

## 基于 AlGaIn/GaN 场效应晶体管的太赫兹焦平面成像传感器

罗木昌<sup>1</sup>, 孙建东<sup>2</sup>, 张志鹏<sup>2</sup>, 李 想<sup>2,3</sup>, 申志辉<sup>1</sup>, 王 颖<sup>1</sup>, 陈红兵<sup>1</sup>, 董绪丰<sup>1</sup>, 张金峰<sup>2</sup>,  
陈 扬<sup>1</sup>, 周建勇<sup>1</sup>, 秦 华<sup>2</sup>

- (1. 重庆光电技术研究所, 重庆 400060;  
2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 中国科学院纳米器件与应用重点实验室, 江苏 苏州 215123;  
3. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 江苏 苏州 215123)

**摘要:** 太赫兹波成像技术在人体安检、医学成像、无损检测等领域具有广泛的应用前景。文中面向高速、高灵敏度和便携式太赫兹成像应用需求, 设计实现了一种基于 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管自混频检测机制的太赫兹焦平面成像传感器。该焦平面成像传感器由探测器阵列芯片和 CMOS 读出电路通过倒装互连实现, 阵列规模达到 32×32。探测器阵列中具有对管差分功能的像元设计通过提高探测器的电压响应度和抑制共模电压噪声, 提高了焦平面成像的灵敏度。焦平面成像传感器的输出模拟信号通过片外的模数转换(ADC)芯片转化为数字信号, 由现场可编程门阵列(FPGA)采集后通过 Camera Link 图像数据与通信接口发送到计算机。利用该焦平面成像传感器, 演示实现了太赫兹光斑、太赫兹干涉环和太赫兹光照下的旋转塑料叶片的视频成像, 帧频达到 30 Hz。

**关键词:** 太赫兹自混频探测器; 高电子迁移率晶体管; CMOS 读出电路; 焦平面成像

**中图分类号:** TN36 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0320001

## Terahertz focal plane imaging array sensor based on AlGaIn/GaN field effect transistors

Luo Muchang<sup>1</sup>, Sun Jiandong<sup>2</sup>, Zhang Zhipeng<sup>2</sup>, Li Xiang<sup>2,3</sup>, Shen Zhihui<sup>1</sup>, Wang Ying<sup>1</sup>,  
Chen Hongbing<sup>1</sup>, Dong Xufeng<sup>1</sup>, Zhang Jinfeng<sup>2</sup>, Chen Yang<sup>1</sup>, Zhou Jianyong<sup>1</sup>, Qin Hua<sup>2</sup>

- (1. Chongqing Institute of Optoelectronics Technology, Chongqing 400060, China;  
2. Key Laboratory of Nanodevices and Applications, Suzhou Institute of Nano-tech and Nano-bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;  
3. School of Nano Technology and Nano Bionics, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China)

**Abstract:** Terahertz technologies are believed to find various applications such as security screening, medical imaging, nondestructive inspection etc. For high speed, high sensitivity, and portable terahertz imaging applications, Terahertz Focal Plane Arrays (THz-FPAs) were designed and demonstrated based on self-mixing mechanism in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors (HEMT). The THz-FPAs with an

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(61401456, 61271157, 61401297, 61611530708); 国家重点研发计划(2016YFF0100501)

作者简介: 罗木昌(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电探测器件及成像传感器方面的研究。Email: mcluo@semi.ac.cn

孙建东(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事太赫兹场效应混频探测器方面的研究。Email: jdsun2008@sinano.ac.cn

通讯作者: 秦华(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要从事太赫兹探测器和光源等半导体器件方面的研究。Email: hqin2007@sinano.ac.cn

array size of  $32 \times 32$  were realized by flip-chip bonding a detector array and a readout integrated circuit (ROIC) based on silicon CMOS technology. Each pixel detector consisted of two HEMTs which were configured in a differential output scheme so as to enhance the voltage responsivity, reject the common-mode voltage noise, and increase the sensitivity. The differential detector signals were amplified in the ROIC and converted to digital data by an Analog-to-Digital Converter (ADC) in a printed-circuit board (PCB) which also hosted a Field-Programmable Gate Array (FPGA) for data acquisition and conversion. The data converted into a video stream was sent to a personal computer through the Camera Link interface. The focal plane array was used to demonstrate imaging of terahertz beam spot, terahertz interference ring pattern, and a rotating plastic blade under terahertz illumination all with a frame rate up to 30 Hz.

