

## 非制冷红外探测器研究进展 (特邀)

余黎静<sup>1,2,3</sup>, 唐利斌<sup>1,2,3\*</sup>, 杨文运<sup>2</sup>, 郝 群<sup>1\*</sup>

- (1. 北京理工大学 光电学院 信息光子技术工信部重点实验室, 北京 100081;
2. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223;
3. 云南省先进光电材料与器件重点实验室, 云南昆明 650223)

**摘要:** 非制冷红外探测器由于无需制冷装置, 能够工作在室温状态下, 具有成本低、体积小、功耗低等特点, 在红外领域得到了广泛的应用。在军事应用方面, 非制冷型探测器的应用逐渐进入了之前制冷型探测器的应用范围, 大量应用在一些低成本的武器系统, 甚至在一些应用领域取代了原来的非制冷型探测器。在民用领域方面, 更表现出了其价格和使用方便的优势, 在民用车载夜视、安防监控等应用领域引起了广泛的兴趣和关注。文中介绍了 Bolometer、热释电、热电堆等几种典型非制冷红外探测器的工作原理, 列举了目前已实现商业化应用的主要产品在国内外情况, 着重介绍了目前应用最广泛的 Bolometer 器件主流产品的像元间距、阵列规格、性能及其封装发展的情况。除了已实现商业化应用的 Bolometer、热释电、SOI 二极管等探测器等产品, 还详细介绍了一些非制冷探测新技术或新型器件: 比如超表面在增强某些波段吸收方面的应用, 新材料的 Bolometer 探测器、双材料新型非制冷器件、石墨烯、量子点、纳米线等光电探测技术的研究进展。最后文章还对今后非制冷红外探测器的发展趋势作了预测。

**关键词:** 非制冷; 红外探测器; 热释电; Bolometer; 封装

**中图分类号:** TN215      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20211013

## Research progress of uncooled infrared detectors(*Invited*)

Yu Lijing<sup>1,2,3</sup>, Tang Libin<sup>1,2,3\*</sup>, Yang Wenyun<sup>2</sup>, Hao Qun<sup>1\*</sup>

- (1. The Laboratory of Photonics Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
3. Yunnan Key Laboratory of Advanced Photoelectric Materials & Devices, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Uncooled infrared detectors are widely used in the infrared field due to their low cost, small size, and low power consumption because they do not need the cooling device and can work at room temperature. In military application field, the uncooled detector has gradually entered the application domain of previous refrigerated detector, and has been widely used in some low-cost weapon systems, even replaced the original uncooled detectors in some application fields. In the civil field, it has shown its advantages in price and ease of use, and has aroused widespread interest and attention in civil in-vehicle night vision, security monitoring and other application field. The working theory of several typical uncooled infrared detectors such as Bolometer, pyroelectric, thermopile, etc. were introduced, and the status of the main products that have been commercialized at home and abroad was enumerated, the development of pixel pitch, array specifications, performance and

收稿日期: 2020-11-24; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203404); 云南省创新团队 (2018HC020)

packaging of mainstream bolometer devices was focused, which were currently the most widely used. In addition to the bolometer, pyroelectric, SOI diode and other products that had been commercialized, some new uncooled detection technologies or new detectors were introduced in detail: such as the application of metasurfaces in enhancing absorption in certain wavebands, the research progress of new materials bolometer, new bi-material uncooled devices, graphene, quantum dots, nanowires and other photoelectric detection technologies. Finally, the future development trend of uncooled infrared detectors were predicted in the end of the review.

**Key words:** uncooled; infrared detector; pyroelectric; bolometer; package

## 0 引言

在红外系统中,红外探测器作为探测、识别目标的关键,其主要作用是将入射的红外信号转化为可以检测的电信号后进行输出。探测器性能的高低是衡量红外探测技术发展水平的重要指标。作为军事和民用领域的重要技术,红外探测技术被广泛地使用于消防、医疗、工业、安防、制导、导弹跟踪和拦截等领域。

按照工作条件的不同,可以将红外探测器分为制冷型和非制冷型两种类型。目前应用最广泛的碲镉汞 (MCT)、铟化铟 (InSb) 等红外探测器,都属于制冷型。虽然其性能好、分辨率高、探测距离远,但要实现这些目标,都需要昂贵的制冷设备来降低其暗电流噪声<sup>[1]</sup>,这就造成整个系统价格昂贵、体积大,使用成本高。区别于需要制冷的红外探测器类型,非制冷型的探测器舍弃了昂贵复杂的制冷装置,可以工作在室温附近,其体积、重量和成本都得到明显降低,非制冷型探测器的这些优势,使得其在在军用和商业领域都有广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。随着近些年非制冷红外探测器技术的发展,其性能也在不断提升,应用范围也越来越广,甚至可以在一些应用场合替代制冷型的红外探测器。其应用领域如图 1 所示。

