室温微测辐射热计太赫兹探测阵列技术研究进展(特邀)

王 军,蒋亚东

(电子科技大学 光电科学与工程学院 电子薄膜与集成器件国家重点实验室,四川 成都 610054)

摘 要:在室温太赫兹探测技术领域中,热敏微桥结构的太赫兹探测器具有探测波段宽、阵列规模大、集成度高、实时成像等显著特点。文中对室温太赫兹探测技术、基于热敏材料的太赫兹探测技术国内外发展现状进行了综述,分析了基于氧化钒薄膜微桥结构的非制冷长波红外焦平面探测技术,存在着太赫兹波低吸收探测性能弱的不足,针对太赫兹波探测进行优化设计,同时介绍了电子科技大学在太赫兹探测阵列吸收结构方面的部分研究工作。

关键词:非制冷红外焦平面探测器; 微桥结构; 太赫兹探测器; 金属吸收薄膜

中图分类号:TN215 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0102001

Research development about room temperature terahertz detector array technology with microbolometer structure(invited)

Wang Jun, Jiang Yadong

(Sata Key Laboratory of Electric Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: Terahertz (THz) detector with thermal sensitive microbolometer structure indicates many prominent features, such as wide band detecting region, large array pixels, high integrated device, real-time imaging, comparing with some other room-temperature THz technologies. Microbolometer structure using VO_x thin film as sensitive material has been successfully fabricated uncooled infrared focal plane array detector, but unsuitable for THz detection for very low THz wave absorption ratio. So some special design should be presented in the microbolometer structure to achieve high performance THz detector. Room-temperature THz technologies and development of microbolometer type THz detector array were introduced in this article briefly, and also the research about THz absorption material or structure in University of Electronic Science and Technology of China was presented in the paper.

Key words: uncooled infrared focal plane array detector; microbolometer structure; terahertz detector; metal absorption thin film

收稿日期:2018-08-18; **修订日期**:2018-09-17

基金项目:国家自然科学基金研究创新群体(61421002);国防预研项目(41414020903)

作者简介:王军(1982-),男,教授,博士生导师,主要从事室温太赫兹和红外探测技术方面的研究。Email:wjun@uestc.edu.cn

通讯作者:蒋亚东(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事室温光电探测与传感集成器件方面的研究。Email:jiangyd@uestc.edu.cn

0 引 言

太赫兹(terahertz:THz) 辐射相比其它电磁频段具有宽带性、低能性、穿透性、瞬态性、相干性等特点,可用于安防安检、生物医学、射电天文、高速通讯、材料化学、能源环境等诸多领域[1-2]。THz 技术在 2004 年被列为改变未来世界的十大技术之一[3],2006 年被列为美国国防重点科学,美国有多个政府机构和企业正在积极研究此项技术,包括 NASA、DARPA、NSF、JPL、Bell、IBM 等。欧盟多国共同组织了 Teravision、THz-Bridge、STARTIGER 等大型合作研究项目,主要研究 THz 辐射成像、分子生物学、THz 空间天文学、THz 遥感等相关内容。日本 2005 年将太赫兹科技列为“国家支柱技术十大重点战略目标”之首[4],积极开展太赫兹成像等相关研究。

2002 年,基于 GaAs/AlGaAs 半导体异质结的太赫兹波段量子级联激光器研究获得突破,实现 50 K 工作温度下近 2 mW 的 4.4 THz 辐射功率输出[5]。近十余年来超快激光技术和半导体材料科技的迅速发展,为 THz 脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源[6],促进了 THz 科技的蓬勃发展与应用研究。但目前太赫兹探测技术还有待提升,太赫兹技术对推进科技进步与提升国防安全具有重要意义,其发展和应用都迫切需求高性能太赫兹探测技术。

1 室温太赫兹探测技术研究现状

制冷型太赫兹探测技术虽然具有较高探测性能,但存在低温制冷系统复杂、体积庞大等限制,因此太赫兹探测领域的研究主要集中于室温工作的太赫兹探测技术研究[7]。室温太赫兹探测技术包括外差法和直接探测两种探测方式[8]。外差法探测可以获得太赫兹波的相位信息,但探测过程需要采用复杂的光学系统、本机振荡器及差频混频器,对待测物体进行逐点探测,成像速度较慢[9]。直接探测方式虽不能获得相位信息,但探测系统简单,直接由探测器获得太赫兹辐射的能量信息。直接探测方式的室温太赫兹探测技术主要包括场效应管(FET)、肖特基二极管(SBD)、微测辐射热计(microbolometer)、热释电探测、热电子辐射热计、超晶格材料、热偶材料、高莱池等多种技术。

场效应管太赫兹探测技术可以采用石墨烯 FET[10]、碳纳米管 FET[11]、Si CMOS FET[12]、HEMT[13]等,FET 探测多数需制作纳米量级的探测沟道图形,探测频率集中在低频太赫兹波段(<1 THz),器件噪声等效功率(Noise Equivalent Power,NEP)在~10^{-10} W/Hz$^{1/2}$,目前有 32×32 阵列、80 μm 探测单元间距的探测成像芯片报道[14]。SBD 探测技术相对探测精度较高(NEP~10^{-12} W/Hz$^{1/2}$),工作频段处于低频太赫兹波段,且阵列规模小,目前有 16 像素的 SBD 阵列成像(280 GHz 和 860 GHz)报道[15]。热电子辐射热计需要集成面积较大的收集天线[16],采用超晶格材料[17]及热偶材料[18]进行太赫兹探测处于研究的探索阶段。高莱池太赫兹探测技术相对成熟,但限于单点探测和易受到环境震动影响。前述技术在探测阵列规模、探测波段方面有显著的局限。

