

# 六氟五铌微测热辐射计太赫兹阵列探测芯片研究

涂学凑, 贾小氢, 康琳\*, 陈健, 吴培亨

南京大学电子科学与工程学院超导电子学研究所, 江苏 南京 210093

**摘要** 太赫兹技术在安检成像等领域具有重要的应用前景,然而当前太赫兹技术应用面临高灵敏度太赫兹探测器缺乏的困难,因此开发检测灵敏度高、响应速度快、可室温工作、便于集成超大规模阵列的探测芯片具有重要科学意义和实际应用价值。太赫兹波段的微测热辐射计(microbolometer)阵列芯片和红外相机读出电路兼容,是最先实现太赫兹相机的芯片,成为研制太赫兹相机的主流。我们研制的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 阵列器件,由于可常温工作、工艺简单、检测灵敏度高、响应速度快、便于集成超大规模阵列,受到了国际科学界和工业界的关注。就 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 太赫兹阵列探测芯片在设计制备过程中遇到的一些关键技术问题,如衬底干涉效应、高效耦合结构设计、低噪声读出电路设计、及焦平面阵列与读出电路的封装集成等,进行介绍和总结,为大规模太赫兹阵列探测芯片的设计与制备提供参考。

**关键词** 太赫兹技术; Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 微测热辐射计; 太赫兹阵列探测器; 太赫兹相机

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614003

## Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> Microbolometer Terahertz Array Detection Chips

Tu Xuecou, Jia Xiaoqing, Kang Lin\*, Chen Jian, Wu Peiheng

Research Institute of Superconductor Electronics, School of Electronic Science and Engineering,  
Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China

**Abstract** The development of large-scale terahertz (THz) array detection chips is of great significance to the promotion of related imaging and security applications. Because of the compatibility of THz microbolometer array technology with readout circuits used for infrared camera, it is the first chip to realize terahertz camera and is becoming the mainstream of THz camera. We have been devoted to the research of microbolometer array chips at room temperature. The Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer array device has attracted the attention of international academia and industry due to its simple operation, high sensitivity, fast response and easy integration of ultra-large arrays. This paper reviews and summarizes some key technical problems encountered in the design and fabrication of THz array detection chips with Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer, such as substrate interference effect, design of efficient coupling structure, design of low-noise readout circuits, and packaging and integration of readout circuits. It provides a reference for the design and fabrication of large-scale THz array detection chips.

**Key words** terahertz technology; Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer; terahertz detector arrays; terahertz camera

**OCIS codes** 040.2235; 050.2230; 040.6808

## 1 引 言

太赫兹(THz)波具有一定的穿透性,特别是能穿透衣物及普通包装材料<sup>[1-2]</sup>,因此可以清晰检测人体携带的隐藏武器装备和材料的缺陷等。THz 成像系统能够实现比微波更高的分辨率、更精确的定

位或成像,在目标侦察和识别等方面优势明显<sup>[3-4]</sup>。目前在公共场所的安检主要是 X 射线成像,其缺点是光子能量过高,长时间和多次照射对人体伤害很大。目前国际上用于人体安检的毫米波成像系统,其工作频率低、成像空间分辨率也低。其他成像系统如微波成像和红外成像系统也因分辨率低或穿透

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-05-10; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61521001,61801209,61571217)、江苏省自然科学基金(BK20160635)、江苏省电磁波先进调控技术重点实验室资助项目

\* E-mail: kanglin@nju.edu.cn

性不够等,无法满足安全检查的需要。开发大规模检测阵列芯片对推动相关成像、安检应用具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。

由于目前 THz 辐射源的功率普遍较低,因此发展高灵敏度、高信噪比的 THz 检测器尤为重要。随着 THz 技术的快速发展,THz 检测器件的性能指标也在不断提高,为微弱信号的检测和 THz 成像奠定了坚实的基础。近年来,THz 检测器的发展趋势主要有两方面:1)作为探测器核心单元的新材料的研究;2)探测器由单像元向多像元快速发展。由于在 THz 成像方面的需求,研制超大规模的阵列探测器成为各国当前研究的热点。新材料的研究方面,以石墨烯(graphene)<sup>[7-9]</sup>,黑磷(black-phosphorus)<sup>[10-11]</sup>,GaAs/(Al,Ga)As 材料体系的量子阱<sup>[12-13]</sup>等新材料制备的 THz 检测器开始引起一定的关注,相比传统的 THz 检测器,目前这些检测器灵敏度还比较低,基于热电效应的石墨烯 THz 检测器的噪声等效功率(NEP)为  $1100 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ <sup>[8]</sup>,而基于黑磷场效应管的 THz 检测器的 NEP 为  $1000 \text{ pW} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ <sup>[10]</sup>。相比新材料的研究,由于 THz 成像等实际需求,多像元的阵列 THz 检测器的研究则显得更加重要。目前,多像元的 THz 阵列检测器主要有:1)基于各种材料的微测热辐射计(microbolometer)的阵列芯片;2)基于场效应管的多像元 THz 检测器阵列;3)基于肖特基二极管(SBD)的多像元 THz 检测器阵列;4)基于量子阱(QW)的多像元 THz 检测器阵列。近年来,常温 microbolometer,由于制作工艺简单、容易与读出电路集成形成大规模阵列,同时又具有较宽的频率探测范围和较高的灵敏度,受到越来越多的关注。美国麻省理工学院(MIT)胡青研究组将  $\text{VO}_x$  阵列检测器芯片,用于 THz 信号成像的研究中<sup>[14]</sup>,报道的器件的 NEP 约  $3.2 \times 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。法国 Simoens 研究组<sup>[15-16]</sup>利用 Amorphous-Silicon 也研制出  $240 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$  的阵列器件,并用于 THz 级联激光器的成像。由于 THz 波段的 microbolometer 阵列工艺和红外相机兼容,是最先实现 THz 相机的芯片,也是目前研制 THz 相机的主流。在国内,南京大学 THz 探测器研究小组<sup>[17-37]</sup>近年来也致力于研制基于  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 的 THz 阵列芯片。 $\text{Nb}_5\text{N}_6$  Microbolometer 阵列探测芯片中单个像元的直流响应率为  $730 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ ,在调制频率为 4 kHz 时, $\text{Nb}_5\text{N}_6$  Microbolometer 的直流 NEP 可达  $1.3 \times 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。光学电压响应

