENG Bin², DENG Xian-Jin^{1,4}

- (1. Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
2. Institute of Space Electronic Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Institute of fluid physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
4. Microsystem and Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610200, China)

Abstract: A 3-D imaging system based on sparse MIMO (Multiple Input and Multiple Output) array at 340 GHz is presented. The imager incorporates a linear array containing 4 transmitters and 16 receivers (4Tx-16Rx) as electronic beam former in horizontal dimension and an elliptic cylinder as focusing reflector in elevation to get high cross-range resolution. Each emitter transmits frequency-modulated continuous-wave (FMCW) waveform with 16 GHz bandwidth and high range resolution is achieved by using pulse compression technique. Experimental results indicate that the 3-D imaging resolution is 14 mm, 10mm and 12mm in horizontal direction, vertical direction and range dimension at 4-m distance, respectively. The personal screen experiments also imply that concealed threats such as guns can be detected by this 3-D imager.

Key words: terahertz radar, sparse MIMO, terahertz array, 3-D imaging, stand-off, personal security detection

PACS: 07.57.-c, 42.30.-d, 42.40.-i

引言

太赫兹波的独特性质使其可用于解决通关人员快速检测,人体携带危险品远程预警等安检和反恐难题,具有广阔的应用前景^[1-2].首先,太赫兹波可兼顾对非极性物质良好的穿透性和较高的成像分辨率,可实现对人体和包裹隐藏的金属/非金属物品的检测;其次,太赫兹光子能量低至 1 meV 量级,远小于人体皮肤的电离损伤阈值,具有较高的安全性;最后,非接触式快速检测可大幅提升通过率,提升用户体验并避免隐私问题.

主动式太赫兹成像安检仪由于其成像效果好、漏检和虚警概率低^[3]而受到国内外广泛关注.美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)自 2006 年起研制了多套二维机械扫描实验样机^[4-6],虽然最新的报道在 340 GHz 频段采用了 2 发 2 收阵列^[7-8],但受扫描速度的限制,其成像速度和成像区域的矛盾仍然难以解决;欧洲第七框架计划支持的 TeraScreen 项目拟研制多频段、多模式复合探测安检仪^[9],其中包含 360 GHz 频段 16T/R 成像阵列,但并未见其后续报道;国内在太赫兹主动成像安检研究方面起步较晚,仅见到中科院电子所 0.2 THz 单发单收成像系统的报道,该系统采用机械扫描 + SAR 的方式实现成像^[10-11],系统仍需完成二维扫描,成像速度受限.本文所述的 340 GHz 频段阵列式成像系统,采用收发线阵配合一维机械扫描,可大大提升成像速度,同时采用 4T/16R 稀疏 MIMO 工作方式,在保证成像分辨率的同时大大降低了阵列数量,实验测试结果表明该成像系统可较好实现对人体隐藏枪支的成像探测.

1 340 GHz MIMO 雷达系统

340 GHz MIMO 雷达系统架构如图 1 所示,主要由收发阵列、椭圆柱面反射镜、平面摆镜等部分组成.其工作原理是采用稀疏 MIMO 阵列与机械式准光扫描相结合的方式实现人体的三维高分辨率成像,相比于传统的二维合成孔径式近场成像,其高度维聚焦由准光椭圆柱面反射镜完成,因此其成像速度可以得到大幅提升.收发阵列采用 4Tx/16Rx 的稀疏 MIMO 阵,虚拟阵元技术在不影响成像质量的情况下大大节省了系统所需的阵列数量,降低了系统的复杂度.

系统工作过程如下:水平放置的 MIMO 天线阵列发射宽带线性调频连续波信号,球面波束经椭圆

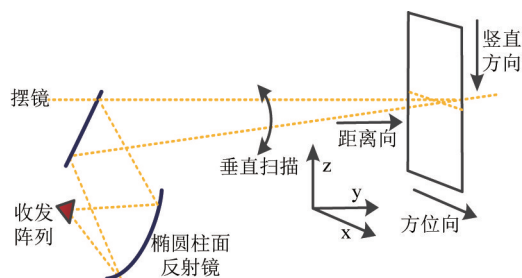


图 1 340 GHz MIMO 雷达成像系统结构
Fig. 1 Architecture of 340 GHz standoff 3D imaging system

柱面反射镜聚焦以后投射到摆镜,摆镜旋转,聚焦后的带状波束沿垂直方向对目标进行扫描,天线阵列接收目标回波并完成目标三维图像重建.