在阵列探测方面,Pradere 等在 2016 年报道了一种太赫兹辐射到红外光热转换的太赫兹探测技术[19],采用红外相机对转换后的红外辐射进行成像,NEP 为 160 pW/Hz$^{1/2}$,探测波段主要是亚太赫兹波段。Cumming 等在 2016 年报道了超材料结合硅基 CMOS 二极管的太赫兹探测器阵列[20],探测器像元尺寸 30 μm,阵列规模为 50×50,经测试器件 NEP 参数最小为 10.4 nW/Hz$^{1/2}$,热时间常数为 420 ms。北京大学 Yongzheng Wen 等人在 2017 年报道了基于光机械驱动 meta-molecule 阵列的太赫兹探测器[21],每个悬臂梁支撑的桥面上做好太赫兹吸收阵列结构,受到太赫兹辐射后,悬臂梁产生弯曲,结合 LED 光源和 CCD 相机探测悬臂梁变化,进而反应出太赫兹辐射强度信息,该方法可实现 20 Hz 的 128×128 阵列成像,器件 NEP 参数为 2.9 nW/Hz$^{1/2}$。目前已经商用的太赫兹探测阵列为基于热释电材料的太赫兹探测器,但热释电探测器制备基于热释电晶体材料,无法与硅基 CMOS 电路一体化集成,并且为保障探测性能必须采用厚度微米量级的晶体材料,器件的 NEP(~10^{-9} W/Hz$^{1/2}$)性能参数偏低,因此在集成性、探测性能及响应速度方面相对较差。热敏材料主要采用氧化钒、非晶硅、金属、超导材料等,当前研究现状表明可实现室温工作、宽频探测、实时成像、阵列集成、小型化的太赫兹探测方式主要为基于氧化钒和非晶硅的热敏微测辐射热计(microbolometer)阵列技

术[22]。不同室温太赫兹探测技术的主要性能参数情况参考对比表 1 所示[23]。

表 1 不同室温太赫兹探测器的主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of different room temperature terahertz detectors

Detector	Modulation frequency or response time	Detection frequency/THz	NEP/WHz$^{1/2}$	Array size
Golaycell	f≤20 Hz	20	~10^{-9}	Single point
Micro-array Golay cell	f≤30 Hz	0.105	3×10^{-7}	–
Pyroelectric, $LiTiO_3$	t>0.1 s	0.2-30	~4×10^{-10}	–
Pyroelectric	<30 Hz	3	>3×10^{-9}	–
LT pyroelectric	–	2.52	1.5×10^{-9}	30
VO_x microbolometer	30 Hz	1.5-100	~$(2-3)\times10^{-11}$	320×240
VO_x microbolometer	–	2.52	4.57×10^{-11}	320×240
α-Si microbolometer	t~20-40 ms	2.5	3×10^{-11}	320×240
Ni microbolometer	30 Hz	0.094	1.9×10^{-11}	–
Ti microbolometer	t<1 μs	0.2-2.1	1.4×10^{-11}	2×16
Bi microbolometer	t~2×10^{-7} s	0.215	$D^*=4\times10^8$ Jones	400
Nb_5N_6 microbolometer	4×10^3 Hz	0.22-0.33	1.3×10^{-11}	5×6
YBCO microbolometer	10^5 Hz	0.1-2	5×10^{-11}	–
Thermocouple	~15 Hz	2.8	0.49×10^{-9}	32×32

2 基于微测辐射热计结构的太赫兹探测阵列技术研究现状

2005 年 MIT 首次采用非制冷红外氧化钒焦平面探测器实现了连续波 THz 透射成像，其采用购置的 BAE Systems 公司 160×120 非制冷红外焦平面相机和 2.52 THz 气体激光器[22]。2007 年，Aseev 采用 90 帧频 160×120 阵列进行了成像实验[24]。2011 年 Coppinger 对微测辐射热计的太赫兹波成像性能进行了测试[25]。这些实验直接采用商用的非制冷红外探测阵列开展的成像工作，由于固有微桥材料和结构对 10 μm 红外辐射吸收~90%，但是对太赫兹吸收较低，因此太赫兹探测性能较差。部分拥有非制冷红外焦平面阵列核心制备技术的研究机构进行了太赫兹探测成像技术的针对性开发，主要为日本 NEC、加拿大 INO、法国 CEA-Leti 和中国电子科技大学。

2008 年，日本 NEC 公司 Oda 首次报道了基于氧化钒热敏材料 microbolometer 的 THz 探测器设计，采用双层微桥结构探测单元设计[26]，该结构如图 1 所示，该器件在 3.1 THz 的 NEP 参数达到 200~300 pW[27]，主要改进为光学窗口涂覆 16 μm 聚对二甲苯层和优化太赫兹波金属吸收层。2010 年报道了太赫兹相机在医疗、无损检测、质量控制等方面的潜在应用[28]。在 2012 年及 2013 年设计出基于双层结构微桥的便携式太赫兹相机，阵列规模为 320×240，NEP 参数达到数十 pW，并对多种太赫兹源辐射进行了成像验证[29-30]。2014 年提出了对非同步太赫兹信号进行图像重建的方法[31]，用来消除太赫兹辐射频率与相机探测频率之间失配的问题，并可以计算出热时间常数。2016 年采用厚层氮化物层作为共振微腔结构填充物，有效提升了器件在 0.5~2.0 THz 范围的响应率[32]。