率可以达到  $480 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$ (在 0.28 THz,调制频率为 4 kHz),对应的 NEP 为  $1.7 \times 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ (考虑器件的有效接收面积)。器件的响应时间可以到  $10 \mu\text{s}$  量级,远少于一般的热检测器。 $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 阵列检测器噪声低、灵敏度高、响应速度快、制作工艺简单、便于集成超大规模阵列,在 THz 相机、THz 实时成像、THz 及红外波段的高灵敏功率计等应用方面将具有广阔的应用前景。

本文从芯片衬底干涉效应、高效耦合结构设计、低噪声读出电路设计、阵列芯片与读出电路封装集成、宽波段探测等方面概括介绍了  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer THz 阵列探测芯片研究工作,这些参数是所有其他类型的 THz 探测器阵列芯片设计与制备过程中遇到的且必须解决的共性科学和技术问题。

## 2 $\text{Nb}_5\text{N}_6$ microbolometer THz 阵列探测芯片

### 2.1 $\text{Nb}_5\text{N}_6$ microbolometer THz 检测器简介

$\text{Nb}_5\text{N}_6$  薄膜在常温下对 THz 信号具有较好的吸收,同时又具有较高的电阻温度系数( $-7 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ),非常适用于 THz 信号的检测。基于  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 的常温 THz 检测器<sup>[31-37]</sup>的核心单元是  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  薄膜微桥结构,通过平面天线耦合接收 THz 信号,使  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  薄膜发生热效应,温度升高,从而改变  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  薄膜电阻值,通过施加恒流偏置,便可产生一个变化的电压,该变化电压的大小反映了入射 THz 辐射功率的大小,从而达到探测 THz 信号的目的。

### 2.2 衬底干涉效应在阵列器件结构设计中的应用

使用光学薄膜制备谐振腔,是光波段制备高耦合效率检测器的常用方法。介质谐振腔因其能提高器件在特定波长的灵敏度,在光学波段和微波波段被广泛研究并使用。如布拉格反射镜(DBR)结构、防反射层和微波波段的介质波段等,其基本理论都源于介质谐振腔的干涉效应<sup>[38-42]</sup>。这种干涉效应在 THz 芯片中表现得异常显著,因为 THz 波长( $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ )与芯片的衬底厚度相当,如果衬底选取不当,会严重影响器件性能。但是在 THz 波段,由于波长较长,很难通过制备多层薄膜的常规手段制备谐振腔。由于入射 THz 辐射的波长与 THz 检测器的衬底厚度相当甚至更长,因此在衬底上下表面会发生非常明显的 THz 波干涉效应,这种衬底腔干涉效应对信号的耦合会造成较大影响<sup>[43-48]</sup>。在

焦平面阵列器件封装集成中,这种干涉效应是一把双刃剑:封装部件厚度选取不当,将会导致探测器像元处的电场干涉相消,从而降低像元灵敏度;同时也可以利用这种干涉效应,使像元处的电场干涉加强。干涉相消还是增强取决于衬底厚度,正因为研究者注意到 THz 波段中芯片的衬底效应,2016 年德国科学家开始研究这种衬底厚度对器件性能的影响,其利用平面波导理论解释了这种衬底效应,但是缺乏有力的实验数据证明<sup>[43-44]</sup>。2017 年新加坡科学家利用衬底效应提高了场效应管的光学电压响应率<sup>[45]</sup>。本课题组在测量 THz 检测器性能时很早就

注意到这种衬底效应,为深入研究这种衬底效应,使用简单的基于法布里-珀罗(F-P)腔干涉理论,来分析衬底厚度对 THz 阵列探测芯片的影响,通过仿真计算探测器位置处在不同衬底厚度( $L$ )条件下的电场大小( $E$ ),同时通过制备不同衬底厚度的 F-P 腔  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 器件,测量器件的 THz 响应,得到不同衬底厚度下器件电压响应的关系,如图 1 所示<sup>[30]</sup>。此外,还可以固定入射频率,来测量不同衬底腔器件的响应电压<sup>[30]</sup>。虽然这里讨论的是  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer,但测量与计算的结论对其他探测器同样适用。

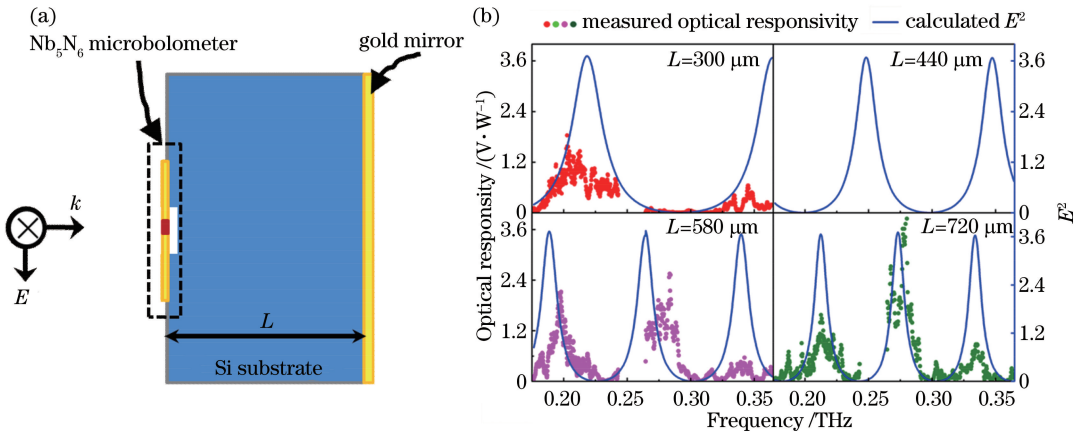


图 1 衬底厚度对器件电压响应的影响。(a)具备衬底的  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 示意图;(b)不同衬底厚度检测器电压响应频谱。

点表示器件的相对电压响应率,实线为在器件位置处的电场强度平方的仿真结果。衬底腔长  $L = 300, 440, 580, 720 \mu\text{m}$ <sup>[30]</sup>

Fig. 1 Effect of substrate interference on voltage response of detectors. (a) Schematic of  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer with substrate cavity; (b) voltage response of the  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer THz detector with frequency when the substrate cavity length is fixed. Dots represent relative voltage responses of the device while lines represent the simulation results of the square of electric field intensity at the device location with substrate thickness of  $L = 300, 440, 580, \text{ and } 720 \mu\text{m}$ <sup>[30]</sup>