系统采用 4 发 16 收的稀疏 MIMO 阵列利用合成孔径原理提高系统方位向分辨率,其阵列构型如图 2(a)所示,根据稀疏 MIMO 阵列成像理论,可将其等效为如图 2(b)所示排列的 64 个虚拟收发阵元,其合成孔径长度 $L_{sa} = 0.28$ m,对应 4 米处方位向成像的理论分辨率约为 $\rho_a = \lambda R / 2L_{sa} = 0.014$ m,方位维成像宽度 $R_a = 0.6$ m.

由于系统对辐射单元的相对位置精度要求很高,若每个收发通道单独设计,一方面受间距限制设计加工难度都很大,另一方面,相对位置精度也难以保证,辐射单元(阵列天线)是整体设计加工的,天线采用削斜面一角锥喇叭天线,波束宽度为 $25^\circ \times 25^\circ$,在频段范围内,各端口的空间隔离度 ≥ 30 dB.阵列天线传输段剖面视图如图 2(c)所示.

阵列的 4 个发射机分时发射带宽 $B_r = 16$ GHz,脉宽 $T_p = 75$ μ s 的线性调频连续波信号,该信号是由 K 波段 1 GHz 带宽的线性调频信号通过 16 倍频将信号载频提升至 340 GHz,并将带宽扩展至 16 GHz;16 个接收机同时接收信号并完成 de-chirp 去斜处理,去斜后的中频信号进行 25 MHz 采样,并在 FPGA 完成滤波、抽取,送上位机完成处理,收发机的基本原理同^[12].通过脉冲压缩实现距离维的高分辨,其理论分辨率约为 $\rho_r = c / 2B_r = 0.009$ m.距离维窗口宽度选为 $R_r = 0.8$ m.

发射光束被椭圆柱面聚焦并经摆镜反射,在目标位置形成高斯分布的带状波束,该带状波束随着摆镜的运动在成像面中心线处实现半高宽为 12 mm 的高斯波束能量分布,对应高度维的理论分辨率约为 $\rho_h = 0.012$ m.高度维波束行程约为 $H = 2$ m,耗时 200 ms.

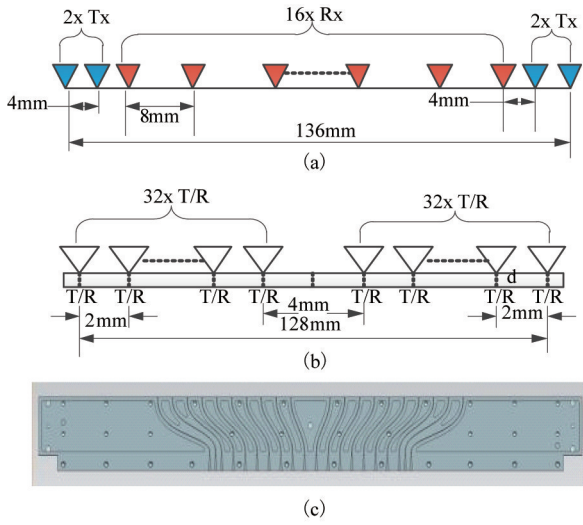


图2 340 GHz 稀疏 MIMO 阵列布局及其等效虚拟阵元分布
Fig.2 (a) Arrangement of transmitters and receivers, (b) equivalent aperture positions and (c) Array antenna physical design

根据上述设计指标,系统可在 4 m 的距离(光程)上,实现对 2 m(高) × 0.6 m(宽) × 0.8 m(深)的立体区域的三维成像,成像分辨率约为 12 mm(高) × 14 mm(宽) × 9 mm(深)。

2 通道校正与系统性能测试

MIMO 雷达系统为典型的相参雷达系统,各通道之间的相位一致性与线性调频的非线性直接决定了系统的成像效果。然而,由于系统布线等因素导致各通道信号传输时延有所不同,线性调频源的非线性也不可绝对消除,所以需要系统各通道的一致性及线性调频源的非线性进行校正。收发通道的非线性对成像的影响及其校正放大见文献[6, 14],本文重点讨论通道间一致性的校正问题。在相位同步的情况下考虑路径延迟,系统延迟如图3所示,其中 τ_u 为触发信号源到天线输出信号的总延迟; τ_n 为触发信号源到本振输出信号的总延迟; τ_d 为天线输出信号、目标散射到接收到信号的总延迟; τ_{acq} 为信号源触发到数据采集触发的总延迟; τ_s 为有效信号输出持续时间; $\Delta\tau$ 为有效信号输出到 ADC 采样的延迟。 f_l 为发射信号带宽起始频率, f_H 为发射信号带宽截止频率, T_x , LO , R_x 分别为发射信号,本振信号与接收信号的时频曲线。