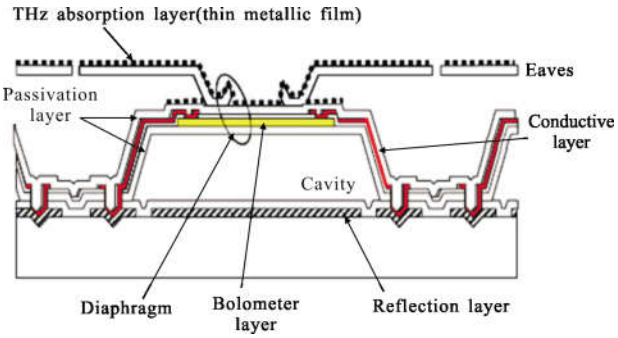


图 1 NEC 公司的双层微桥结构示意图

Fig.1 Structural representation of NEC′s bilayer micro-bridge

2009 年，加拿大 INO 公司开始报道基于氧化钒热敏材料 microbolometer 的太赫兹探测成像所需光学镜头设计并开始进行成像实验[33]。2010 年制备具有抗反射涂层结构的 160×120 微测辐射热计阵列，实现了 5 mm 聚乙烯塑料遮挡金属刀片的透射成像[28]。另外提出了采用黑金、金属薄膜、蝶形天线结构提高

太赫兹吸收的方法[34]。2011 年分析了不同探测单元尺寸对太赫兹探测成像效果影响，随探测单元尺寸减小，成像分辨率提高。INO 公司设计率 312 μm 像素尺寸的微桥结构，测试发现微桥结构存在显著的形变[35-36]。2012 年，提出了折反式太赫兹探测成像镜头设计并提出微扫描的图像处理方法，改善太赫兹探测成像质量[37]。2013 年，INO 公司推出了 384×288 阵列规模太赫兹相机，该相机在 1.04 THz 频点的 NEP 为 50 pW，可实现信封内刀片的穿透成像[38]。Oulachgar 在微桥单元顶端设置了一层选择图形有效提高器件在 4.25 THz 的太赫兹辐射吸收，探测单元的 NEP 参数接近 60 pW[39]。2014 年报道了该成像器件的成像视场设置及穿透衣物成像的效果[40]。2016 年采用太赫兹相机开展了金属物体反射式探测成像实验[41]。2018 年，Marchese 报道了针对目标物镜的优化设计[42]，透镜的 F 数由 0.95 降低到 0.6，聚焦长度为 44 mm，太赫兹透射图像的质量得到明显改善，如图 2 所示。

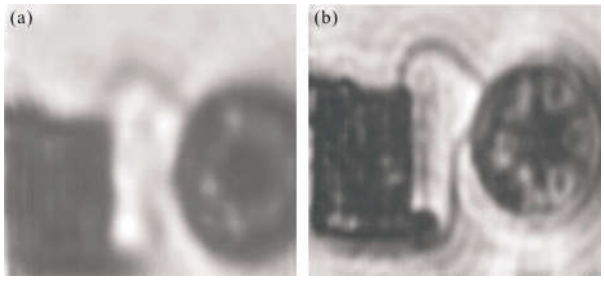


图 2 INO 公司报道的太赫兹相机透射图像效果(扬声器连接线及电路板，左图 F 数 0.95，右图 F 数 0.6)

Fig.2 Transmission image of THz camera reported by INO Company(loudspeaker connector and circuit board, F number of left figure 0.95, F number of right figure 0.6)

法国 CEA-Leti 与英国剑桥大学联合研究了基于非晶硅敏感材料的微测辐射热计，并应用于室温太赫兹波探测成像。2009 年 Simoens 利用该探测器件对 2.7 THz 的 QCL 辐射源进行采用扫描成像[43]。这里列举 CEA-Leti 公司的两个提高微桥单元太赫兹探测的改进措施[44-45]：一是设计了直接耦合和电容耦合两种结构的天线，建立超材料吸波结构，提高太赫兹辐射的吸收率；二是在底层反射金属和微桥桥面之间增加了 11 μm 厚高折射率的二氧化硅介质层，形成谐振结构提高微桥对太赫兹辐射的吸收。设计的太赫兹探测微桥单元结构如图 3 所示。

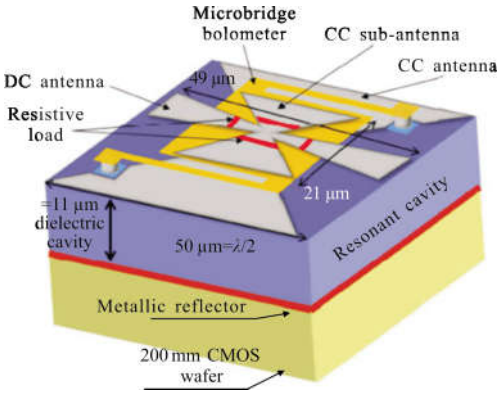
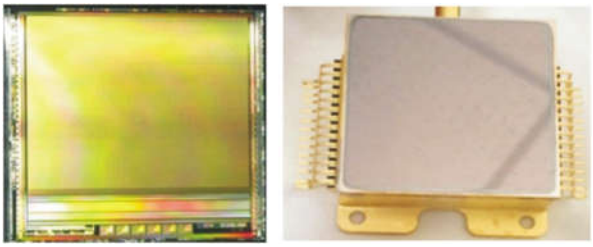


图 3 CEA-LETI 公司设计的太赫兹微桥单元结构

Fig.3 Cell structure terahertz microbridge designed by CEA-LETI

电子科技大学在 2009 年已经突破了非制冷红外焦平面阵列中多项关键技术（高电阻温度系数高均匀性热敏材料技术、MEMS 结构器件的设计与制备技术、低噪声读出电路设计、高可靠真空封装与探测器图像处理技术等），在我国率先研制出独立自主知识产权的非制冷红外焦平面探测阵列器件，研制出的 320×240 规模探测器芯片、封装结构及热成像效果如图 4 所示，这些前期工作为高性能室温太赫兹探测阵列研究奠定良好的基础。



