

采用 CMOS 太赫兹波探测器的成像系统

刘朝阳, 刘力源, 吴南健

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 太赫兹波成像技术在生物医疗和安全检测等领域具有广阔的应用前景。针对新一代信息技术对便携式太赫兹波成像设备的需求, 设计了基于 CMOS 太赫兹波探测器的成像系统。该系统包括一款 CMOS 太赫兹波探测器、片外模数转换器(ADC)、FPGA 数字信号处理器、二位步进机、四个抛物面镜和太赫兹波辐射源等。CMOS 太赫兹波探测器集成了片上贴片天线以及作为检波元件的 NMOS 晶体管, 探测器由 180 nm 标准 CMOS 工艺制成。太赫兹波探测器的输出被片外模数转换器(ADC)采集并转换为数字信号, 该数字信号被 FPGA 采集并传输到电脑上成像。所有上述元件均被装备在印刷线路板(PCB)上以减小系统体积。该系统实现了透射式太赫兹波扫描成像而无需斩波-锁相技术, 并给出在 860 GHz 的太赫兹波照射下隐藏在信封内部金属的成像结果。

关键词: 太赫兹波成像; CMOS; 太赫兹波探测

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0125001

Imaging system based on CMOS terahertz detector

Liu Zhaoyang, Liu Liyuan, Wu Nanjian

(State Key Laboratory of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Terahertz imaging has wide applications such as biomedical, security check and so on. With the development of modern information technology, portable terahertz imaging devices are demanding. An imaging system based on CMOS terahertz detector was proposed. The system includes a CMOS terahertz detector, an off-chip ADC, an FPGA, a 2-D step motor, four parabolic mirrors and a terahertz source. The terahertz detector integrates an on-chip patch antenna and a source-feeding NMOS transistor as detection element, which was implemented in 180 nm standard CMOS process. The output signal of the detector was a dc voltage signal which depends on the detected terahertz radiation power proportionally. An external ADC converts the output signal of the detector into digital signal which was captured by an FPGA and then transferred to a computer to realize imaging. In order to reduce the system volume, all above elements were mounted on a set of printed circuit boards(PCBs). Clear raster-scanning transmission images can be obtained by the imaging system with continuous terahertz illumination. The image of metals in an envelope was obtained by the imaging system at 860 GHz.

Key words: terahertz imaging; CMOS; terahertz detection

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61331003, 61474108); 北京市自然科学基金(4152051)

作者简介: 刘朝阳(1989-), 男, 博士生, 主要从事 CMOS 太赫兹波图像传感器方面的研究。Email: liuzhaoyang11@semi.ac.cn

导师简介: 刘力源(1982-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事 CMOS 太赫兹波图像传感器以及视觉芯片等方面的研究。

Email: liuly@semi.ac.cn

吴南健(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事 COMS 太赫兹波图像传感器、高速图像传感器、高速视觉片上系统芯片设计和图像并行处理片上系统芯片等方面的研究。Email: nanjian@yed.semi.ac.cn

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.3~3 THz (波长在 1 mm~30 μm)范围内的电磁波,该频段介于毫米波与远红外光之间,在 20 世纪 80 年代中期以前,由于缺乏有效的产生和检测方法,人们对于该波段电磁辐射性质的了解非常有限,以致该波段被称为电磁波谱中的 THz 空隙,该波段也是电磁波谱中有待进行全面研究的最后一个频率窗口。近十几年来,超快激光技术的迅速发展,为 THz 脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源^[1-2],使 THz 辐射的机理研究、检测技术和应用技术得到蓬勃发展。THz 技术之所以引起广泛的关注,是由于太赫兹电磁波因其独特的特点,在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文和宽带移动通讯^[3-6]等方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景,因此世界发达国家争相将太赫兹波科学技术列为战略性科技方向^[7-9]。