按照市场定位来划分,非制冷红外探测器可以分为两个领域:高端市场和低端市场。高端市场主要针对军用,要求小像元、大面阵、高可靠性;而对于低端市场,主要要求价格低<sup>[4]</sup>。非制冷探测技术经过多年的发展,和制冷型的相比,虽然其在性能上有一些差距,但对于绝大部分的民用需求以及部分的军事应用要求来说,其性能已经可以满足使用需求。在军事应用领域,由于省去了制冷装置,其结构得到很大的简化,这种简化有效的提高了系统的可靠性,并缩小了体积、降低了成本。由于其轻便体积小特点,非制

冷探测器非常适合于应用于陆军的轻武器系统,目前已经应用于瞄具、单兵侦查系统等;非制冷红外探测器能够在远距离的情况下或是恶劣条件有效地探测并跟踪目标,被应用于红外侦查系统。而对于低端的民用市场,非制冷红外系统所占领的领域,是制冷型热像仪由于其高昂的价格而很难进入的。

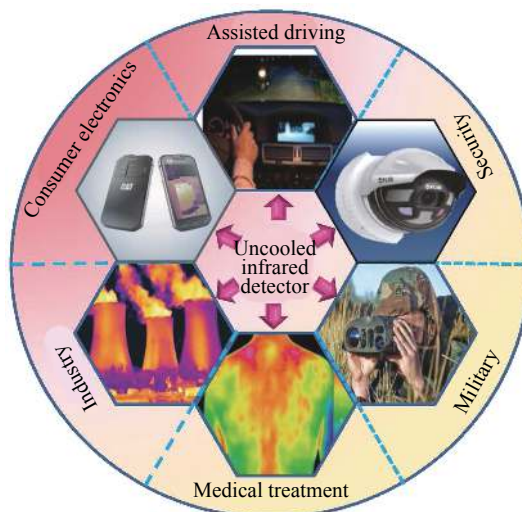


图 1 非制冷红外探测器的应用

Fig.1 Applications of uncooled infrared detector

## 1 非制冷红外探测器的商业化应用

按照工作原理,目前已实现商业化应用的非制冷红外探测器大致可以按如下几种类型进行分类:热释电型探测器、热电堆型探测器、微测辐射热计型(以下称 Bolometer)探测器等。非制冷红外探测器技术从 20 世纪 80 年代开始发展,到 90 年代初,开始有 Honeywell 公司关于红外 Bolometer 焦平面产品的文献报道<sup>[5]</sup>。非制冷红外探测器的发展历程如图 2 所示。