(a) 探测阵列可见光图片 (b) 阵列封装图片

(a) Optical image of detector array (b) Array package image

(c) 探测阵列成像图

(c) Imaging picture of detector array

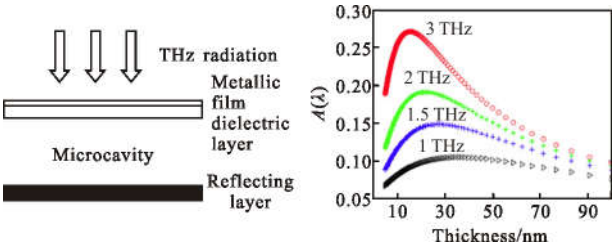
图 4 制备完成的探测阵列及封装图片

Fig.4 Completely fabricated detector array and package image

3 微桥结构室温太赫兹探测器的吸收结构研究

为提高热敏微桥结构对太赫兹波的探测性能，需要开展太赫兹探测机构与材料等针对性设计，主要包括与微桥兼容的高吸收材料设计、高吸收微桥结构设计、低噪声电路设计、高透窗口与太赫兹镜头设计、太赫兹图像处理等，下面主要对太赫兹吸收材料研究工作进行简述。

因微桥桥面材料对太赫兹波的吸收很低，需要增加吸收结构增强太赫兹波响应。超材料吸收结构对太赫兹波有较好的吸收，但是超材料图形较大无法直接与小尺寸微桥桥面兼容，厚层黑金薄膜证实也可以实现良好的太赫兹辐射，但是很厚的金属层会显著提高热探测微桥的热容，进而降低温升效果。有研究者在分析国外公司机构报道的技术方案进行了优化设计，在微桥结构中增加一层超薄 NiCr 金属薄膜用作太赫兹波吸收层，对顶层带有 NiCr 吸收薄膜的微桥结构进行了光学仿真与计算。简化的结构模型如图 5(a)所示，NiCr 薄膜在不同太赫兹频率下的吸收曲线如图 5(b)所示。研究表明 NiCr 薄膜对特定频率的太赫兹波存在吸收峰值。通过优化 NiCr 薄膜的方阻(厚度)可以实现不同频段太赫兹波吸收的最大化，NiCr 薄膜在 2.5 THz 处的吸收峰值约为 23.4%[46]。



(a) 简化吸收模型
(a) Simplified absorption model

(b) 在不同频率下的吸收曲线
(b) Absorption curves at different frequencies

图 5 顶层带有 NiCr 吸收膜的微桥结构及吸收计算结果

Fig.5 Structure of a micr-bridge with NiCr absorption film on the top layer and the calculation results of absorption

但该吸收薄膜对 THz 吸收性能有限，为增加金属薄膜的太赫兹波吸收率，开展了高比表面积金属/介质复合吸收薄膜的研究工作，采用反应离子刻蚀(RIE)工艺进行介质薄膜表面修饰，形成微结构，显著增大制备其上的 NiCr 薄膜的有效吸收面积，如图6(a)与图 6(b)所示，RIE 修饰后，NiCr 薄膜对太赫兹波的吸收率亦有明显增加，如图 6(c)所示[47]。

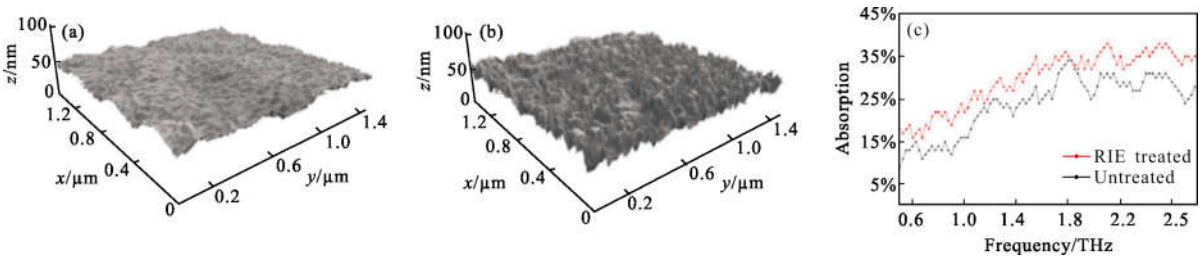


图 6 未经 RIE 修饰(a)与经过修饰(b)的介质薄膜上制备的 NiCr 薄膜形貌及其吸收率对比(c)

Fig.6 Morphology of non-RIE modified (a) and RIE modified (b) NiCr films prepared on dielectric films and comparison of absorptivity

该方法制备的金属薄膜表面被明显粗糙化，形成高比表面积吸收薄膜。图 7 显示了采用磁控溅射法直接制备的厚度为 14 nm 的 NiCr 薄膜与通过 RIE 工艺刻蚀减薄至 14 nm 的 NiCr 薄膜的透射与反射曲线。可见，采用 RIE 工艺减薄方法不但可以制备较小厚度的 NiCr 薄膜，而且同时降低了薄膜的太赫兹波透过率和反射率[48]。

虽薄层金属薄膜可以吸收太赫兹辐射，但其吸收率偏低(理论吸收上限为 50%)。为解决微桥结构的高太赫兹吸收难题，将超薄金属吸收膜与天线结

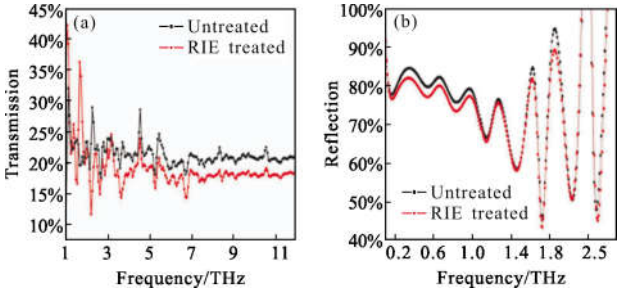


图 7 直接制备与 RIE 工艺减薄制备的 14 nm NiCr 薄膜的透射(a)与反射(b)曲线

Fig.7 Transmission (a) and reflection (b) curves of 14 nm NiCr thin films prepared by direct fabrication and RIE thinning