**Key words:** terahertz self-mixing detector; high-electron-mobility transistor; CMOS readout integrated circuit; focal plane array

## 0 引言

太赫兹波(Terahertz wave)是人类尚未大规模应用的一段电磁频谱资源,其波长大致从  $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{mm}$ 、频率范围在  $0.1 \sim 10 \text{THz}$  之间,也称为亚毫米波和远红外波<sup>[1]</sup>。太赫兹波的光子能量与固体中的声子、等离激元等元激发能量,与气体分子和有机分子的转动、振动能量,与大分子中的氢键能量相当,蕴含着丰富的物理、化学和结构信息,可广泛应用于有害化学成分分析、安全检查、生物医学成像、无损检测、天文观测和高速通信等诸多领域<sup>[2-6]</sup>,在材料、信息、生物医学和天文领域具有重要的科学和应用价值。

近30年来,太赫兹核心器件技术得到了快速的发展。目前,已相继形成了肖特基倍频光源、共振隧穿二极管光源<sup>[7]</sup>和量子级联激光器<sup>[8]</sup>等高效的固态太赫兹光源技术,为进一步实现小型化、可实用的太赫兹技术奠定了坚实的基础。然而,受传统单粒子态输运电子学和量子能级间电子跃迁光子学方法的限制,太赫兹探测器技术的发展还很不成熟。另外,由于缺乏太赫兹焦平面成像传感器,目前广泛采用基于单像元探测器的逐点扫描太赫兹成像方式,导致成像速度较慢,无法实现高速、实时的太赫兹视频成像。因此,亟需开发一种高灵敏度的太赫兹阵列探测器技术。

1996年 Dyakonov 和 Shur 首次提出基于二维电子气中等离子体波的太赫兹混频检测理论<sup>[9]</sup>。该方法有望克服传统方法要求电子迁移率高、电子沟道长度短、器件杂散电学参数小或工作温度低的缺点。

其平面制造工艺具有成本低、一致性好、成品率高和大规模阵列化的优势,有望发展出一种基于场效应混频机制的室温、高速、高灵敏度太赫兹焦平面成像传感器。随后,各国研究小组相继实现了基于 CMOS、III-V 化合物半导体和石墨烯等的室温场效应混频太赫兹探测器<sup>[10-17]</sup>。

针对焦平面成像技术,美国 Terasense 公司率先通过单像元拼接的方式,实现了基于 GaAs 场效应的  $32 \times 32$  和  $64 \times 64$  等焦平面成像模组。由于采用 PCB 板极放大电路和像元拼接的方式,导致像元分辨率和一致性较差。2012年德国 U. R. Pfeiffer 研究小组成功开发了基于  $65 \text{nm}$  CMOS 工艺的  $32 \times 32$  场效应太赫兹焦平面成像传感器<sup>[18]</sup>。该成像传感器将太赫兹探测器和读出电路直接在 CMOS 芯片上互联,因此具有集成度高和一致性好的优点。然而,由于硅的迁移率较低,导致太赫兹波与等离子体波的相互作用较弱,另外其场效应跨导较小,导致探测器灵敏度相对较低。

因此,如何利用 III-V 化合物半导体的场效应沟道的高电子迁移率特性和 CMOS 读出电路优势,研制具备更高性能的太赫兹焦平面成像传感器,是实现可实用化焦平面成像技术的关键。文中通过太赫兹阵列探测器芯片和专用 CMOS 读出电路倒装互连集成,实现了一种基于 AlGaN/GaN 场效应自混频的  $32 \times 32$  太赫兹焦平面成像传感器。

## 1 太赫兹焦平面成像芯片设计

如图 1 所示为太赫兹焦平面成像传感器模组的成

像信号传递示意图,以及 THz 波传输、光电转换、信号传输电路。太赫兹焦平面成像传感器的主要构成部分为基于 GaN-HEMT 的太赫兹探测器芯片和 CMOS 读出电路芯片。