从几种产品的技术特点比较来看,热释电探测器工艺与现代半导体工艺的兼容性最差;热电堆探测器像元尺寸到 50~100 μm 左右就基本已达到极限;而

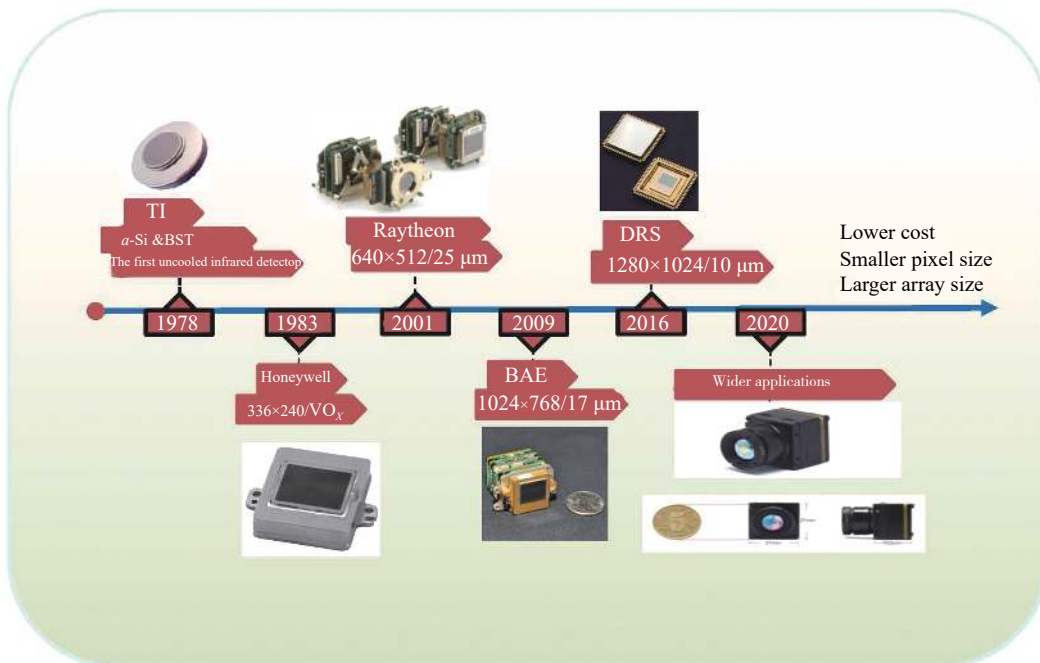


图 2 非制冷红外探测器的发展历程

Fig.2 Development of uncooled infrared detector

Bolometer 工艺与半导体制造工艺能很好的兼容, 非常适合于大规模的集成和生产<sup>[6]</sup>, 因此 Bolometer 的技术路线逐渐战胜了其他的技术类型, 成为主流的技术方向, 并在市场中占据了绝对优势的份额。Bolometer 技术诞生至今, 许多材料曾作于 Bolometer 的敏感材料, 但是由于各自的性能特点和不同的发展路线, 那些性能差、或是不适合于大规模生产的材料逐渐被淘汰, 目前到未来相当长的时间内, 应用最广泛、开发最充分的敏感材料是氧化钒 ( $VO_x$ ) 和非晶硅 ( $\alpha$ -Si)<sup>[7-8]</sup>。

相较于  $VO_x$ 、 $\alpha$ -Si 的 Bolometer 器件在商业化应用中的飞速发展, 红外测温市场之前一直是不温不火的状态。但是今年上半年因为疫情影响, 市场被激活。对传感器、耳温枪、测温系统等的需求暴涨。预计今后对测温的需求将转为常态, 测温应用会越来越被普及, 测温市场将向可穿戴设备、智能家电、手机等领域快速扩张。

### 1.1 Bolometer 探测器

Bolometer 探测器是通过 MEMS 加工技术, 制备出悬空、隔热的微桥结构<sup>[9]</sup>。图 3 介绍了典型的 Bolometer 器件的结构、封装、成像等。它是由吸收层、热敏感层、支撑腿、互联导线和基底等部分所组成。吸收层吸收了红外辐射后, 将其转化为热能, 然

后敏感层的温度发生变化, 热量的变化引起电阻的变化, 阻值的变化转化为电流或电压信号提取出来, 就完成了红外探测<sup>[10-11]</sup>。

#### 1.1.1 影响 Bolometer 器件性能的关键因素

器件对红外信号的探测灵敏度, 主要取决于其红外辐射转化为温度变化的能力, 对于同样功率的红外辐射, 热敏材料的温度变化越大, 器件的灵敏度就越高。所以要提高器件的灵敏度, 除了要选取优质的敏感材料外, 还需要在器件结构设计和封装设计上尽量减少热辐射热量的损耗, 避免热传导和热对流造成热量损失。

##### 1) Bolometer 敏感材料

敏感材料的电阻-温度系数 (TCR) 是影响 Bolometer 性能的关键因素。要提高 Bolometer 的灵敏度, 就需要选择电阻均匀性好、电阻温度系数 (TCR) 高、 $1/f$  噪声小的敏感材料。

热敏感薄膜材料选择上存在两条路线 ( $VO_x$ 、 $\alpha$ -Si), 分别是美国和法国所走的不同的技术路线。20 世纪 80 年代, 美国 Honeywell 公司在军方资助下在研发出  $VO_x$  的 Bolometer 器件, 后授权数家公司生产; 而法国在 20 世纪 90 年代末期才推出采用  $\alpha$ -Si 的 Bolometer。由于美国应用较早且基于其国内外庞大