合,设计微桥桥面上的 NiCr 薄膜吸收层为双贴片天线结构,在不明显减少 NiCr 薄膜吸收面积的同时对特定频率的太赫兹波进行耦合吸收。与此同时,制备金属薄膜前,采用 RIE 工艺进行下层介质薄膜表面修饰,形成高比表面积金属/介质复合薄膜,增大金属吸收层/天线层的有效吸收面积,提高太赫兹波吸收率。该设计中超薄 NiCr 金属膜提供太赫兹波宽频吸收,天线结构则对特定频率的太赫兹波吸收进行耦合增强,从而获得宽频高吸收太赫兹波探测微桥结构。但是,由于天线图形设计需兼顾金属吸收膜的吸收面积,因此只能选择金属薄膜面积相对较大的贴片天线(见图 8)等平面天线。

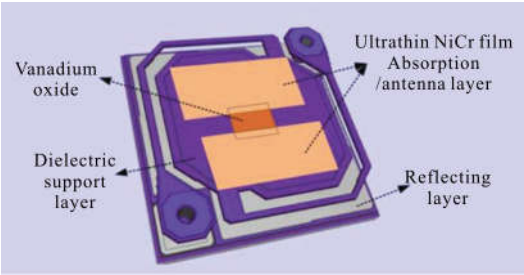


图 8 双贴片天线耦合微桥结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of a dual patch antenna coupled microbridge

进一步改善双贴片天线结构,设计出天线耦合微桥结构与新型扩展天线结构提升太赫兹辐射吸收比例。以螺旋天线为例,首先采用 CST 软件建立了与桥面兼容的螺旋天线耦合微桥结构模型,如图 9 所示。其中螺旋天线材料为铝,厚度 0.1 μm,天线外径 20.8 μm,分布在桥面上(桥面尺寸 24 μm×24 μm);支撑层材料为氮化硅,厚度 0.4 μm;谐振腔为真空。设定螺旋天线旋转角度为 360×n(固定 n=1.1 与 n=2.1),改变天线线条宽度(w)进行电磁吸收仿真,得到不同线条宽度下天线耦合微桥结构的太赫兹波吸收曲线,如图 10 所示。研究表明,随着天线线宽的增加,微桥结构的峰值吸收率和吸收频率增大。当天线线宽增大到某一特定值(w=2.3 μm(n=1.1)与 w=1.3 μm (n=2.1))后,峰值吸收率和吸收频率基本保持不变,吸收达到约 60%[50]。这一特点对螺旋天线耦合微桥结构的制备是有利的,因为天线图形制备过程中,线条宽度的微小变化不会导致微桥结构太赫兹波吸收特性的明显变化,可减小工艺制造难度。然而,仿真结果表明该微桥结构模型的太赫兹波吸收峰值频率在 2.6 THz 以上,难以匹配至太赫兹辐射源频点(2.5 THz),这是因为太赫兹探测单元很小)尺寸 35 μm×35 μm,螺旋天线结构调整空间很小,吸收频率很难进一步降低。

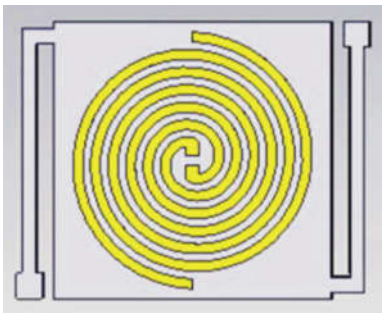


图 9 与微桥结构兼容的螺旋天线结构设计图

Fig.9 Structure design of helical antenna compatible with microbridge structure

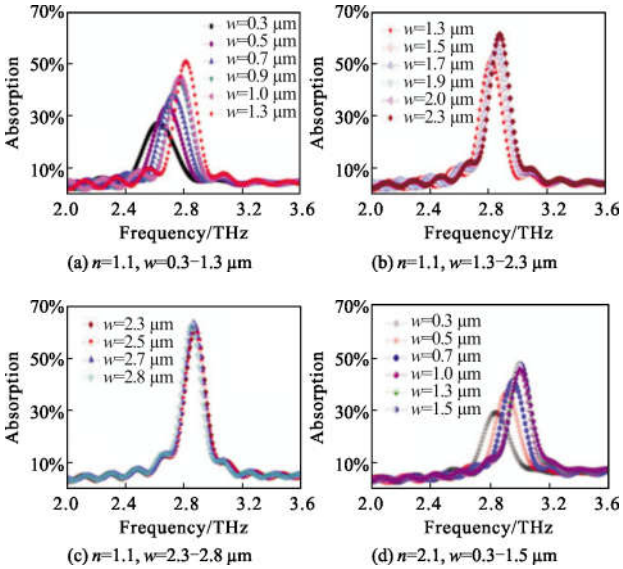


图 10 桥面螺旋天线耦合微桥结构的太赫兹波吸收曲线

Fig.10 Terahertz wave absorption curves of bridge helical antenna coupled micro-bridge structure

为进一步降低探测单元吸收频率,设计出与桥腿电极相复合的扩展螺旋天线结构,当微桥桥面的螺旋天线延伸至桥腿时,形成的扩展天线耦合微桥结构模型如图 11(a)所示。设定螺旋天线旋转角度为 360×n(n=1.1),桥面螺旋天线线宽为 1 μm,改变扩展桥腿天线线条宽度(b)进行电磁吸收仿真,得到微桥结构的太赫兹波吸收曲线,如图 11(b)所示。仿真结果表明,这种扩展天线结构增大了天线的有效吸收