此外,利用这种衬底干涉效应,通过在芯片背面使用一移动反射镜,就可以实现不同谐振频率的 THz 探测器,如图 2(a)所示,这在 THz 阵列芯片的封装集成中将有广泛的应用。因为通过改变反射镜的移动距离,总能使器件所处的电场强度最大,而不需要预先知道衬底的厚度,这为设计集成谐振腔器件带来了极大的方便。图 2(b)显示了在不同移动距离( $d$ )下,谐振腔中器件位置处的电场强度( $E_{\text{THz}}$ )与入射信号频率的关系,不同腔长的器件谐振频率的位置不一样,随着腔长的增大,电场强度最大值向低频移动,即红移。当腔长移动的距离( $\Delta L_{\text{gap}}$ )从  $500 \mu\text{m}$  增大到  $800 \mu\text{m}$  时,谐振频率从  $0.34 \text{ THz}$  减小到  $0.32 \text{ THz}$ ,谐振频率移动约  $20 \text{ GHz}$ 。因此,可以通过移动背面反射镜来改变谐振腔长,从而来实现频率可调的 THz 检测

器件。

### 2.3 几种 THz 波段的高效耦合结构

在 THz 波段,由于阵列器件像元尺寸远远小于入射光束的尺寸,信号的耦合效率非常低。如何提高 THz 器件对入射信号的耦合效率,是 THz 科学研究中的一个热点问题。对于单像元器件,提高器件的光学耦合效率主要有两种方法。第一种可以使用喇叭天线<sup>[49-50]</sup>,但工作在 THz 波段的喇叭天线成本高,不易制作大规模阵列。还有一种方法是使用准光耦合<sup>[51-54]</sup>,将器件粘贴在延展半球透镜表面,这种结构能有效消除表面波,同时具有汇聚能量的作用。针对单像元和阵列成像芯片器件,将光学波段成熟的理论与技术,运用到 THz 探测器耦合结构中,如延展半球硅透镜、衍射微透镜、光学谐振腔、光栅谐振腔复合结构等。

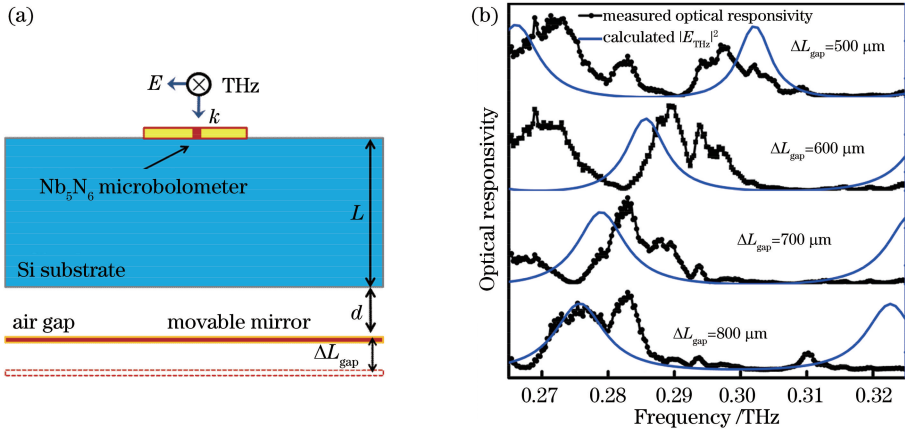


图 2 谐振频率可调的太赫兹探测器。(a)结构示意图;(b)太赫兹探测器随着反射镜移动实现谐振频率可调的实验结果<sup>[31]</sup>  
 Fig. 2 THz detector with tunable resonance frequency. (a) Schematic of the cavity setup; (b) continuous tuning of the microbolometer detector via different air gaps<sup>[31]</sup>

通常来讲,入射到透镜焦平面的光斑大小要大于器件天线的物理尺寸。为了增加  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 器件的有效接收面积,提出使用串联天线结构来提高器件的信号耦合效率,如图 3 所示,从而提高器件的信噪比。SEM 为电子显微镜

图。这样的串联结构器件可以看成是一个检测单元,这种串联器件和延展半球透镜一起构成准光接收机,具有较高的光学电压响应率,适合单个器件的 THz 成像。同时基于这种串联结构的器件做成大规模阵列也很实用。

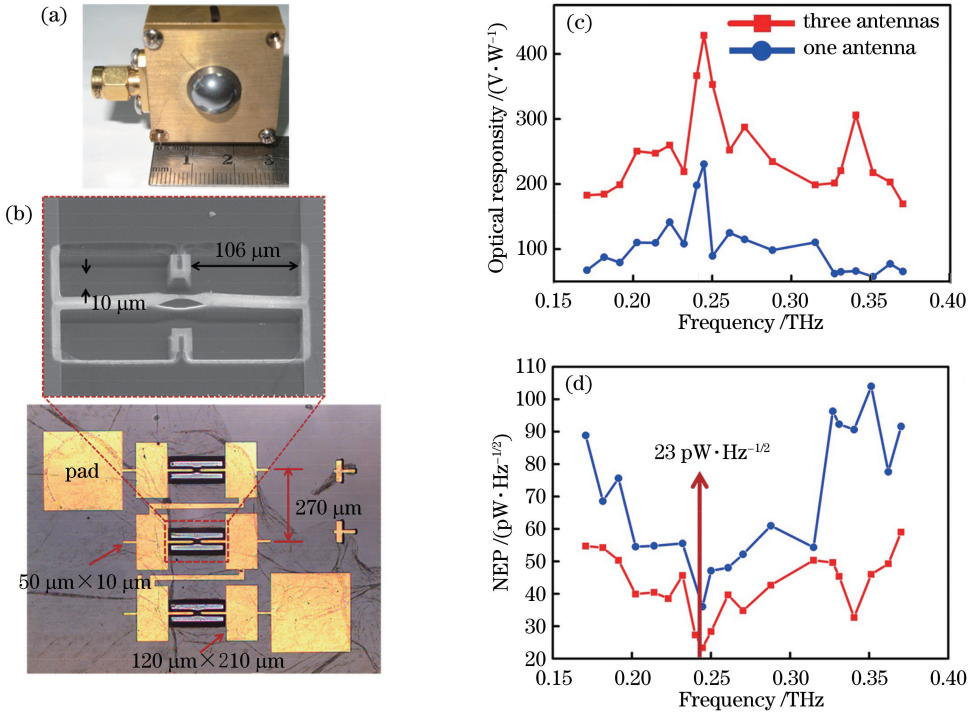


图 3 串联结构的  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 准光接收机。(a)集成超半球硅透镜接收机封装;(b) 3 个  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer 串联器件的光学图片,插图为  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  微桥 SEM 图;(c)光学电压响应率;(d)噪声等效功率<sup>[32]</sup>