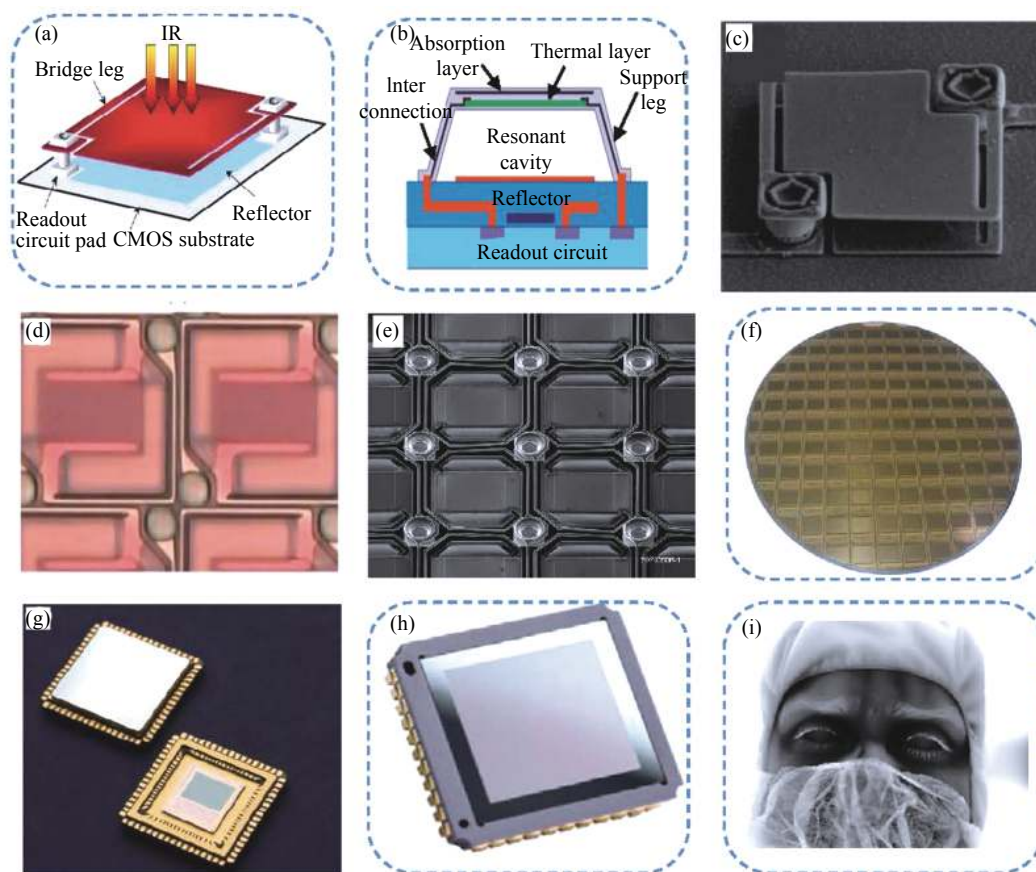


图 3 Bolometer 器件。(a) 单个像元结构示意图<sup>[12]</sup>；(b) 像元组成结构示意图；(c) 像元 SEM 图；(d) 焦平面局部显微镜图；(e) 640×512 焦平面局部 SEM 图；(f) Wafer 显微镜图；(g) 封装示意图；(h) Bolometer 探测器；(i) Bolometer 成像图

Fig.3 Bolometer. (a) Diagram of pixel structure<sup>[12]</sup>; (b) Diagram of pixel profile diagram; (c) Pixel SEM image; (d) Partial microscope diagram of 640×512 focal plane array; (e) Partial SEM image of 640×512 focal plane array; (f) Microscope diagram of wafer; (g) Package diagram; (h) Bolometer detector; (i) Bolometer image

的需求，目前美国研制的 VO<sub>x</sub> 材料路线占领了 80% 左右的市场份额。

VO<sub>x</sub> 的 TCR 一般为 2%~3%/K，特殊方法制备的单晶态 VO<sub>2</sub> 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 可达 4%/K。从目前技术发展水平看，采用 VO<sub>x</sub> 热敏薄膜材料的探测器在性能上较 α-Si 有一定优势，VO<sub>x</sub> 材料的噪声小、TCR 大的特点，是较为理想的制备非制冷 Bolometer 阵列的敏感材料：

- (1) 相比于 VO<sub>x</sub>，α-Si 是标准的硅工艺，更容易制造，成本更低。
- (2) VO<sub>x</sub> 探测器可以做到更高的 NETD 和灵敏度。
- (3) α-Si 材料的 1/f 噪声比 VO<sub>x</sub> 高，非均匀性差，成像质量低于 VO<sub>x</sub>。

在未来一段时间内，VO<sub>x</sub> 与 α-Si 探测器两种技术路线仍将同时存在，只是市场定位不会有不同。VO<sub>x</sub>

定位于对性能、图像质量等有较高要求的领域，而 α-Si 更适合于对价格敏感、对性能要求低的民用领域。

## 2) 读出电路

读出电路是限制探测器性能的核心技术，但是由于读出电路是和探测器配套出现的，在报道产品时，各大厂商很少对读出电路进行单独的报道，只是会对读出电路的一些关键技术指标进行说明。在知道了探测器的指标后，可以对读出电路的参数进行推算。我们经常根据探测器披露的信息，对推测其相应的读出电路水平<sup>[13]</sup>。