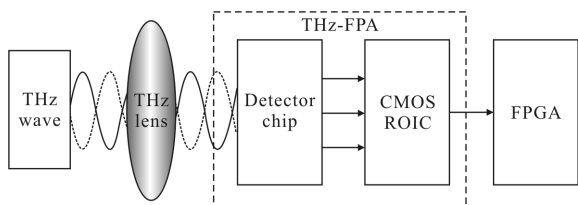


图 1 焦平面探测器模组的构成和信号传递链路

Fig.1 Structure and the signal transmission link of the focal plane array module

如图 2 所示为 32×32 太赫兹焦平面成像传感器中的信号产生、放大、传输及外部处理的链路图。如图 2 实线框所示,在太赫兹波照射下,像元中通过采用两个反向天线布局的探测器来产生正(V+)和负(V-)两路电压响应信号。接着,该响应电压被送入如

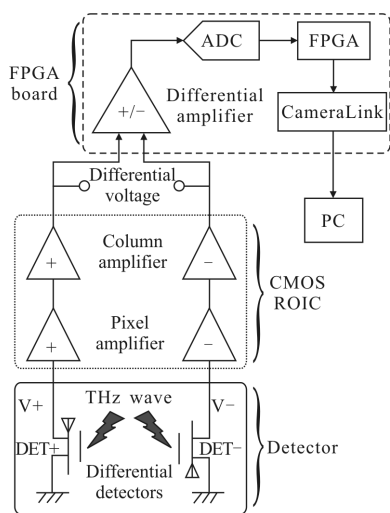


图 2 太赫兹焦平面成像传感器的差分信号产生、放大和处理链路

Fig.2 Generation, amplification and processing of the differential signal from the imaging sensor

图 2 点线框所示的 CMOS 读出电路,像元放大电路和像元探测器相互对应,电压增益约为 500。像元放大器输出的电压信号被并行输入到 32 个列缓冲放大器。最后,将 CMOS 放大电路放大的信号送到如图 2 虚线框所示的 FPGA 等外围信号采集电路。信号处理电路的功能是通过时序控制,将太赫兹响应信号接入电压差分放大器,把两路正负差分信号转

化为单端信号。再通过 ADC 转换,将模拟信号转化为数字信号。最后通过 Camera Link 通信协议将数字信号发送到上位机进行处理,实现太赫兹焦平面成像。

如图 3 所示为 32×32 焦平面成像传感器的系统框图,读出模式采用卷帘式隔行读出。

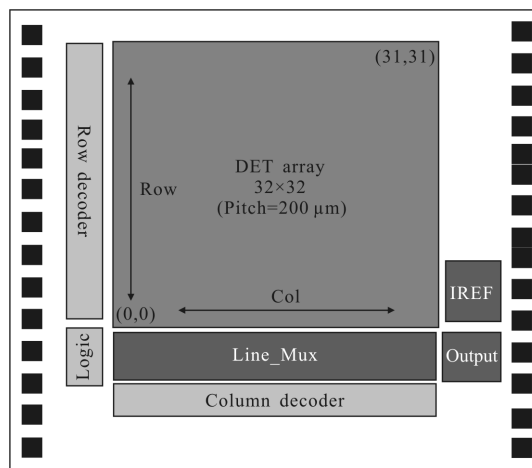


图 3 太赫兹焦平面成像传感器的系统框图

Fig.3 System diagram of the terahertz focal plane imaging chip

## 2 太赫兹焦平面成像传感器的集成

场效应自混频探测器的原理和设计参考文献[20]。它是利用特殊设计的太赫兹天线诱导增强出的平行和垂直于沟道的太赫兹电场,由于场效应管对沟道电导调控的非线性效应,使两个诱导出的太赫兹电场在沟道处自混频,从而在源漏两端产生正比于入射太赫兹波的光电流或光电压响应。图 4 所示为基于 AlGaN/GaN HEMT 的 32×32 焦平面探测器芯片光学显微照片。为了提高像元响应灵敏度和一致性,该探测器阵列芯片工艺制作时采用图形分辨率和工艺稳定性更高的步进式光刻技术来实现。像元探测器的栅长为 0.9 μm,栅极和天线间距为 0.6 μm,像元间距为 200 μm,焦平面芯片面积为 8.5 mm×8.5 mm。