面积，有助于在较低的太赫兹频率下获得较高的吸收率，峰值吸收频率可调节至 2.52 THz 附近，同时天线结构最高吸收率达到约 80%[49]。

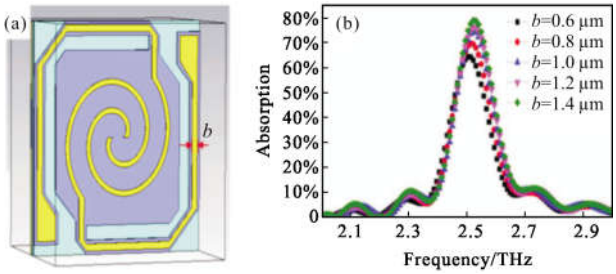


图 11 扩展螺旋天线耦合微桥结构(a)与不同扩展桥腿天线线宽下的太赫兹波吸收曲线(b)

Fig.11 Extended helical antenna coupled micro-bridge structure (a) and terahertz wave absorption curves of the structures under different extended leg antenna widths (b)

此外，设计了一种桥腿分离天线耦合微桥结构，位于微桥结构顶层的天线层由桥面上的螺旋天线与桥腿上的线型天线组成。研究表明，桥面上螺旋天线对太赫兹波的高吸收主要源于金属天线层的欧姆损耗，而桥腿上线型天线则通过氮化硅介质支撑层中的介电损耗来产生太赫兹波吸收峰。调节分离天线的结构参数与相对位置，可以使得这两个吸收峰相互靠近，在目标太赫兹频点附近形成宽频吸收峰。单臂型与双臂型桥腿分离天线耦合微桥结构的太赫兹波吸收曲线如图 12 所示，两种结构均能在 2.5 THz 附近实现宽频吸收(图中“i”为线型天线与桥面桥腿连接点的距离)，最高吸收率达到 90%[50]。

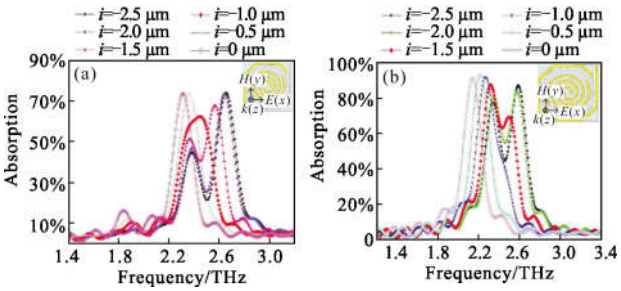


图 12 单臂型(a)与双臂型(b)桥腿分离天线耦合微桥结构的太赫兹波吸收曲线

Fig.12 Terahertz wave absorption curves of micro-bridge structure coupled with a single-arm (a) and double-arm (b) bridge-leg separation antenna

可见，超薄金属薄膜、粗糙化复合超薄金属薄膜、平面天线结构、螺旋天线结构、扩展天线耦合微桥结构的设计能够有效提升微桥单元在太赫兹波段的吸收率，同时与太赫兹探测结构具有良好的结构与工艺兼容性，为高性能太赫兹探测阵列研制提供了重要的支撑。

对于红外探测结构的微桥单元而言，目前红外探测单元通常在 14~25 μm，该尺寸仍然大于长波红外探测中心波长(10 μm)，不存在低于衍射极限探测的情况。对于太赫兹辐射波长而言(1 THz 辐射对应的太赫兹波波长为 300 μm)，辐射波长远大于探测单元尺寸，因此探测单元尺寸需要进行优化设计。我们采用有限元仿真软件进行多种尺寸微桥结构的设计仿真工作，并且制备了多种不同尺寸(50×50、75×75、100×100、125×125、150 μm×150 μm)的太赫兹探测单元结构，在设计探测单元结构时需要综合考虑微桥形变、热学吸收及电学连接等多种因素。制备完成的不同尺寸微桥结构的共聚焦显微镜测试图如 13 所示，随微桥尺寸增大，微桥结构出现的明显的形变，这种形变会直接影响微桥阵列的均匀性和热稳定性。当单元尺寸低于75 μm(支撑桥腿宽度为 1.3 μm)时，微桥均匀性较好。基于优化结构制备出的微桥结构太赫兹探测单元在 2.5 THz 辐射下 NEP 参数低于 200 pW/Hz$^{1/2}$，响应时间~6.7 ms[51]。

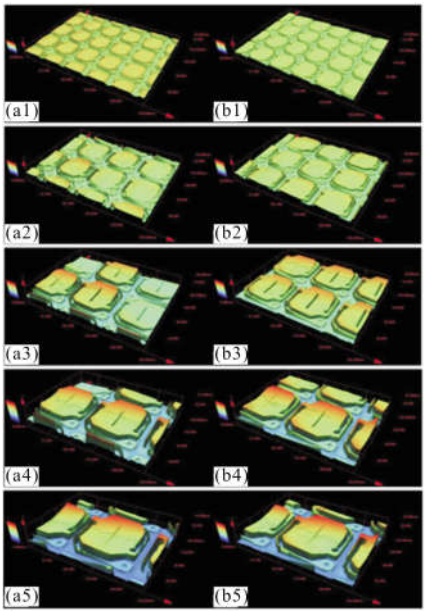


图 13 不同尺寸太赫兹微桥结构的共聚焦显微镜测试图

Fig.13 Confocal microscopic measurements of terahertz micro-bridge structure with different sizes