由于 Bolometer 是热敏型的探测器，对于细微的温度变化都很敏感，早期的 Bolometer 阵列都是在衬底上加一个半导体制冷器 (TEC) 来保持温度的稳定。近年随着读出电路设计水平的提高，设计出了补偿电路来抑制温度漂移。目前国外已经有公司研制

出无 TEC 的非制冷红外探测器,且在读出电路 (ROIC) 上集成了 ADC 电路,性能较以往的探测器有明显提高,而且体积、功耗、成本都有所降低<sup>[14-15]</sup>。

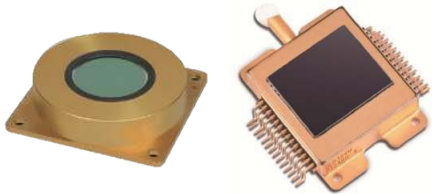
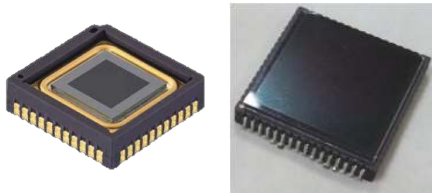

### 3) 封装

非制冷探测器的成本和体积等是限制其应用的关键因素<sup>[16]</sup>。封装的成本在整个探测器的研发成本

中占的比重很大 (超过 50%), 要降低非制冷探测器的成本, 关键因素之一器件的封装<sup>[17-19]</sup>。目前正在应用或是正待发展的封装技术包括: 金属封装、陶瓷封装、晶圆级封装和像元级封装。几种封装技术的特点、使用厂家和典型产品如表 1 所示。

表 1 几种封装对比

Tab.1 Comparison of several packages

Package type	Feature	Major manufacturers	Product
Metal package	High cost, difficult to achieve civilian use when applied in the military field, and will gradually fade out	Early ULIS, DRS, SCD, NEC, BAE	
Ceramic package	Upgraded form of metal packaging, using cheap ceramic materials, reducing packaging volume and weight, and reducing packaging costs	The most popular packaging technology in recent years	
Wafer level package	High integration, simplified process steps, suitable for mass production and low cost production	FLIR, ULIS, Guide infrared, Iray	
Pixel level package	Simplifies the manufacturing process of uncooled IRFPA, reducing packaging costs to the extreme	This technology is still in the research stage	

金属管壳封装是一种传统器件封装方式,其封装结构组件包括金属外壳(管壳)、半导体制冷器(TEC)、吸气剂、过渡基板和红外窗口等。各组件之间连接以金属焊接为主,封装内部集成 TEC、吸气剂等高成本部件,且封装过程中进行多次焊接、粘连、划片和排气等工艺步骤,整个流程下来耗时过长,且每批产品数量有限,所以成本一直居高不下。这种封装形式的产品一般应用在军事领域,很难实现民用化,随着低成本高集成度封装技术的发展,金属管壳封装形式的探测器将逐步淡出热成像探测器市场<sup>[20]</sup>。

陶瓷封装是金属封装的升级形式,封装材料使用廉价陶瓷材料,封装体积和重量都有减少,同时也一定程度降低了封装成本。陶瓷封装的内部已经省去 TEC 制冷器,所使用的管壳是陶瓷基板(多层布线),

吸气剂采用的是片式或者薄膜吸气剂,这些都能减小封装的体积和成本。芯片完成组装、打线等工序后,采用“三合一”的封接技术完成封装<sup>[21]</sup>。陶瓷封装是目前使用最广泛的封装形式,国内的 Iray、大立,以色列的 SCD 等公司,其主流货架产品都是陶瓷封装。

晶圆级封装技术,是目前器件封装领域最前沿的技术,在半导体封装领域迅速获得巨大的应用<sup>[22]</sup>,由于其封装结构简单、封装工艺与半导体工艺完全兼容等特点,使其在器件结构小型化、高集成、低成本上具备天然优势,符合半导体器件发展的趋势,也是目前非制冷红外探测器封装技术中最具发展前景的新型封装形式。

像元级封装理论上在最大程度上降低了封装成本,提高集成度的封装方案<sup>[23]</sup>。在像元级封装中,封

装的对象是焦平面阵列中小像元单位。设计原则上在每个像元单位上通过微细加工技术沉积封盖结构,再在每一个封盖上沉积红外窗口薄膜,这样每一个像素单元就被单独密封了起来。但该封装技术目前还没有引进国内,世界范围内仍处在技术研究阶段,所以未来的几十年里,很难代替片级封装。