系统校正原理如下所述,将参考目标置于已知位置 (x_r, y_r, z_r) 处,第 m 发射通道发射,第 n 接收通道接收,则接收原始信号解线性调频后为

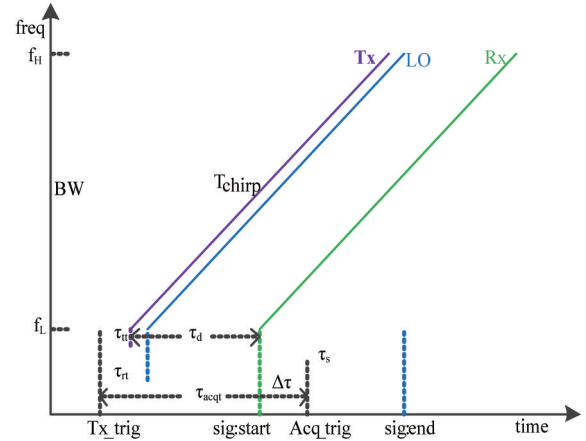


图3 系统时延参数
Fig.3 System time delay

$$s_{mn} = \sigma A \exp(j2\pi(f_c \tau + k\tau(t - \Delta\tau) - \frac{1}{2}k\tau^2 + \varepsilon(t) - \varepsilon(t - \tau - \Delta\tau))) \quad (1)$$

其中 σ 为雷达后向散射系数, f_c 为载波中心频率, k 为线性调频率, $\tau = \tau_d + \tau_u - \tau_n$, $\Delta\tau = \tau_{acq} - (\tau_d + \tau_u)$ 。由已知位置参数计算参考点目标回波信号可得

$$s_{mref}(t) = \exp(j2\pi(f_c \tau_d + k\tau_d t - \frac{1}{2}k\tau_d^2)) \quad (2)$$

因此,可得归一化的补偿信号

$$s_{com}(t) = \frac{s_{mn}}{s_{mref}} = \frac{2}{\sqrt{2E_{mn}}} \exp(j2\pi\Delta\varepsilon(t)) \quad (3)$$

其中

$$\Delta\varepsilon(t) = f_c \tau_{u-n} + k\tau_{u-n} - k\tau\Delta\tau - \frac{1}{2}k(2\tau_d \tau_{u-n} + \tau_{u-n}^2) + \varepsilon(t) - \varepsilon(t - \tau - \Delta\tau) \quad (4)$$

假定通道延迟基本固定且非线性缓变,可采用上式对信号进行相位补偿,分析上式 $\Delta\varepsilon(t)$ 项,其中 $\tau_{u-n} = \tau_u - \tau_n$ 相关项主要补偿各通道一致性,而 $\varepsilon(t) - \varepsilon(t - \tau - \Delta\tau)$ 则校正了单通道的相位失真, A 校正了单通道的幅度失真。

采用上述校准方式完成对系统校正后,对视场中心位置点目标进行测量,采用 BP 算法进行成像处理,获得图4右边的点目标扩散函数(Point Spread Function, PSF)图,并与理论结果(图4左)进行了对比,图5和图6分别为对 PSF 理论和实测结果进行距离维和方位维切片后的对比图。由图中可知,系统距离维分辨率约为 $P_r = 0.010$,峰值旁瓣比 PSLR 约为-18 dB,方位维分辨率约为 $\rho_r = 0.010$ m,峰值旁瓣比 PSLR 约为-20 dB,在误差允许的范围内实测结果与理论仿真结果基本相同,证实了系统设计的正确性和上述校准方法对通道的一致性校正的

有效性. 在信号处理中,采用相干因子法^[14]进一步降低系统栅瓣电平.

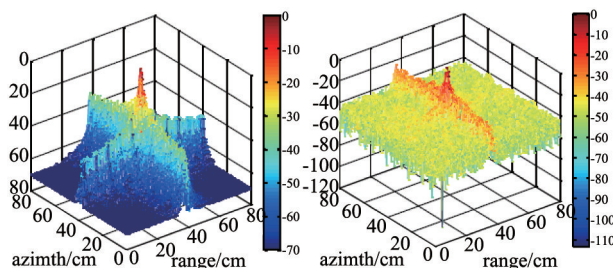


图4 系统点扩散函数仿真与实测结果
 Fig.4 PSF characteristics of the MIMO array with 16 GHz bandwidth by simulation (left) and experimental (right)