结合优化的微桥阵列制备工艺、高吸收薄膜设计、小尺寸微桥结构设计、太赫兹图像增强等研究内容,完成基于衬底读出电路的微桥探测阵列的集成制造与真空封装,研制出 320×240、384×288 阵列、35 μm×35 μm 像元尺寸太赫兹焦平面探测器, 器件成像帧频 60 Hz,噪声等效功率优于 50 pW/Hz$^{1/2}$。该探测器结合 2.5 THz 气体激光器太赫兹源,实现室温下对太赫兹波穿透实时成像与隐藏物体检测的功能[52],太赫兹探测阵列实时成像截图效果如图 14 所示。随着读出电路放大结构、太赫兹光路、成像软件与系统等优化,探测器 NEP 性能与成像效果仍有较大提升空间。

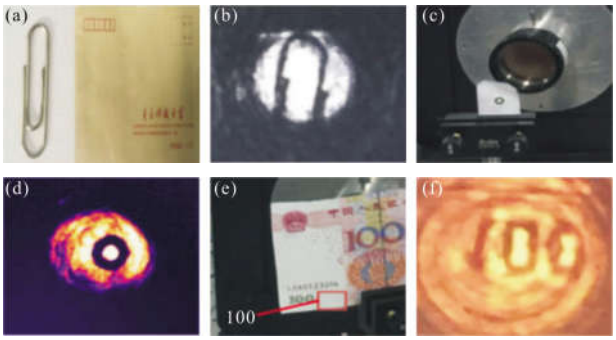


图 14 信封中别针、遮挡垫片和人民币水印的太赫兹成像图

Fig.14 Terahertz image of pin, shielding gasket and RMB watermarking in envelope

4 总结与展望

基于热敏微桥结构的室温太赫兹探测阵列技术经过近十年的发展, 探测性能和探测成像质量都有了显著提升。但是目前仍有待改进的地方:(1) 基于热敏微桥结构的室温太赫兹探测阵列技术在成像应用时,需要结合外部太赫兹辐射源,无法实现室温环境下的被动成像,需要进一步提高探测器的探测率;(2) 微桥结构太赫兹探测器在高频太赫兹波段探测性能良好,在低于 1 THz 波段响应偏低,而高频段的小型化大功率太赫兹辐射源缺乏, 需要进行低频段高响应的微桥结构探测器件研究。

太赫兹波作为电磁波谱中的空隙波段, 具有其他波段不可替代的特性, 在航天星际探测、安防安检、高速通信、生物医疗等方面具有广阔的应用前景。作为感知太赫兹波的高性能太赫兹探测成像技术, 必将在未来太赫兹科技发展与应用中发挥巨大作用。

参考文献:

[1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. ***Nature Photonics***, 2007, 1: 97-105,

[2] Tassin P, Koschny T, Soukoulis C M. Graphene for terahertz applications [J]. ***Science***, 2013, 341: 620-621.

[3] http: // www. technologyreview. com / Infotech/ 13438/

[4] http://news.xinhuanet.com / world/ 2005-01/ 09 / content_2436145.htm

[5] Kohler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. ***Nature***, 2002, 417: 156-159.

[6] Vitiello M S, Consolino L, Bartalini S, et al. Quantum-limited frequency fluctuations in a terahertz laser [J]. ***Nature Photonics***, 2012, 6: 525-528.

[7] Cai X, Sushkov A B, Suess R. J, et al. Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in grapheme [J]. ***Nature Nanotechnology***, 2014, 9: 814-819.

[8] Sizov F, Rogalski A. THz detectors [J]. ***Progress in Quantum Electronics***, 2010, 34: 278-347.

[9] Ignacio I, Carlos D, Jean-Francois M, et al. Operation of GaN planar nanodiodes as THz detectors and mixers [J]. ***IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology***, 2014, 4: 670-677.

[10] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors [J]. ***Nature Materials***, 2012, 11: 865-871.

[11] Chen S L, Chang Y C, Zhang C, et al. Efficient real-time detection of terahertz pulse radiation based on photoacoustic conversion by carbon nanotube nanocomposite [J]. ***Nature Photonics***, 2014, 8: 537-542.

[12] Marinchio H, Chusseau L, Torres J, et al. Room-temperature terahertz mixer based on the simultaneous electronic and optical excitations of plasma waves in a field effect transistor [J]. ***Applied Physics Letters***, 2010, 96: 013502.

[13] Knap W, Rumyantsev S, Vitiello M S, et al. Nanometer size field effect transistors for terahertz detectors [J]. ***Nanotechnology***, 2013, 24: 214002.

[14] Sherry H, Grzyb J, Zhao Y, et al. A 1k pixel CMOS camera chip for 25 fps real-time terahertz imaging applications [C]// ISSCC, 2012: 252-254.

[15] Han R, Zhang Y, Kim Y, et al. 280 GHz and 860 GHz image sensors using Schottky-barrier diodes in 0.13 μm

digital CMOS [C]//ISSCC, 2012: 254-256.

[16] Jiang Y, Jin B, Wu W, et al. Terahertz detectors based on superconducting hot electron bolometers [J]. ***Science China Information Sciences***, 2012, 55: 64-71.

[17] Xiao-Li Y, O′Brien J. A proposal for optical terahertz detection with externally biased nanopore superlattices [J]. ***Applied Physics Letters***, 2014, 104: 031104.

[18] Huhn A K, Spickermann G, Ihring A, et al. Uncooled antenna-coupled terahertz detectors with 22 μs response time based on BiSb/Sb thermocouples[J]. ***Applied Physics Letters***, 2013, 102: 121102.

[19] Romano M, Chulkov A, Sommier A, et al. Broadband sub-terahertz camera based on photothermal conversion and IR thermography [J]. ***Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves***, 2016, 37(5): 448-461.

[20] Escorcia I, Grant J, Gough J, et al. Uncooled CMOS terahertz imager using a metamaterial absorber and pn diode [J]. ***Optics Letters***, 2016, 41(14): 3261-3264.