高德红外和 Iray 都推出了 WLP 晶圆封装的 VO<sub>x</sub> 探测器,随着 WLP 封装技术的成熟,α-Si 的成本优势不再。Iray 推出了 1280×1024/12 μm, 640×512/12 μm 晶圆封装 FPA 探测器;高德高芯科技也研制生

产出 256×192/17 μm 和 120×92/12 μm 晶圆封装 FPA 探测器,正在研制 400×300/12 μm, 640×512/12 μm 以及 1280×1024/12 μm 晶圆封装 FPA 探测器。

1.1.2 国内外主要发展现状

国内主要生产厂商,高德红外、北方广微、睿创微纳都是 VO<sub>x</sub> 一脉,大立科技是 α-Si。经过近十年的发展,国外产品相比国产主流产品在面阵规模、像元间距和噪声等效温差等指标上已经无明显优势。国内外主要生产微测辐射热的厂家主要产品如表 2 所示。

表 2 国内外微测辐射热的主要产品

Tab.2 Main products of microbolometer from major manufacturers

Manufacturer	Thermal material	Pixel size/μm	Array scale	Package form	NETD	Ref.
FLIR (US)	VO <sub>x</sub>	12	80×60/160×120	Metal/ Ceramic / Wafer level	<50 mK	[24]
		17	640×512/320×256 336×256		<40 mK; <50 mK; <60 mK <30 mK	
DRS (US)	VO <sub>x</sub>	17	1024×768/640×480/320×240	Metal/ Ceramic	≤14 ms /<40 mK	[25]
		12	640×480; 320×240		Wafer level Ceramic <10 ms /<60 mK <10 ms /<60 mK	
Lynred (France)	α-Si	17	1024×768; 640×480;	Wafer level Ceramic	<12 ms /<50 mK <12 ms /<50 mK; <40 mK; <30 mK;	[26]
		17	384×2880×120		<10 ms /<60 mK	
SCD (Israel)	VO <sub>x</sub>	17	1024×768 640×512; 640×480	Ceramic Ceramic	12 ms/<45 mK //<35 mK	[27]
		12	1280×1024; 640×512		7 ms; 10 ms /≤40 mK; ≤50 mK	
Iray (China)	VO <sub>x</sub>	14	1024×768; 640×512	Ceramic Metal	7 ms /≤40 mK	[28]
		17	640×512; 384×288 384×288		10 ms /≤50 mK 10 ms /≤40 mK	
DALI (China)	α-Si	17	1 920×1080, 1280×1024, 1024×768 160×120, 240×180, 384×288, 640×480	Metal Ceramic	≤50 mK ≤60 mK	[29]
		25	384×288 80×80, 120×120, 160×120		≤50 mK ≤40 mK	
Guide infrared (China)	VO <sub>x</sub>	12	640×512; 400×300; 256×192; 1280×1024; 640×512; 400×300; 256×192;	Wafer level Metal	<12 ms/<40 mK; <60 mK <12 ms/<30 mK; <40 mK; <60 mK	[30]
		17	400×300; 120×90 400×300; 800×600		<12 ms/<40 mK <12 ms/<40 mK	
GWIC (China)	VO <sub>x</sub>	20	640×512;	Metal	≤12 ms/≤40 mK; ≤60 mK	[31]
		17	384×288		≤12 ms/≤40 mK; ≤50 mK	
		17			≤12 ms/≤40 mK; ≤50 mK	
		20			15 ms/≤40 mK; ≤50 mK	
		25			≤10 ms/≤40 mK; ≤50 mK	

## 1.2 SOI 二极管

与 Bolometer 相比, SOI 二极管非制冷型 FPA 的灵敏度要低接近一个数量级,但是后者可以通过现有的 MEMS 工艺和 CMOS 工艺集成化而实现规模化生产,这在很大程度降低了生产成本,同时还可以使像素尺寸做到很小,因此 SOI 二极管型非制冷型探测器在民用红外成像市场有很好的发展前景。

日本的 Mitsubishi 公司一直在硅 SOI 二极管开发中处于领先地位。早在 1999 年<sup>[32]</sup>,这家公司就报道了一种 320×240 面阵规格、像素间距少于 40 μm 的 SOI 二极管型非制冷红外探测器,它是在缺陷较少的 SOI 单晶薄膜上制作,具有较低的 1/f 噪声,吸收膜层的填充系数高达 90%, NETD 达到 200 mK。2005 年<sup>[33]</sup>,该公司研制的 SOI 二极管型非制冷型红外探测器像素间距减小到 25 μm,面阵规格为 640×480, NETD 减小到 40 mK,红外吸收率能达到 80%。2020 年,该公司的 Fujisawa 等人<sup>[34]</sup>报道该公司应用一种可甚伸缩的像素结构来减小像素大小,实现了 SOI 二极管非制冷红外焦平面像素间距减小到小于 12 μm。