可见光、X 射线、电子束、中红外、近红外和超声波是在医学诊断、材料分析以及工业生产等诸多领域中广泛应用的主要成像信号源。与以上的光源相比,太赫兹电磁波对于某些电介质材料具有很强的穿透效果。除了可测量由材料吸收而反映的空间密度分布外,还可以通过相位测量得到折射率的空间分布,从而获得与材料相关的更多信息,这是太赫兹波时域光谱的独特优点,特别适合于可见光不能透过、而 X 射线成像的对比度又不够的场合。此外,太赫兹电磁波的光子能量极低(1 THz 约 411 meV),没有 X 射线的电离性质(光子能量在 keV 量级),不会对生物体或者材料造成破坏,因此太赫兹波成像技术在今后的医疗诊断、安全检测、危险物品检查和隐形武器的探测等领域将具有重要应用,已成为各国争相研究热点。因此开展太赫兹波图像传感器方面的研究对于立足于长远科技战略目标及对国家安全等方面具有重大意义。

国内外许多研究机构已开展了对太赫兹波成像的研究。基于高电子迁移率晶体管(HEMT)的太赫兹波探测器已经被报道^[10],它们虽然有较高的响应率,但是很难在一款芯片上集成读出和处理电路。由于 CMOS 工艺具有体积小、易大规模集成和廉价等特点,近些年来在太赫兹波图像传感方面被广泛研究^[11-13]。然而,现有太赫兹波成像系统大多需要光斩波器和

锁相放大器来增加太赫兹波探测器的信噪比,该成像系统较为庞大,一般只适合一个或几个像素的扫描成像,难于在阵列式成像系统中实现。

为了实现成像系统的简化,文中建立了无需将太赫兹波辐射信号进行调制的成像系统,该系统所采用的太赫兹波探测器由 180 nm 标准 CMOS 工艺制成,一个高精度的模数转换器(ADC)被用来采集太赫兹波探测器的输出,此 ADC 的输出被 FPGA 所采集并传输到电脑上成像,上述元件被组装在印刷电路板上以减小体积。利用该太赫兹波成像系统实现了在 860 GHz 的太赫兹波照射下隐藏在信封内部金属的成像。

1 CMOS 太赫兹波探测器

文中所采用的 CMOS 太赫兹波探测器集成了片内贴片天线以及作为检波元件的 NMOS 晶体管,其电路结构图如图 1 所示,贴片天线将所接收到的太

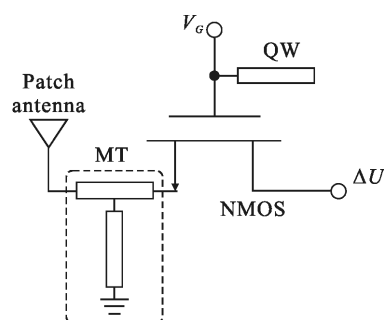


图 1 太赫兹波探测器电路结构图

Fig.1 Circuit schematic of the terahertz detector

赫兹波信号传输到 NMOS 晶体管的源极, NMOS 晶体管的栅长 $L=0.35 \mu\text{m}$, 栅宽 $W=1 \mu\text{m}$, 其栅极外接固定电平,漏极处于开路状态,根据 Dyakonov 等人提出的等离子体波检测理论^[14]可知,当太赫兹波信号被连接到 NMOS 晶体管栅极和源极之间时, NMOS 晶体管的漏极将产生一与所接收到的太赫兹波信号能量成正比的直流信号。该直流信号可写为:

$$\Delta U = -\frac{U_a^2}{4(V_G - V_{th})} \quad (1)$$

式中: U_a 为连接到栅极和源极的太赫兹波信号幅度; V_G 为栅极电压; V_{th} 为阈值电压。与太赫兹波信号从 NMOS 晶体管的栅极输入的结构相比,这种太赫兹波信号从源极输入的好处是很容易实现宽频带太

赫兹波的检测。

片上贴片天线的结构图如图 2 所示,辐射贴片和地平面分别由工艺的顶层金属和底层金属做成,贴片的长度和宽度分别为 $81\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$,贴片与地平面之间的介质层厚度为 $3.58\ \mu\text{m}$ 。利用三维电磁波仿真软件 HFSS 仿真此贴片天线的性能。