[21] Wen Y, Jia D, Wei Ma, et al. Photomechanical meta-molecule array for real-time terahertz imaging [J]. ***Microsystems & Nanoengineering***, 2017, 3: 17071.

[22] Lee A W, Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array [J]. ***Optics Letter***, 2005, 30(19): 2563.

[23] Sizov F. Terahertz radiation detectors: the state of the art[J]. ***Semiconductor Science and Technology***, 2018, 33: 123001.

[24] Aseev A L, Esaev D G, Dem′yanenko M A, et al. Terahertz imaging and radiocopy with 160×120 microbolometer 90 FPS camera [C]//Proceedings of FEL, 2007: 83-85.

[25] Coppinger M, Sustersic N A, Kolodzey J, et al. Sensitivity of a vanadium oxide uncooled microbolometer array for terahertz imaging [J]. ***Optical Engineering***, 2011, 50(5): 053206.

[26] Oda N, Komiyama S, Hosako I. Bolometer-type THz-wave detector: USA, US200810237469 [P]. 2008-08-02.

[27] Oda N, Yoneyama H, Sasaki T, et al. Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays [C]//SPIE, 2008, 6940: 69402Y.

[28] Hosako I, Sekine N, Oda N, et al. A real-time terahertz imaging system consisting of terahertz quantum cascade laser and uncooled microbolometer array detector [C]//SPIE, 2010, 8023: 80230A.

[29] Oda N, Lee A W, Ishi T, et al. Proposal for real-time terahertz imaging system, with palm-size terahertz camera and compact quantum cascade laser[C]//SPIE, 2012, 8363: 83630A.

[30] Oda N, Ishi T, Kurashina S, et al. Palm-size and real-time terahertz imager, and its application to development of terahertz sources [C]//SPIE, 2013, 8716: 871603.

[31] Oda N, Okubo S, Sudou T, et al. Image reconstruction method for non-synchronous THz signals [C]//SPIE, 2014, 9102: 910202.

[32] 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.

[33] Pope T, Doucet M, Dupont F, et al. Uncooled detector, optics, and camera development for THz imaging [C]// SPIE, 2009, 7311: 73110L.

[34] Oulachgar H, Marchese L, Alain C, et al. Development of MEMS microbolometer detector for THz applications [C]// IEEE Conference: Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010: 1-2.

[35] Oulachgar H, Bolduc M, Tremblay M, et al. Simulation and fabrication of large area uncooled microbolometers for Terahertz wave detection [C]//IEEE Conference: Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2011: 1-2.

[36] Bergeron A, Marchese L, Savard É, et al. Resolution capability comparison of infrared and terahertz imagers [C]// SPIE, 2011, 8188: 81880I.

[37] Blanchard N, Marchese L, Martel A, et al. Catadioptric optics for high-resolution terahertz imager [C]//SPIE, 2012, 8363: 83630B.

[38] Marchese L, Terroux M, Genereux F, et al. Review of the characteristics of 384×288 pixel THz camera for seethrough imaging [C]//SPIE, 2013, 8900: 890009.

[39] Oulachgar H, Mauskopf P, Bolduc M, et al. Design and microfabrication of frequency selective uncooled microbolometer focal plane array for terahertz imaging [C]//IEEE Conference: Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2013: 1-2.

[40] Marchese L, Terroux M, Dufour D, et al. Case study of concealed weapons detection at stand-off distances using a compact, large field-of-view THz camera [C]//SPIE, 2014, 9083: 90832G.

[41] Marchese L E, Terroux M, Doucet M, et al. Reflection imaging in the millimeter-wave rage using a video-rate terahertz camera [C]//SPIE, 2016, 9836: 98362S.

[42] Marchese L, Doucet M, Blanchard N, et al. Overcoming the

challenges of active THz/MM -wave imaging: an optics perspective [C]//SPIE, 2018, 10639: 106392B.

[43] Simoens F, Durand T, Meilhan J, et al. Terahertz imaging with a quantum cascade laser and amorphous -silicon microbolometer array[C]//SPIE, 2009, 7485: 74850M.

[44] Nguyen D, Simoens F, Ouvrier-Buffet J, 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.

[45] Simoens F, Meilhan J, Gidon S, et al. Antenna -coupled microbolometer based uncooled 2D array and camera for 2D real-time terahertz imaging [C]//SPIE, 2013, 8846: 88460O.

[46] Gou J, Jiang Y, Wang J. Terahertz absorption characteristics of NiCr film in a microbolometer focal plane array [J]. ***Micro and Nano Letters***, 2014, 9(3): 215-217.

[47] Gou J, Wang J, Li W, et al. Terahertz absorption characteristics of NiCr film and enhanced absorption by reactive ion etching in a microbolometer focal plane array [J]. ***Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves***, 2013, 34: 431-436.

[48] Gou J, Wang J, Li W, et al. Study on optical properties of nanostructured NiCr filmprepared by magnetron sputtering and RIE for terahertz applications [J]. ***Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves***, 2015, 36(9): 838-844.

[49] Gou J, Zhang T, Wang J, et al. Spiral antenna-coupled microbridge structures for THz application [J]. ***Nanoscale Research Letters***, 2017, 12: 91.

[50] Gou J, Niu Q, Liang K, et al. Frequency modulation and absorption improvement of THz micro-bolometer with micro-bridge structure by novel spiral-type antennas [J]. ***Nanoscale Research Letters***, 2018, 13: 74.

[51] Wang J, Li W, Gou J, et al. Fabrication and parameters calculation of room temperature terahertz detector with micro-bridge structure [J]. ***Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves***, 2015, 36: 49-59.

[52] Gou J, Wang J, Zheng X, et al. Detection of terahertz radiation from 2.52 THz CO_2 laser using a 320 ×240 vanadium oxide microbolometer focal plane array [J]. ***RSC Advances***, 2015, 5(102): 84252-84256.