Fig. 3  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer quasi-optical receiver with series structure. (a) Package of the quasi-optical detector, with the microbolometer chip glued to the back side of the silicon lens; (b)  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbridge consisting of three microbridges, three connected resonant dipole antennas, and pads. The inset top picture shows SEM micrograph of the  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbridge; (c) optical responsivity; (d) corresponding noise equivalent power<sup>[32]</sup>

介质透镜能消除表面波,能把信号有效地耦合到检测器上,在毫米波与红外检测和成像中得到了广泛的应用。然而,在 THz 波段,介质透镜的反射和吸收损耗比较大,同时也不容易制作大规模阵列。此外,安装在介质透镜后面的检测器必须与透镜紧密贴合在一起,才能得到衍射极限分辨率。这些缺点限制了介质透镜的应用。一种解决方法是 Neikirk 等<sup>[55]</sup>提出的采用超半球小透镜阵列,使每个透镜都有一个天线和检测器。然而这种超半球小透镜一般使用机械加工的方法,不容易制作成大规

模阵列。为解决上述困难,本课题组提出使用衍射微透镜<sup>[56-57]</sup>来制备阵列器件,同时也提高了器件的耦合效率。这种衍射透镜的制作工艺与微加工工艺兼容。制作这种衍射微透镜阵列非常简单,只需要采用常规的深硅刻蚀工艺。设计并制作了 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 阵列,使得每个像素器件都集成有衍射透镜,如图 4 所示。通过测量集成衍射透镜和无衍射透镜器件的光学电压响应,发现集成衍射透镜的电压响应提高了 16 倍,得到单个器件的 NEP 为  $1.0 \times 10^{-10} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ,已经达到商业器件的灵敏度。

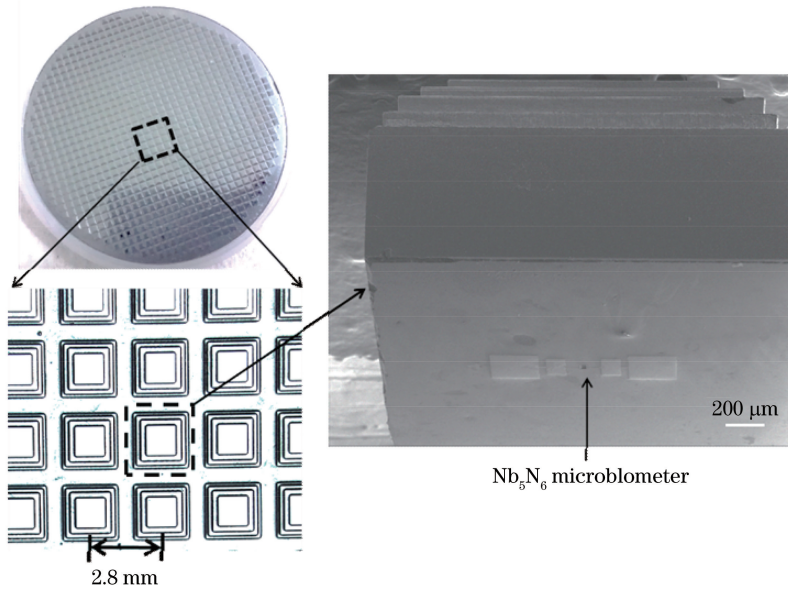


图 4 集成 5 台阶的方形衍射硅材料的微透镜 microbolometer 阵列以及微透镜后面中间的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer SEM 图<sup>[33]</sup>

Fig. 4 Optical microscope picture of fabricated five-staircase square silicon microlens array chip and SEM micrograph of an Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer fabricated at the back center of the microlens<sup>[33]</sup>

通过使用阶梯光栅和衬底谐振腔的双重场增强效应,来提高器件的光学电压响应率,制备的器件及结构如图 5 所示。为便于比较,制备反射阶梯光栅复合结构与 F-P 谐振腔结构的器件。同时对两种不同结构的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 阵列检测器的电压响应率进行实验测试,并分别与这两种结构下的仿真结果进行比较。光栅的反射与衍射的共同作用,使得反射光栅结构器件的带宽小于 F-P 腔结构的器件,但器件的最大电压响应率得到明显提高。在实际测量过程中,透射进入硅衬底的 THz 信号受到器件的影响,减弱了反射光栅结构的耦合性能,导致实际器件所增加的电压响应率小于仿真值。这种结构虽然在特定频段能提高器件的光学电压响应率,相比于 F-P 谐振腔器件光学电压响应率提高了 2 倍,并且谐振频率可以通过设计光栅尺寸来调整,但是仍有一定的局限性,如探测带宽窄、加工工艺较复杂、需要用

到双面套刻曝光技术。

## 2.4 低噪声读出电路的研究

低噪声读出电路在很多高灵敏检测器的应用中必不可少,THz 探测器输出的信号都十分微弱,需要利用低噪声的读出电路将信号读出并放大,其噪声不能影响信号的读出。本课题组制备的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜常温探测由于灵敏度高、容易集成,有望发展成性能优越的 THz 阵列检测器。然而在实际应用中,缺少相应的低噪声放大读出电路。为此,采用  $0.18 \mu\text{m}$  互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺,为  $1 \times 64$  Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 开发了  $1 \times 16$  低噪声读出集成电路 (ROIC)。该电路由一个数字可编程电流数模转换器 (IDAC) 和一个放大器模块组成,分别负责给 microbolometer 提供偏置并在低噪声的前提下放大其输出信号。测试结果表明,ROIC 在 10 kHz 处达到约 48 dB 的平均增益,电压噪声谱密