如图 4 所示为单个探测像元,采用正负差分对管的设计方式。不同于传统的有效像元和盲元设计,该焦平面探测器像元由两个形状相同,但是天线方向不同的探测器组成为对管结构,探测器对管可以分别产生大小相同、极性相反的太赫兹响应,因此两个探测器均为有效像元。该设计不仅可以有效抑制共模噪声,提高信号输出的信噪比,同时通过正负相

减的方式能够使得像元的太赫兹响应加倍，提高探测器响应度。每个像元有 4 个铜柱电极，分别为公共的源极(S)、公共的栅极(G)、负输出(D-)和正输出(D+)。太赫兹天线的中心频率为 900 GHz。

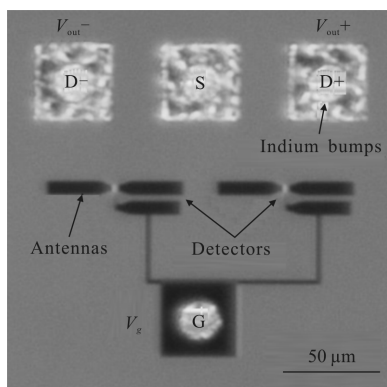


图 4 32×32 阵列探测器芯片单个差分像元的显微照片

Fig.4 Optical microscope image of a single differential detection unit of the 32×32 detector array

如图 5 所示为与 32×32 阵列探测器芯片相匹配的 32×32 焦平面 CMOS 读出电路实物照片，放大器间距为 200 μm，芯片面积约为 11 mm×10 mm。与探测器芯片正负电压差分输出相对应，放大电路采用正负电压差分输入的方式，放大电路各像元的源极、栅极和正负输入端分别集成有铜柱电极，用于与焦平面探测器芯片的倒装集成，并提供探测器芯片的源极和栅极电压。为了尽可能降低放大器噪声和读出电路功耗，放大器采用开环设计。

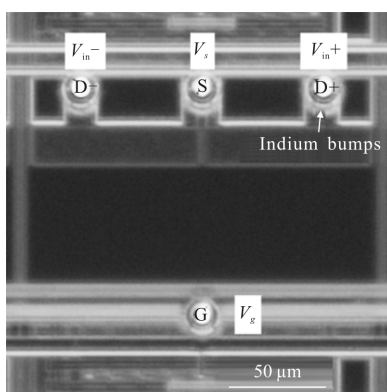


图 5 32×32 CMOS 读出电路芯片像元差分放大器的显微照片

Fig.5 Optical microscope image of a single differential amplifier unit of the 32×32 CMOS readout circuit

由于该太赫兹焦平面成像传感器采用太赫兹天线耦合太赫兹信号，而天线周围读出电路的金属结

构会影响天线的谐振特性，降低耦合效率，同时会降低像元填充率。因此，为了保持太赫兹天线的谐振特性，如图 5 所示，在 CMOS 读出电路中心对应太赫兹天线区域，设置了读出电路禁止区。得益于开环差分的读出电路设计，可在有限面积内进行高增益放大，读出电路面积为 187 μm×57 μm，仅占像元面积的 26 %。

通过将上述 32×32 的阵列探测器芯片和 CMOS 读出电路芯片的倒焊互连，如图 6 所示，实现了国际上首个通过异质集成的 32×32 场效应混频焦平面视频成像芯片。通过将成像芯片和基于 FPGA 的信号采集电路板进行引线键合，实现数字信号的连接，并向放大电路、探测器源极和栅极提供电压。

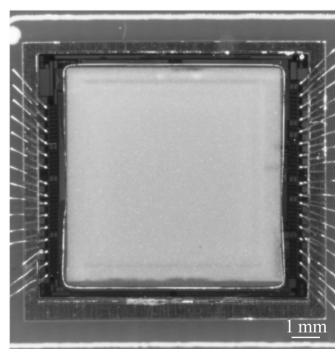


图 6 32×32 焦平面成像光学显微照片

Fig.6 Microscope image of the 32×32 focal plane array

如图 6 所示，背照的太赫兹光，透过阵列探测器芯片的蓝宝石衬底，由天线将太赫兹电场聚焦到场效应混频通道内。焦平面成像传感器的有效感光面积为 6.4 mm×6.4 mm。