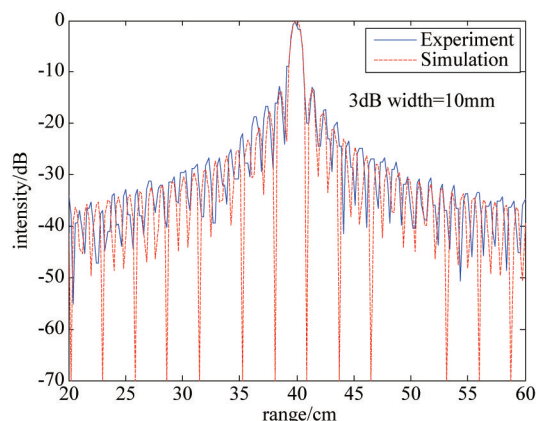


图5 系统距离维分辨率的仿真和校正后的实测结果对比
 Fig.5 Comparison of the simulation and experimental results of range resolution after calibration

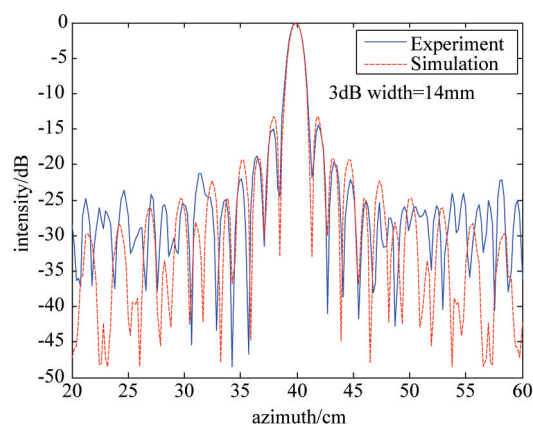


图6 系统方位维分辨率的仿真和校正后的实测结果对比
 Fig.6 Comparison of the simulation and experimental results of horizontal resolution after calibration

3 成像实验与结果分析

集成后的成像系统及其成像场景如图7所示,采用该340 GHz MIMO 雷达系统对人体进行三维成像,人体位置距摆镜距离为3 m,距MIMO 天线阵列光程为4m,线波束在视场宽度约为12 mm,摆镜步进角度为,从而使波束以约1 cm 的间距完成对人体进行扫描,总扫描角度,视场中心处垂直方向波束扫描范围约2 m. 被成像人体目标位于成像面处,人体携带有一把置于外套内的玩具手枪,其位置在图8右图所标记的位置. 图8所示为系统对人体隐藏枪支模型的三维成像结果. 图中从左到右依次为三维成像结果在顺时针旋转0°,30°,60°,90°等不同角度下的显示结果,图中呈现明显的人体轮廓与枪体轮廓,证明系统对放置在衣物之下的危险物品具有一定的检测能力. 然而图中除去枪体外,在眼睛,脖颈,胸口以及大腿内侧,仍然存在着其他强散射点,经测试,强散射点处皆为内凹型强散射结构,对目标探测构成了一定的干扰,然而内凹型强散射结构体在距离维上与枪体存在着显著区别,可采用距离维信息实现对枪体的鉴别. 系统扫描时间为200 ms,成像时间未经加速约为0.7 s,若采用GPU 加速,成像时间可控制在50 ms 以内,系统可实现4 Hz 的扫描成像速度.

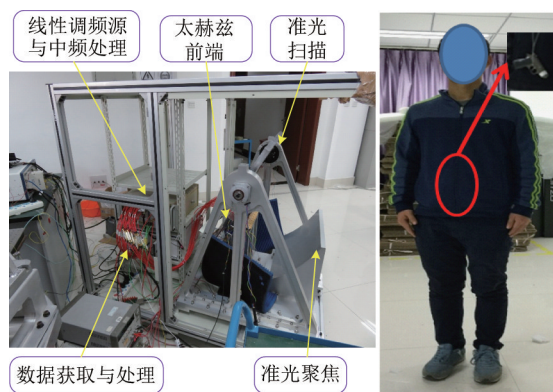


图7 实验场景
 Fig.7 The experimental scene

4 结论

文中介绍了一种基于稀疏MIMO 阵列的太赫兹实时3D 成像系统,并提出了其通道一致性及线性调频源非线性的校准方式. 系统采用水平放置的稀疏MIMO 阵列与机械准光扫描结合的方式实现人体的三维高分辨率快速成像,通过对已知位置参考点