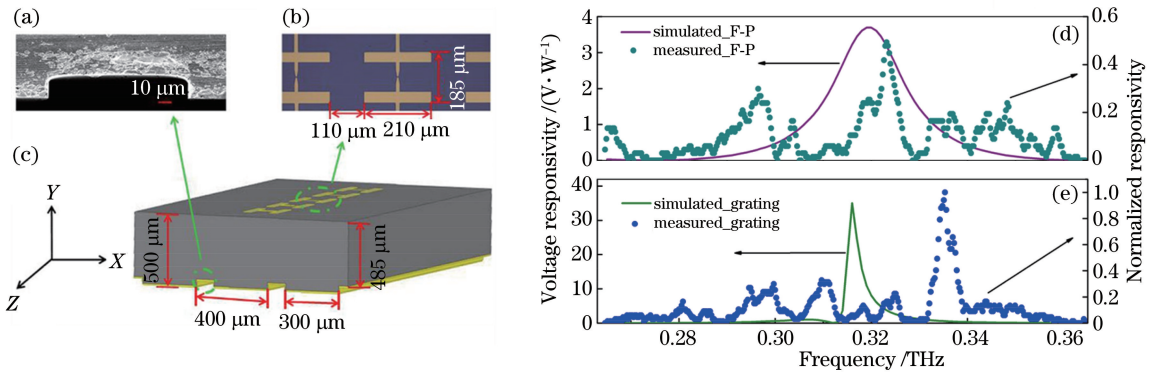


图 5 光栅复合结构耦合的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜 THz 检测器。(a)硅阶梯光栅 SEM 图;(b)Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> THz 阵列器件 SEM 图;(c)器件结构示意图;(d)集成 F-P 谐振腔器件的归一化光学电压响应率;(e)集成阶梯光栅复合结构器件的归一化光学电压响应率<sup>[34]</sup>  
 Fig. 5 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer THz detector with a grating-coupled structure. (a) A cross-section SEM picture of the grating groove; (b) SEM image of Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> THz array detectors; (c) schematic of the reflective grating-coupled structure; (d) normalized voltage responsivity of the detector with the F-P cavity; (e) normalized voltage responsivity of the detector with the reflective grating-coupled structure<sup>[34]</sup>

度约为  $9.34 \text{ nV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , 带宽为  $1 \sim 100 \text{ kHz}$ , 最小可读出  $10 \mu\text{V}$  的信号, 通道间归一化的串扰值仅有  $0.0046$ , 通道间的 NEP 变异系数 (CV) 仅为  $0.059$ , 展现了良好的一致性。以上参数表明该 ROIC 满足 THz 阵列检测器的要求。与 ROIC 互连,  $1 \times 64$

Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 阵列检测器初步用于 THz 成像应用。成像结果证明 ROIC 可以与探测器一起使用, 以开发高效且低成本的 THz 成像系统。图 6 为读出电路芯片结构。

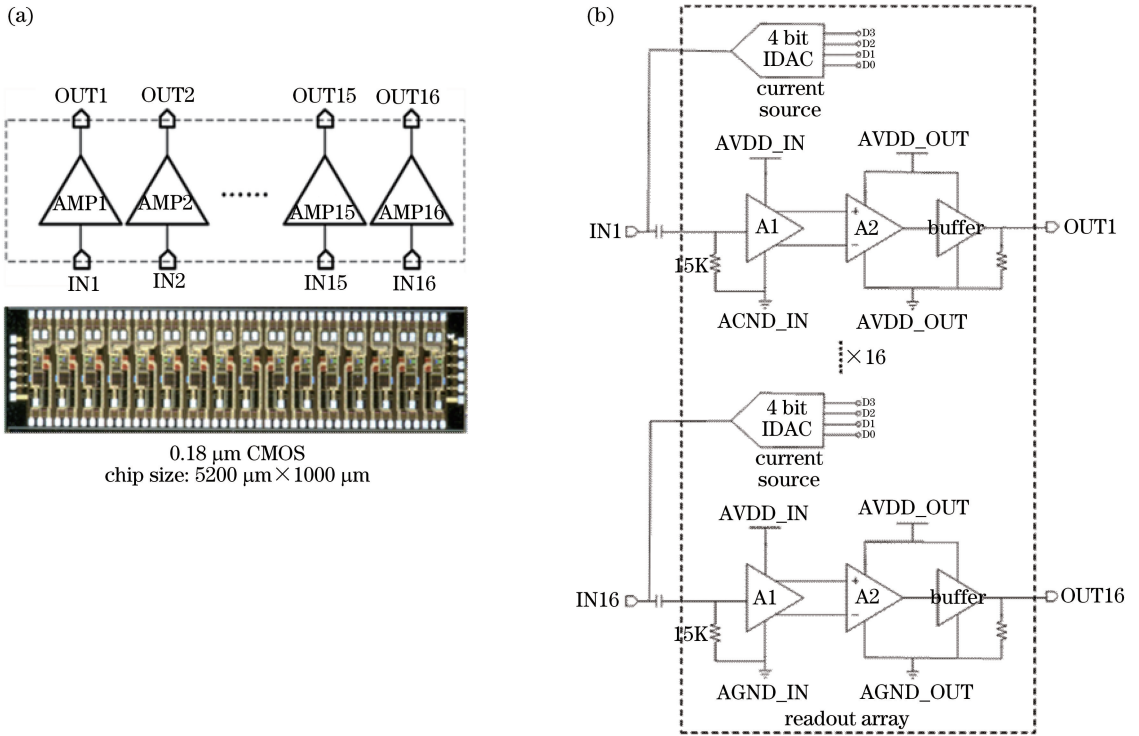


图 6 读出电路芯片结构。(a) $1 \times 16$  读出电路 (ROIC) 芯片光学照片;(b)ROIC 阵列框图<sup>[35]</sup>

Fig. 6 Chip structure of readout circuit. (a) Chip microphotograph of the  $1 \times 16$  ROIC chip; (b) array ROIC diagram<sup>[35]</sup>

在增益方面, 通过测量 ROIC 的带宽来反映增益的性能情况。ROIC 一共有两级电源电压, 都为  $1.8 \text{ V}$ , 也就是说印刷电路板 (PCB) 上两个 2 引脚的

排针上都应接  $1.8 \text{ V}$  的电压源。测得该 ROIC 的功耗约为  $60 \text{ mW}$ 。因为表征的是 ROIC 的性能, 所以输入端暂且用信号发生器输入信号, 用动态信号分