如图 7 所示，通过 FPGA 信号采集板直接采集

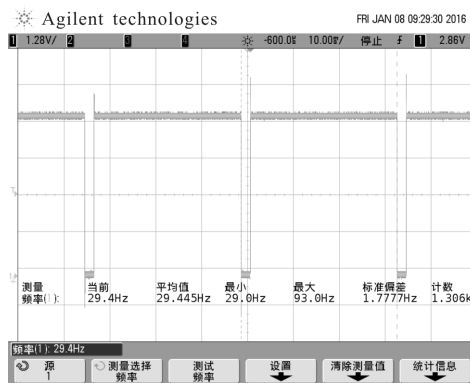


图 7 FPGA 信号采集板上实测的帧频模拟信号

Fig.7 Digital frame signal generated on the FPGA acquisition board

的帧频信号,频率为 30 Hz,可满足太赫兹焦平面视频成像要求。

### 3 焦平面成像演示

图 8(a)所示为基于该 32×32 太赫兹焦平面成像传感器的太赫兹成像系统示意图。太赫兹光源辐射的太赫兹光通过一个太赫兹透镜形成平行光,穿过被成像物体,再由另一个太赫兹透镜汇聚到整个太赫兹焦平面成像传感器。图 8(b)所示为焦平面成像系统实物图。所用肖特基倍频太赫兹源可在 0.1~1.1 THz 范围内连续可调的输出太赫兹波。由一对特氟龙透镜将太赫兹波收集、准直、并汇聚到 32×32 太赫兹焦平面成像传感器。

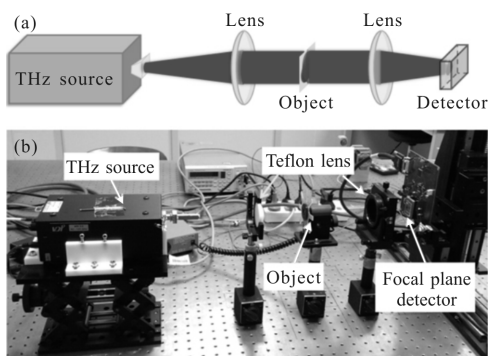
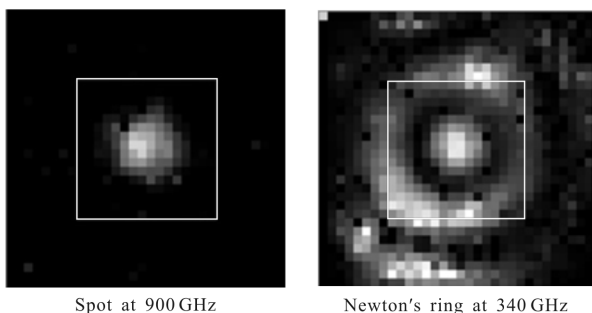
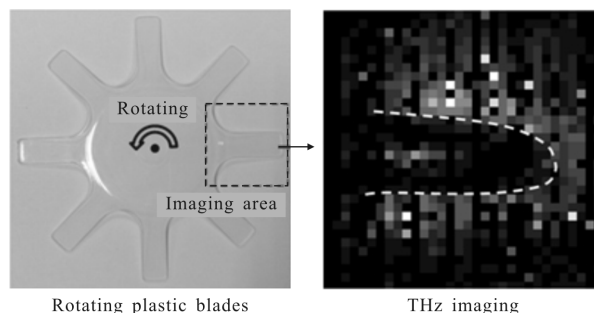


图 8 太赫兹焦平面成像系统示意图(a)和实物图(b)  
Fig.8 Diagram (a) and photograph (b) of the terahertz focal plane imaging system

如图 9(a)所示,利用该焦平面成像系统获得的 900 GHz 聚焦光斑和 340 GHz 牛顿干涉环,表明该焦平面成像传感器具有较高的空间分辨率和信噪比。图 9(b)所示为旋转塑料片的动态视频太赫兹成像,成像帧频达到 30 Hz。



(a) 900 GHz 的太赫兹光斑和 340 GHz 的牛顿干涉环  
(a) Terahertz beam spot of 900 GHz and Newton's ring at 340GHz



(b) 340 GHz 光源照射下旋转塑料片的动态视频太赫兹成像  
(b) Real-time imaging of a rotating plastic blades under illumination of 340 GHz source