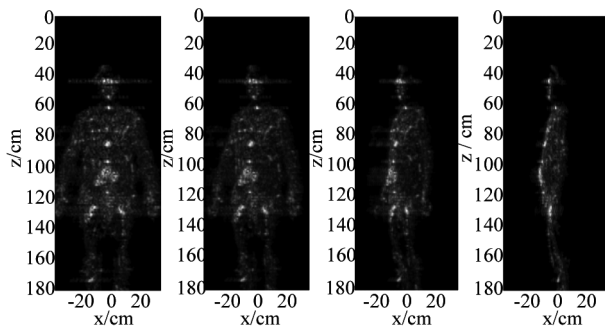


图8 人体三维成像实测结果
Fig. 8 Experimental imaging results

目标信号的测量来进行系统校准. 经测试, 系统距离维、水平维和垂直维的分辨率分别达到 10 mm、14 mm 和 12 mm, 可实现对枪等隐藏危险物品的三维高分辨率成像, 证明了系统方案的可行性及校准方式的有效性. 目前, 系统成像还存在一定的程度人体强散射结构和相干斑干扰, 后续将在阵列布局和信号处理算法方面进行改进; 另外, 目前系统成像采用 Matlab 软件在 PC 机上进行处理, 成像时间(含扫描)约为 0.9 s, 正在开发相应的加速算法, 预计可实现 4 Hz 的扫描成像速度, 从而实现无停留的通过式人体安检.

References

- [1] Appleby R, Wallace H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, AP-55(11):2944-2956.
- [2] Wallace H B. Analysis of RF imaging applications at frequencies over 100 GHz [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(19):E38-E47.
- [3] Binbin Chen, Huiping Li, Jianfei An, *et al.* Application of terahertz imaging in standoff security inspection [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, (成彬彬, 李慧萍, 安健飞, 等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2015, 13(6):843-848.
- [4] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, *et al.* A high-resolution imaging radar at 580 GHz [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2008, 18(1):64-66.
- [5] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, *et al.* Penetrating 3-D imaging at 4 and 25 meter range using a submillimeter-wave radar [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(12):2771-2778.
- [6] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, *et al.* THz imaging radar for standoff personnel screening [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, 1(1):169-182.
- [7] Theodore Reck, Jose Siles, Cecile Jung, *et al.* Array technology for terahertz imaging [C]// *Proceedings of SPIE*. Baltimore: [s. n.], 2012:836202-1-836202-8.
- [8] Cooper K B, Theodore A Reck, Cecile Jung-Kubiak, *et al.* Transceiver array development for submillimeter-wave imaging radars [C]// *Proceedings of SPIE*. Baltimore, Maryland, USA: [s. n.], 2013, 8715: 87150A-1-87150A-8.
- [9] Naomi E Alexander, Byron Alderman, Fernando Allona, *et al.* TeraSCREEN: Multi-frequency multi-mode terahertz screening for border checks [C]// *Proceedings of SPIE*. Baltimore, Maryland, USA: [s. n.], 2014, 9078: 907802-1-907802-12.
- [10] GU Shengming, LI Chao, GAO Xiang, *et al.* Terahertz aperture synthesized imaging with fan-beam scanning for personnel screening [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(12):3877-3885.
- [11] GU Shengming, LI Chao, GAO Xiang, *et al.* Three-dimensional image reconstruction of targets under the illumination of terahertz Gaussian beam—theory and experiment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4):2241-2249.
- [12] Binbin Chen, Ge Jiang, Peng Chen, *et al.* 0.67 THz high resolution imaging radar [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, (成彬彬, 江舸, 陈鹏, 等. 0.67THz 高分辨力成像雷达. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2013, 11(1):7-11.
- [13] Zhang Z, Buma T. Terahertz Impulse Imaging With Sparse Arrays and Adaptive Reconstruction [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 2011, 17(1):169-176, 2011.
- [14] Binbin Cheng, Ge Jiang, Cheng Wang, *et al.* Real Time Imaging with a 140 GHz Inverse Synthetic Aperture Radar [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, 3(5):594-605.
- [14] Xu G, Colombelli R, Khanna S P, *et al.* Efficient power extraction in surface-emitting semiconductor lasers using graded photonic heterostructures [J]. *Nat. Commun.* 2012, 3:952.
- [15] Xu G, Halioua Y, Moumdji S, *et al.* Stable single-mode operation of surface-emitting terahertz lasers with graded photonic heterostructure resonators [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2013, 102:231105.
- [16] Xu G, Li L, Isac N, *et al.* Surface-emitting terahertz quantum cascade lasers with continuous-wave power in the tens of milliwatt range [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, 104:091112.
- [17] Halioua Y, Xu G, Moumdji S, *et al.* Phase-locked arrays of surface-emitting graded photonic-heterostructure terahertz semiconductor lasers [J]. *Opt. Express*, 2015, 23:6915-6935.
- [18] Fan J A, Belkin M A, Capasso F. Wide-ridge metal-metal terahertz quantum cascade lasers with high-order lateral mode suppression [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92:031106.

(上接第 64 页)