析仪 35670A(Agilent)测量输出的电压信号,动态信号分析仪的单位调成电压档。

在该通道输入不同频率的信号时,测得输出信号与输入信号的比值即为该通道的增益,测量的结果表明,增益在 48 dB 左右,3 dB 下截止频率为 1 kHz,上截止频率约为 100 kHz,故 3 dB 带宽为 1~100 kHz。结果表明抽取的 6 个通道的结果具有良好的一致性。用动态信号分析仪 35670A(Agilent)测量输出端的噪声。同样,在每片芯片上都抽取 6 个通道,分别在输入端短路时和输入端连接 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 时测输出端的电压噪声谱密度。输入端连接 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 时,测得的探测芯片电压噪声谱密度,计算得到各个通道的输入电压谱密度在 10 kHz 时都在 13 nV·Hz<sup>-1/2</sup>左右。

### 2.5 焦平面探测器阵列芯片与读出电路的封装集成

对于焦平面大规模阵列器件,除探测器阵列芯

片和读出电路设计制备技术以外,还有一个很重要的关键技术是阵列芯片与读出电路的封装集成。在 THz 波段像元尺寸比较大(200 μm 以上),在阵列芯片与读出电路的封装集成一体化设计上没有成熟的加工工艺。需要借助先进的微加工技术和快速发展的晶圆键合技术、SCP (Stacking-Chips Packaging)、TSV (Through-Silicon-Via)、SIP (System in a Package)和再布线等多芯片封装技术,发展自己的工艺技术,研制、发展大面积、大阵列 THz 探测器件。课题组通过优化设计,摸索出了一套适合 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 阵列芯片与硅 wafer 倒装互连的方法,倒装集成步骤如图 7 所示。主要包含在阵列芯片和硅片上同时生长凸点下金属层(UBM),生长钢层,回流形成焊点,最后对准键合倒装在一起。阵列芯片倒装过程中的照片如图 8 所示。

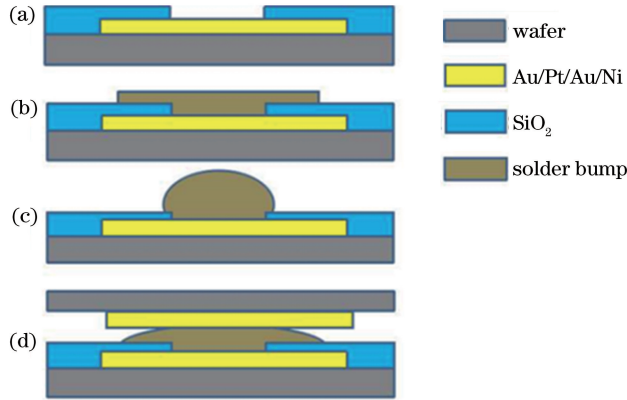


图 7 阵列芯片倒装示意图<sup>[36]</sup>。(a)光刻、生长 UBM 和 SiO<sub>2</sub>; (b)光刻、生长钢层; (c)回流形成钢焊点; (d)对准、倒装焊连接集成

Fig. 7 Schematic of fabrication process of flip-chip technology. (a) UBM and SiO<sub>2</sub> layers deposition; (b) solder bumps evaporation; (c) solder bumps refluxing; (d) detector and rewiring chip bonding<sup>[36]</sup>

### 2.6 近红外光探测

在实际应用中,为提高探测器耦合效率,一般会通过调节天线尺寸和芯片衬底厚度等参数来针对某波段进行器件结构优化设计,这样的器件常具有工作频率,并不能实现宽波段探测。为实现并证明 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜的宽光谱探测,设计了红外波段的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer THz 检测器。此外,近红外波段因其特殊的性质,具有广阔的应用前景,如大气激光通信、化学烟雾安全监测等,引起了各国对红外探测的大量投入。本课题组提出使用 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 来探测近红外探测(实验使用波长为 2 μm)。结合大面积悬空挖桥技术,将 30 μm 宽、50 μm 长的 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> 薄膜悬空起来,极大地减少热导至 1.8×10<sup>-6</sup> W·K<sup>-1</sup>,制备的器件如图 9 所示。为研究挖桥工艺对器件性能的影响,制备

了 2 种相同尺寸的悬空和非悬空器件。发现悬空器件的热导是非悬空器件的 1/40,这是悬空 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer 灵敏度高的主要原因。这种探测器有望制备成性能优越的焦平面阵列芯片,用于近红外探测。

## 3 结束语

性能稳定、灵敏度高且集成读出电路的焦平面阵列芯片是 THz 安检成像的核心部件。本文详细介绍了 Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer THz 检测器阵列芯片中的衬底干涉效应,高效耦合结构,与读出电路封装集成,以及宽波段探测等研究进展。下一步将在阵列芯片与读出电路封装、简便型 THz 相机和使用新型高效耦合结构提高像元灵敏度等方面来推进大规模焦平面阵列芯片的研究。

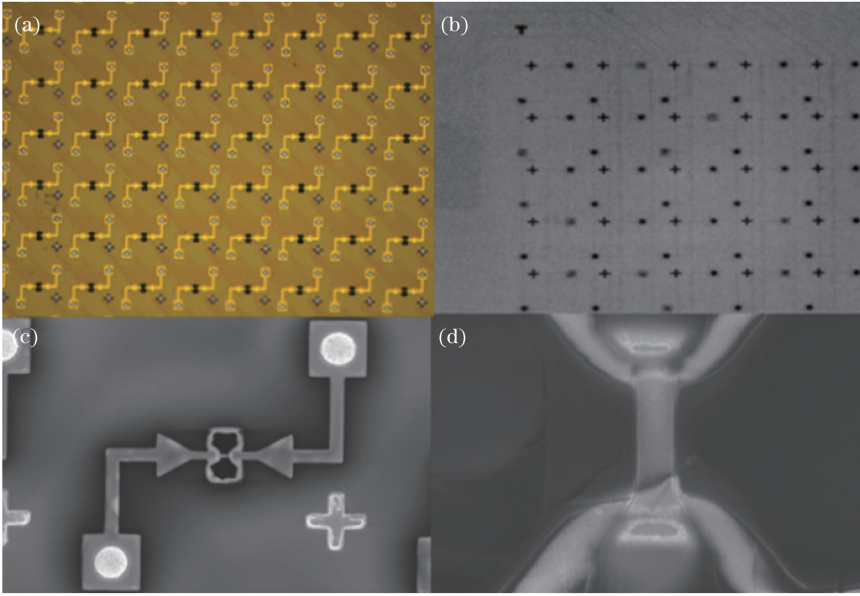


图 8 阵列芯片封装。(a)光学照片;(b) X射线成像照片;(c)倒装焊像元的 SEM 图;(d)空气微桥的 SEM 图<sup>[36]</sup>  
 Fig. 8 Array chip package diagrams. (a) Microscope image; (b) X-ray image;  
 (c) SEM image of detector after flip-chip; (d) SEM image of a microbolometer with an air bridge<sup>[36]</sup>