## 1.3 热电堆红外探测

2020 年,随着新冠肺炎在全球范围内的爆发,非接触式人体红外测温设备,迎来了前所未有的火爆行情,各式各样的红外测温仪器,一瞬间充斥全球市场。红外热电堆传感器作为非接触式人体测温应用的核心元器件,更是炙手可热,供不应求。

热电堆探测器利用塞贝克原理<sup>[35]</sup>,当目标与环境之间存在温度差时,传感器输出对应的电压,从而检测出目标存在或目标的温度。检测的是恒定的红外辐射量,不用对信号源进行调制<sup>[36]</sup>。图 4(a) 是热电堆探测器的示意图。它是自激励产生信号,属于被动红外器件,周围的环境对器件的输出信号影响程度较小。红外热电堆传感器广泛应用于非接触式温度测量应用中,例如:耳温枪、额温枪、固定式温度探头等。对于每年有数亿颗出货量的庞大市场,与 Bolometer 相比,红外热电堆传感器更具有成本优势。

据麦姆斯咨询报道,海曼 (Heimann) 推出的 32×32 像素红外热电堆阵列传感器,是专门为智能家居和智

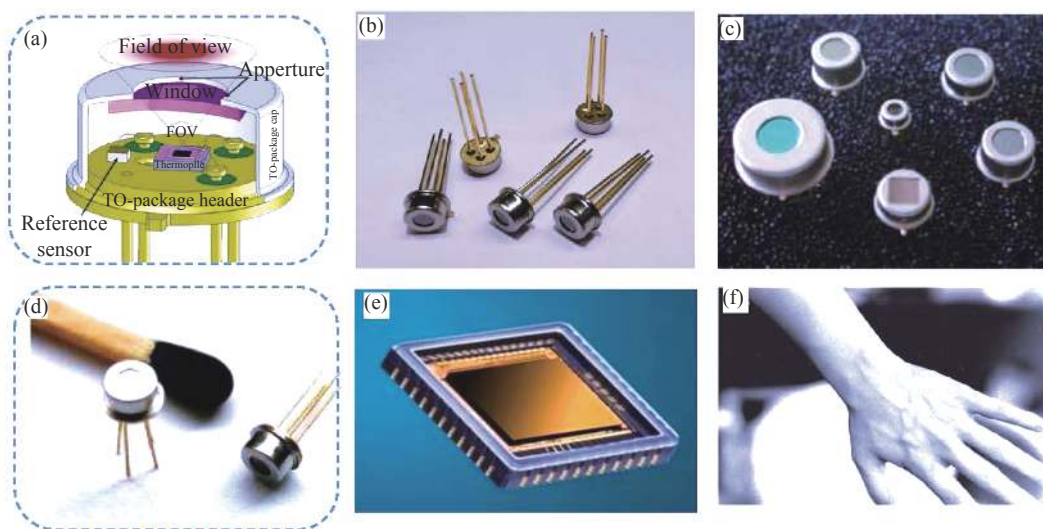


图 4 热电堆探测器/热释电探测器/InGaAs 探测器。(a) 热电堆探测器示意图;(b) 亚泰光电热电堆传感器;(c) 海曼公司的热释电探测器产品;(d) 海曼公司的热释电探测器产品和火柴头对比;(e) Lynred 的 SW InGaAs 探测器;(f) 中国科学院上海技术物理研究所 1.7 μm 近红外 InGaAs FPA 成像图片

Fig.4 Thermopile detector/pyroelectric detector/InGaAs detector. (a) Schematic diagram of thermopile detector; (b) Thermopile sensor of Yatai photoelectric Company; (c) Pyroelectric detector product of Heimann company; (d) Comparison of pyroelectric detector product and match head of Heimann company; (e) SW InGaAs detector of Lynred; (f) Image of 1.7 μm near infrared InGaAs focal plane arrays produced by Shanghai Institute of Technology and Physics, Chinese Academy of Sciences

能建筑应用而生,虽然分辨率不高,但是便宜且易于集成,非常适合于那些无需高分辨率图像和高帧频的应用。国内也有很多公司在进行热电堆探测器的研发,比如亚泰光电、众智、西人马、新威等公司都推出了热电堆传感器。图 4(b) 是国内亚泰光电公司的热电堆产品。