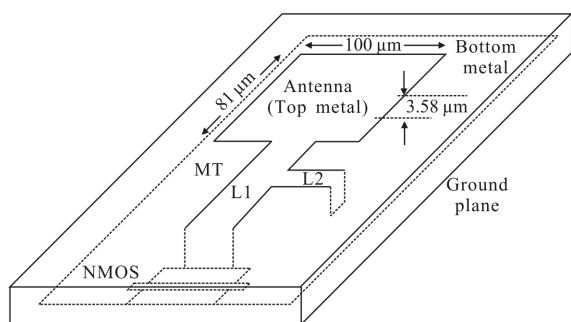


图 2 片上贴片天线和匹配网络 MT 结构图

Fig.2 Structure of the patch antenna and matching network MT

探测器的性能依赖于片上贴片天线与 NMOS 晶体管之间的能量传输效率,因此为了增加天线与 NMOS 晶体管之间的能量传输效率,设计了一个匹配网络 MT,其结构图如图 2 所示,该匹配网络是一短路短截线匹配网络,可实现天线与 NMOS 晶体管之间的阻抗匹配。它由两个微带线 L1 和 L2 组成,L1 连接天线与 NMOS 晶体管的源极,L2 连接 L1 与地平面,该匹配网络同时也为 NMOS 晶体管提供了直流通路,其同样是由工艺的顶层金属做成而底层金属作为地平面。

由于 NMOS 晶体管的栅极需要外接一固定偏置,笔者采用片外供电的方式,直接通过引线将直流电供给到 NMOS 晶体管的栅极,由于此引线会影响 NMOS 晶体管的输入阻抗,而使得贴片天线与 NMOS 晶体管的源极输入阻抗失配,这将导致从天线接收到的太赫兹波信号能量传输给 NMOS 晶体管的源极能量减小。为了消除栅极的外部引线对 NMOS 晶体管的输入阻抗的影响,在 NMOS 晶体管的栅极增加了一个开路四分之一波长微带线 QW,此微带线对与之相对应波长的太赫兹波信号形成一个交流地而对于直流信号来说是开路,因此它即可消除外部引线的影响又对直流偏置无影响,它同样是由工艺的顶层金属做成而底层金属作为地平面。

该探测器是在 $180\ \text{nm}$ 标准 CMOS 工艺下实现

的,其芯片照片如图 3(a)所示,其面积大约为 $170\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ 。图 3(b)为测试探测器性能的装置示意图。光斩波器调制 $860\ \text{GHz}$ 返波管(BWO)太赫兹波辐射源,同时给锁相放大器提供一个参考信号,BWO 辐射源

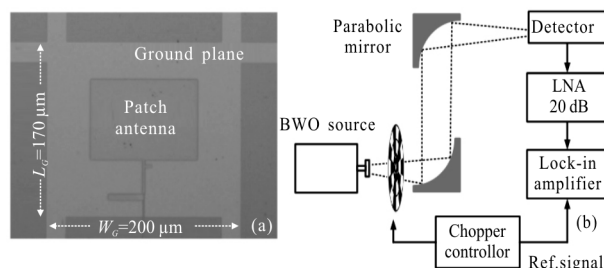


图 3 CMOS 太赫兹波探测器照片(a)和太赫兹波探测器性能测试系统示意图(b)

Fig.3 (a) Photo of the CMOS terahertz detector and (b)

measurement setup to measure the output voltage signal of the detector

在 $860\ \text{GHz}$ 下辐射功率为 $51.4\ \mu\text{W}$,经过调制后的太赫兹波被两个抛物面镜聚焦到探测器上,探测器的输出端外接一 $20\ \text{dB}$ 的低噪声放大器(SR560),低噪声放大器的输出端接锁相放大器。因为太赫兹波信号被调制到光斩波器的频率,锁相放大器所测出的值为被放大后的探测信号的基频幅值的有效值。根据傅里叶分析可知,实际探测器输出值为:

$$U_{\text{out}} = \frac{\pi U_{\text{Lock}}}{\sqrt{2} G_{\text{LNA}}} \quad (2)$$