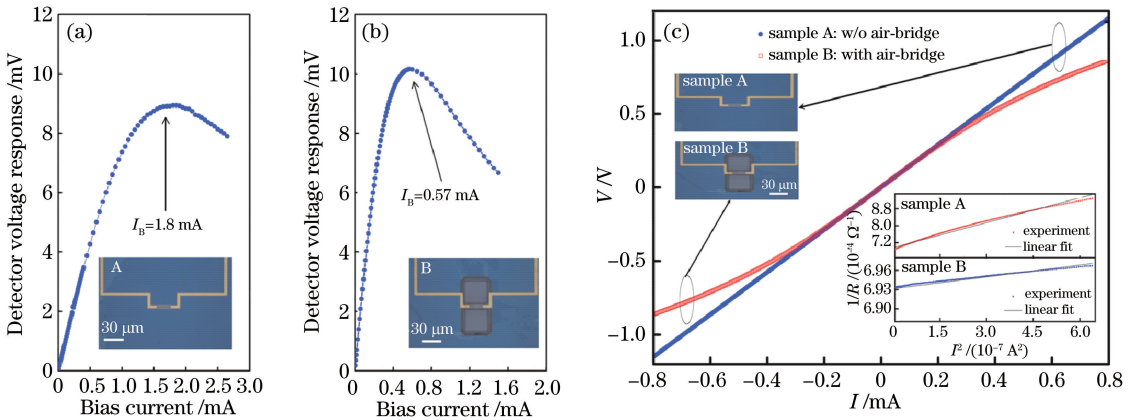


图 9 器件光响应及电学性能比较。(a)实验测量得到的不挖空气桥器件(A)在  $2\ \mu\text{m}$  辐照下响应电压与偏置电流( $I$ )的关系;(b)挖空气桥桥器件(B)在  $2\ \mu\text{m}$  辐照下响应电压与偏置电流的关系;(c)不挖空气桥和挖空气桥器件电学性能比较,插图是器件电阻的倒数( $1/R$ )和  $I^2$  的关系<sup>[37]</sup>

Fig. 9 Comparison of optical response and electrical performance of devices. (a) Optical voltage responses under a  $2\text{-}\mu\text{m}$  irradiation as a function of the bias current for samples A; (b) optical voltage responses under a  $2\text{-}\mu\text{m}$  irradiation as a function of the bias current for sample B; (c)  $I$ - $V$  curves of the detectors measured at room temperature. The insets show the inverse of the microbolometers' resistances ( $1/R$ ) as a function of  $I^2$ <sup>[37]</sup>

参 考 文 献

[1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.  
 [2] Bjarnason J E, Chan T L J, Lee A W M, et al. Millimeter-wave, terahertz, and mid-infrared transmission through common clothing [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(4): 519-521.

[3] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.  
 [4] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.  
 [5] Cooper K B, Dengler R J, Llombart N, et al. Penetrating 3-D imaging at 4- and 25-m range using a submillimeter-wave radar [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(12): 2771-2778.



- [6] Koenig S, Lopez-Diaz D, Antes J, *et al.* Wireless sub-THz communication system with high data rate [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 977-981.
- [7] Tong J Y, Muthee M, Chen S Y, *et al.* Antenna enhanced graphene THz emitter and detector [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(8): 5295-5301.
- [8] Cai X H, Sushkov A B, Suess R J, *et al.* Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(10): 814-819.
- [9] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, *et al.* Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors [J]. *Nature Materials*, 2012, 11(10): 865-871.
- [10] Viti L, Hu J, Coquillat D, *et al.* Efficient terahertz detection in black-phosphorus nano-transistors with selective and controllable plasma-wave, bolometric and thermoelectric response [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20474.
- [11] Viti L, Hu J, Coquillat D, *et al.* Black phosphorus terahertz photodetectors [J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(37): 5567-5572.
- [12] Guo X G, Zhang R, Cao J C, *et al.* Numerical study on metal cavity couplers for terahertz quantum-well photodetectors [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(5): 728-733.
- [13] Gu L L, Guo X G, Fu Z L, *et al.* Optical-phonon-mediated photocurrent in terahertz quantum-well photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(11): 111107.
- [14] Lee A W M, Wil B S, Kumar S, *et al.* Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a  $320 \times 240$  microbolometer focal-plane array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(13): 1415-1417.
- [15] Simoens F, Durand T, Meilhan J, *et al.* Terahertz imaging with a quantum cascade laser and amorphous-silicon microbolometer array [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7485: 74850M.
- [16] Pocas S, Deronzier E, Brianceau P, *et al.* Technological customization of uncooled amorphous silicon microbolometer for THz real time imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8624: 862419.
- [17] Tu X C, Xiao P, Jiang C T, *et al.* A tunable optical cavity for enhancement of  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer THz detector absorption [C] // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 9-14, 2018, Nagoya. New York: IEEE, 2018: 8510411.
- [18] Jiang C T, Tu X C, Xiao P, *et al.* The design of a bowtie antenna for 0.65 THz detection [C] // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 9-14, 2018, Nagoya. New York: IEEE, 2018: 8510256.
- [19] Jiang C T, Tu X C, Xiao P, *et al.* The design of  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer detector for 0.3 THz detector [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10531: 1053123.
- [20] Xiao P, Tu X C, Jiang C T, *et al.* The effect of metal reflector on responsivity of  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  THz detector [C] // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 9-14, 2018, Nagoya. New York: IEEE, 2018: 8510249.
- [21] Tu X C, Pei Y F, Xiao P, *et al.* Characterizations of diffractive microlens in  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometers array for THz detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9747: 97470G.
- [22] Tu X C, Xiao P, Jiang C T, *et al.* Influence of substrate thickness on the responsivity of antenna-coupled THz microbolometers [C] // 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), September 25-30, 2016, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE, 2016: 7758956.
- [23] Tu X C, Wan C, Xiao P, *et al.*  $1 \times 64$   $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer array detector for real time THz imaging [C] // 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), September 25-30, 2016, Copenhagen, Denmark. New York: IEEE, 2016: 7758963.
- [24] Tu X C, Mao Q K, Xu L, *et al.*  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometers integrated with diffractive lens for THz imaging [C] // 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 1-6, 2013, Mainz, Germany. New York: IEEE, 2013: 6665837.
- [25] Tu X C, Mao Q K, Wan C, *et al.*  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometer array for a compact THz imaging system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8985: 89850V.
- [26] Mao Q K, Tu X C, Xu L, *et al.* Effective receiving area of the antenna-coupled terahertz detector [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(2): 023103.
- [27] Tu X C, Mao Q K, Xu L, *et al.* Antenna-coupled uncooled  $\text{Nb}_5\text{N}_6$  microbolometers for terahertz imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8716: 871605.
- [28] Tu X C, Kang L, Liu X H, *et al.* Antenna-coupled microbolometer array for terahertz detection [C] //