图 9 基于 32×32 焦平面成像传感器的太赫兹视频成像演示  
Fig.9 Demonstration of video-rate terahertz imaging based on the 32×32 focal plane array

### 4 结论

文中针对场效应自混频太赫兹检测原理,设计实现了基于 AlGaIn/GaN HEMT 的 32×32 差分对管式场效应混频焦平面成像传感器。通过太赫兹探测器阵列芯片和 CMOS 读出电路的倒装互连成功实现了视频帧率的 32×32 太赫兹焦平面成像传感器,验证了倒装互连的可行性。利用该成像传感器,搭建了焦平面成像系统,实现了太赫兹光斑、牛顿干涉环和旋转塑料叶片等的实时太赫兹成像,成像帧频达到 30 Hz。

由于太赫兹焦平面成像芯片处于发展初期,目前国际上尚未形成用于评价太赫兹焦平面成像传感器质量的指标体系。因此,后续将进一步研究建立完整的指标体系,为焦平面成像传感器的设计与优化、太赫兹成像信号的处理提供理论依据。

### 参考文献:

- [1] Tonnuchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] Shen Y C, Lo A T, Taday P F, et al. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(24): 24116.
- [3] Chen Q, Jiang Z, Xu G X, et al. Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(15): 1122-1124.
- [4] Zhong H, Xu J, Xie X, et al. Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography [J].

- IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(2): 203–208.
- [5] Shi S C, Paine S, Yao Q J, et al. Terahertz and far-infrared windows opened at dome a in antarctica [J]. *Nature Astronomy*, 2016, 1(1): 0001.
- [6] Shen Jin'e, Rong Jian, Liu Wenxin. Progress of terahertz in communication technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 342–347. (in Chinese)  
申金娥, 荣健, 刘文鑫. 太赫兹技术在通信方面的研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(3): 342–347.
- [7] Feiginov M, Sydlo C, Cojocari O, et al. Resonant tunnelling diode oscillators operating at frequencies above 1.1 THz [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(23): 233506.
- [8] Chen Zhen, Tan Zhiyong, Wang Chang, et al. Digital communication link based on THz QCL and THz QWP [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2796–2799. (in Chinese)  
陈镇, 谭智勇, 王长, 等. 基于 THz QCL 和 THz QWP 的数字通信演示系统 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2796–2799.
- [9] Dyakonov M, Shur M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(3): 380–387.
- [10] Lu J Q, Shur M S, Hesler J L, et al. Terahertz detector utilizing two-dimensional electronic fluid [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 1998, 19(10): 373–375.
- [11] Knap W, Kachorovskii V, Deng Y, et al. Resonant detection of subterahertz radiation by plasma waves in a submicron field-effect transistor[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(18): 9346–9353.
- [12] Sun J D, Sun Y F, Wu D M, et al. High-responsivity, low-noise, room-temperature, self-mixing terahertz detector realized using floating antennas on a GaN-based field-effect transistor[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(1): 013506.
- [13] Sun J D, Qin H, Lewis R A, et al. The effect of symmetry on resonant and nonresonant photoresponses in a field-effect terahertz detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(3): 031119.
- [14] Lisauskas A, Pfeiffer U, Öjefors E, et al. Rational design of high-responsivity detectors of terahertz radiation based on distributed self-mixing in silicon field-effect transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(11): 114511.
- [15] Liu Zhaoyang, Liu Liyuan, Wu Nanjian. Imaging system based on CMOS terahertz detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0125001. (in Chinese)  
刘朝阳, 刘力源, 吴南健. 采用 CMOS 太赫兹波探测器的成像系统 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0125001.
- [16] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors [J]. *Nature Material*, 2012, 11(10): 865–871.
- [17] Qin H, Sun J D, Liang S X, et al. Room-temperature, low-impedance and high-sensitivity terahertz direct detector based on bilayer graphene field-effect transistor [J]. *Carbon*, 2017, 116: 760–765.
- [18] Al Hadi R, Sherry H, Grzyb J, et al. A 1 k-pixel video camera for 0.7–1.1 terahertz imaging applications in 65-nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(12): 2999–3012.
- [19] Sun Jiandong. Field-Effect Self-Mixing Terahertz Detectors [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2016.