式中: U_{Lock} 为锁相放大器的输出值; G_{LNA} 为低噪声放大器的放大倍数。图 4 显示了此探测器在 $860\ \text{GHz}$ 太赫兹波源辐射下的电压响应率(R_V)和噪声等效功率(NEP)随着栅极电压变化的曲线。当栅极电压为 $V_G=0.66\ \text{V}$ 时,探测器获得了最高电压响应率为 $353\ \text{V/W}$,当栅极电压为 $0.98\ \text{V}$ 时,探测器有最小 NEP 为 $188\ \text{pW/Hz}^{1/2}$ 。参考文献[10-13]所报道的探测器电压响应率曲线均为单峰曲线,而该探测器的电压响应率曲线形成了双峰曲线,此结果可能由多种原因导致而成,其物理机制尚需进一步分析,笔者分析了其中一种可能的形成原因,但仍需进一步通过测试来研究与验证,因此分析如下:因为 NMOS 晶体管的输入阻抗是随着栅极电压的变化而改变的,而当 NMOS 晶体管的栅极电压为 $0.28\ \text{V}$ 时,贴片天线与 NMOS 晶体管达到了最优的阻抗匹配,即

天线与 NMOS 晶体管之间形成了最优的能量传输效率,从而形成了第一个峰值,而根据 Dyakonov 等人提出的等离子体波检测理论可知探测器输出最高值应在 NMOS 晶体管的阈值电压附近,即为第二个峰值形成的原因。

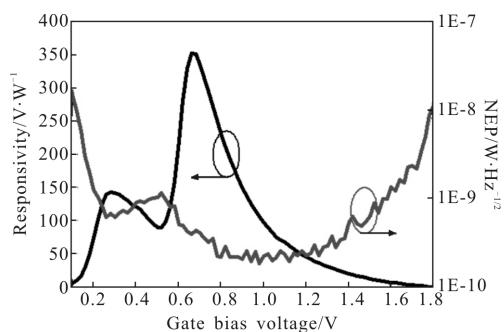


图 4 探测器在 860 GHz 的电压下所测量的响应率(R_V)及噪声等效功率(NEP)随着栅极电压变化曲线图

Fig.4 Measured R_V and NEP of the detector as a function of gate bias voltage at 860 GHz

2 太赫兹波成像模块

在上一节利用斩波-锁相技术测量了该太赫兹波探测器的最高输出电压,然而此系统相对较为庞大,需要外部光斩波器和锁相放大器来提高探测器的信噪比,为了实现便携式太赫兹波成像系统,采用片外模数转换器(ADC)采集探测器的输出信号,从而降低了系统的复杂度和体积。由于现有太赫兹波辐射源的辐射功率较低,从而导致太赫兹波探测器的输出信号幅度较小,因此需选择高精度、低噪声的 ADC,采用德州仪器生产的型号为 ADS1282 的高精度 ADC,此 ADC 内部集成了运算放大器。探测器和 ADC 被组装在印刷线路板(PCB)上,如图 5 所示。为了方便更换不同的探测器,笔者将 PCB 分为子板和母板两块,子板和母板通过排针进行数据交互。探测器被安装在子板上,并通过金线与子板上的其他元件进行数据交换。供电模块以及 ADC 安装在母板上,ADC 的时钟信号以及控制逻辑由 FPGA 提供,并且 FPGA 收集 ADC 的输出信号并通过 USB 接口将收集到的传输到电脑上从而实现成像。为了简化系统体积,FPGA 被固定在母版的背面并通过排针与母版进行数据交换。由于该系统模块只包含一个太赫兹波探测器,因此需要步进扫描来实现太赫兹