- 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, September 23-28, 2012, Wollongong, NSW, Australia. New York: IEEE, 2012: 6380449.
- [29] Tu X C, Kang L, Liu X H, *et al.* Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer arrays for terahertz detection [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(4): 040701.
- [30] Tu X C, Jiang C T, Xiao P, *et al.* Investigation of antenna-coupled Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer THz detector with substrate resonant cavity [J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8990-8997.
- [31] Tu X C, Jiang C T, Xiao P, *et al.* Fabry-Pérot cavity-coupled microbolometer terahertz detector with a continuously tunable air spacer gap [J]. Optics Letters, 2019, 44(4): 1019-1022.
- [32] Tu X C, Xu L, Mao Q K, *et al.* Quasioptical terahertz detector based on the series connection of Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometers [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2014, 8(1): 084992.
- [33] Tu X C, Kang L, Wan C, *et al.* Diffractive microlens integrated into Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometers for THz detection [J]. Optics Express, 2015, 23(11): 13794-13803.
- [34] Xiao P, Tu X C, Kang L, *et al.* Reflective grating-coupled structure improves the detection efficiency of THz array detectors [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 8032.
- [35] Jiang Z, Men L, Wan C, *et al.* Low-noise readout integrated circuit for terahertz array detector [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018, 8(3): 350-356.
- [36] Guo X L, Jiang C T, Xiao P, *et al.* The impact of flip-chip process on Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer arrays for terahertz detection [C] // 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 9-14, 2018, Nagoya. New York: IEEE, 2018: 8509868.
- [37] Tu X C, Xiao P, Kang L, *et al.* Nb<sub>5</sub>N<sub>6</sub> microbolometer for sensitive, fast-response, 2- $\mu$ m detection [J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15585-15593.
- [38] Ünlü M S, Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices [J]. Journal of Applied Physics, 1995, 78(2): 607-639.
- [39] Wang J F, Hu J J, Becla P, *et al.* Resonant-cavity-enhanced mid-infrared photodetector on a silicon platform [J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12890-12896.
- [40] Kang G G, Vartiainen I, Bai B F, *et al.* Enhanced dual-band infrared absorption in a Fabry-Perot cavity with subwavelength metallic grating [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 770-778.
- [41] Pile B C, Taylor G W. Resonant cavity enhanced thyristor-based photodetectors for optical receivers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 52(11): 4000404.
- [42] Zhang Q, Lou M H, Li X W, *et al.* Collective non-perturbative coupling of 2D electrons with high-quality-factor terahertz cavity photons [J]. Nature Physics, 2016, 12(11): 1005-1011.
- [43] Coquillat D, Marczewski J, Kopyt P, *et al.* Improvement of terahertz field effect transistor detectors by substrate thinning and radiation losses reduction [J]. Optics Express, 2016, 24(1): 272-281.
- [44] Kopyt P, Salski B, Zagrajek P, *et al.* Modeling of silicon-based substrates of patch antennas operating in the sub-THz range [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7(4): 424-432.
- [45] Hou H W, Liu Z, Teng J H, *et al.* Enhancement of responsivity for a transistor terahertz detector by a Fabry-Pérot resonance-cavity [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(16): 162101.
- [46] Zhang B W, Yan W, Li Z F, *et al.* Analysis of substrate effect in field effect transistor terahertz detectors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(4): 8500607.
- [47] Duan G W, Schalch J, Zhao X G, *et al.* Analysis of the thickness dependence of metamaterial absorbers at terahertz frequencies [J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2242-2251.
- [48] Nguyen D T, Simoens F, Ouvrier-Buffet J L, *et al.* Broadband THz uncooled antenna-coupled microbolometer array: electromagnetic design, simulations and measurements [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(3): 299-305.
- [49] VDI[OL]. [2019-04-01]. <http://vadiodes.com/>.
- [50] Armand D, Taniguchi H, Kadoya Y, *et al.* Terahertz full horn-antenna characterization [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(14): 141115.
- [51] Schwarz S E. Efficiency of quasi-optical couplers [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1984, 5(12): 1517-1525.
- [52] Zmuidzinas J, LeDuc H G. Quasi-optical slot antenna SIS mixers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(9): 1797-1804.
- [53] van der Vorst M J M, de Maagt P J I, Herben M H A J. Effect of internal reflections on the radiation properties and input admittance of integrated lens antennas [J]. IEEE Transactions on Microwave

- Theory and Techniques, 1999, 47(9): 1696-1704.
- [54] van der Vorst M J M, de Maagt P J I, Neto A, *et al.* Effect of internal reflections on the radiation properties and input impedance of integrated lens antennas-comparison between theory and measurements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49(6): 1118-1125.
- [55] Neikirk D P, Rutledge D B, Muha M S, *et al.* Far-infrared imaging antenna-arrays[J]. Applied Physics Letters, 1982, 40(3): 203-205.
- [56] Dou W. Analysis of frequency dependence and focusing performance of diffractive lens [J]. Optics Express, 2002, 10(19): 1018-1027.
- [57] Zhang Z, Dou W. Binary diffractive small lens array for THz imaging system [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25(2/3): 177-187.