波透射式成像。

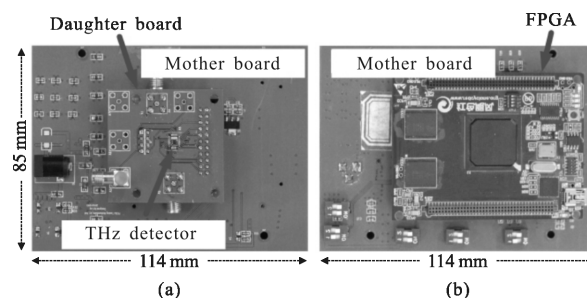


图 5 太赫兹波成像模块的正面照片(a)和其背面照片(b)

Fig.5 Front (a) and back (b) of the photograph of the terahertz imaging module

3 太赫兹波成像系统

由于现有太赫兹波辐射源辐射能量较小,因此需要将辐射信号聚焦到我们组装的太赫兹波成像模块上。图 6 所示为透射式太赫兹波成像系统示意图,

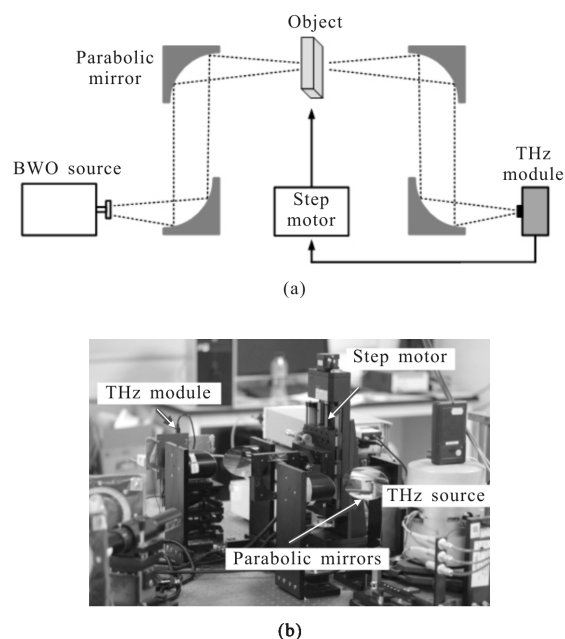


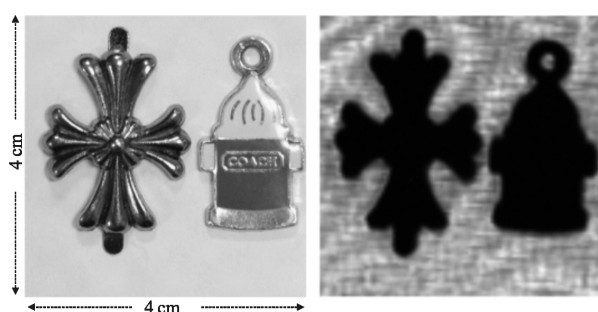
图 6 CMOS 太赫兹波成像系统结构图(a)和实物图(b)

Fig.6 Block diagram (a) and real photo (b) of the CMOS terahertz imaging system

其中太赫兹波辐射源为 BWO 太赫兹波源,被照物体被固定在一个二维步进机上,太赫兹波被前两个抛物面镜准直和聚焦在物体上,然后透射过物体的太赫兹波被后两个抛物面镜准直和聚焦到太赫兹波成像模块上。二维步进机被 FPGA 控制,ADC 每输出一个信号,FPGA 就输出一步进脉冲控制二维步进机运

动到下一位置,步进速度可由脉冲频率控制,步进长度可通过脉冲宽度调解,待步进电机稳定后 ADC 进入下一个采样周期,周而复始,从而实现物体扫描成像。与现有的需要光斩波器和锁相放大器来提高太赫兹波探测器信噪比的太赫兹波成像系统相比,该成像系统不需要将太赫兹波辐射信号进行调制,从而也就不需要光斩波器和锁相放大器,因此减小了系统的复杂度。并且该成像系统同样适合阵列式太赫兹波成像探测器,可实现一列或多列太赫兹波探测像素共用一个 ADC 模式,从而更进一步简化太赫兹波成像系统。

图 7 显示了隐藏在信封内部的金属透射式扫描成像图,图(a)为实物图,图(b)为成像图,成像物体的扫描面积为 4 cm×4 cm,被分为 100×100 个像素点,太赫兹波光源的频率为 860 GHz。图 7 清晰的显示了隐藏在信封内部金属的轮廓。



(a) 实物图

(b) 成像图

(a) Real photo of the metals

(b) Terahertz image

图 7 在 860 GHz 的太赫兹波光源辐射下所获得的隐藏在信封内部的金属成像图

Fig.7 Image of the metals in a paper envelope captured at 860 GHz

4 结论

文中设计了基于 CMOS 太赫兹波探测器的成像系统,该系统包含太赫兹波成像模块、光路系统以及太赫兹波辐射源等。与斩波-锁相成像系统相比,该系统大大简化了系统的复杂度,也为太赫兹波阵列式像素成像系统提供了可能。其中太赫兹波成像模块包含一款 CMOS 太赫兹波探测器、ADC 和 FPGA 数字信号处理器,上述元件被装备在印刷线路板(PCB)上以减小系统体积。太赫兹波探测器由 180 nm 标准 CMOS 工艺制成,它集成了片内贴片天线和作

为检波元件的 NMOS 晶体管。在辐射功率为 51.4 μW 的 860 GHz 的辐射源照射下,该太赫兹波探测器的最高输出电压为 490 μV。利用该太赫兹波成像系统完成了隐藏在信封内部金属的成像实验。

参考文献:

- [1] Lin Xuling, Zhou Feng, Zhang Jianbing, et al. High power wideband terahertz sources based on femtosecond facility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 116-118. (in Chinese)
林翎凌,周峰,张建兵,等.采用飞秒装置的高功率宽带太赫兹源[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 116-118.
- [2] Yang Jing, Zhao Jiayu, Guo Lanjun, et al. Study of terahertz radiation from filamentation induced by ultrafast laser pulsed [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 996-1007. (in Chinese)
杨晶,赵佳宇,郭兰军,等.超快激光成丝产生太赫兹波的研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 996-1007.
- [3] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. THz imaging radar for standoff personnel screening [J]. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2011, 1(1): 169-182.
- [4] Ajito K, Ueno Y. THz chemical imaging for biological applications [J]. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2011, 1(1): 293-300.
- [5] Ono N, Motoyoshi M, Takano K, et al. 135 GHz 98 mW 10 Gbps ASK transmitter and receiver chipset in 40 nm CMOS[C]//IEEE, 2012: 50-51.
- [6] 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.
- [7] Liu H B, Zhong H, Karpowicz N, et al. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95 (8): 1514-1527.
- [8] Liu Shenggang, Zhong Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(5): 481-486. (in Chinese)
刘盛纲,钟任斌.太赫兹科学技术及其应用的新发展 [J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(5): 481-486.

- [9] Cai He, Guo Xuejiao, He Ting, et al. Terahertz wave and its new applications[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010,15(3): 209–222. (in Chinese)
蔡禾, 郭雪娇, 和挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展 [J]. *中国光学与应用光学*, 2010,15(3): 209–222.
- [10] Sun J D, Qin H, Lewis R A, et al. Probing and modelling the localized self-mixing in a GaN/AlGaIn field-effect terahertz detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(17): 173513.
- [11] Öjefors E, Pfeiffer U R, Lisauskas A, et al. A 0.65 THz focal-plane array in a quarter-micron CMOS process technology [J]. *Solid-State Circuits, IEEE*, 2009, 44 (7): 1968–1976.
- [12] Liu Z Y, Liu L Y, Zhang Z, et al. A 0.94 THz detector in 180 nm standard CMOS process [C]//2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), 2014: 474–475.
- [13] Liu Z Y, Liu L Y, Yang J, et al. A fully-integrated 860–GHz CMOS terahertz sensor [C]//Solid-State Circuits Conference(A–SSCC), 2015 IEEE Asian, 2015: 121–124.
- [14] Dyakonov M, Shur M. Detection, mixing, and frequency multiplication of terahertz radiation by two-dimensional electronic fluid [J]. *Electron Devices, IEEE*, 1996, 43 (3): 380–387.