#### 1.4 热释电红外探测 (pyroelectric)

热释电探测器是基于热释电效应而开发出的一种探测器,热释电探测器检测的是辐射量的变化,主要进行的是运动检测。在多种类型的热探测器中,热释电探测器的探测效率是很突出的,并且热释电的响应频率很宽(可以全波段响应)、响应时间短<sup>[37]</sup>。在室温 300 K 下工作的 MWIR 红外  $\text{NaNO}_2$  热释电探测器的探测率最大可以到  $2.12 \times 10^8$  Jones<sup>[38]</sup>。热释电红外探测器不需要制冷,因此省去了制冷设备,这就使得热释电红外探测器制作成本低、结构紧凑、体积小、携带方便;而对各个波段的波长都有响应的特性,使得热释电探测器具有很高的通用性;热释电的敏感元是一个纯电容型的输出阻抗,可以有效控制器件的噪声带宽。

早在 20 世纪 80 年代,大阪大学就有团队采用热释电  $\text{LiTaO}_3$  单晶和 Si CCD 相结合的方法,研制了一种面阵规格为  $64 \times 32$  的室温型 CCD 红外图像传感器<sup>[39]</sup>。经过数十年的发展,红外热释电红外探测技术取得了长足的发展,这些研究成果被广泛应用在军事、安全、医疗健康等领域。图 4(c) 和 (d) 是海曼公司的热释电产品。

目前热释电传感器行业最具代表性两家厂家是英国 Pyreos 公司和德国 InfraTec 公司。Pyreos 公司<sup>[40]</sup>推出了多种规格的热释电传感器,其响应波段可以覆盖  $1.3 \sim 25 \mu\text{m}$ 。2017 年 Pyreos 公司推出全球尺寸最小的数字热释电传感器 ezPyro,这是一款世界上最小的拥有数字接口的热释电红外传感器,尺寸为  $5.65 \text{ mm} \times 3.7 \text{ mm} \times 1.55 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),响应时间在毫秒量级,而其他同类产品的响应时间为几秒钟;InfraTec 公司<sup>[41]</sup>的热释电探测器材料为单晶钽酸锂,其产品采用模块化结构设计,除了常规的热释电探测器外,还覆盖了

多通道和可调波长探测器。InfraTec 公司开发的基于 MOEMS 可调波长产品以及多通道红外探测器,可以用于气体分析、火焰检测和光谱仪等。

#### 1.5 InGaAs

InGaAs 短波红外探测器技术最开始是为了军用而开发的,由于在常温工作时 InGaAs 探测器性能好,相对于制冷型器件,InGaAs 短波红外探测技术在红外探测领域是不容忽视的。近年,国内外都加大了 InGaAs 探测器的开发和应用力度。2016 年中国科学院上海技术物理研究所<sup>[42]</sup>报道了一种的 InGaAs 近红外 FPA,其响应波段为  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ,面阵规格  $800 \times 2$ 、 $320 \times 256$ 、 $640 \times 512$ 、 $1024 \times 128$ 、 $4000 \times 128$ ,在室温时,其暗电流密度小于  $5 \text{ nA/cm}^2$ ,器件的峰值探测率大于  $5 \times 10^{12}$  Jones。图 4(e) 和 (f) 是中国科学院上海技术物理研究所的 InGaAs 近红外 FPA 产品和成像图。

法国的 Lynred、美国 FLIR 等公司也推出多款短波红外 InGaAs 产品。FLIR 公司<sup>[24]</sup>型号为 Tau SWIR 的热像仪机芯采用高分辨率 InGaAs  $640 \times 512 / 15 \mu\text{m}$  FPA,可有效降低噪声的板载相关双采样(CDS),能够满足任何任务的要求。美国的 Sensor Unlimited 公司生产的  $320 \times 256 \sim 1280 \times 1024$  阵列规格的 FPA,器件的  $D^*$ 高达  $12.9 \times 10^{13}$  Jones。法国的 Lynred<sup>[26]</sup> $640 \times 512 / 15 \mu\text{m}$  的 FPA,其量子效率(QE)在  $1 \mu\text{m}$  到  $1.6 \mu\text{m}$  波段大于 70%,在 0.2 V 的偏压时暗电流为 30 fA。

## 2 新型非制冷红外探测技术

尽管  $\text{VO}_x$ 、 $\alpha\text{-Si}$  的非制冷 Bolometer 探测器的商业化取得了很大的成功,但红外热像仪仍在寻找一个价格更合理、操作更方便、性能更优良的热像仪平台。

光电子学、电子、量子计算等领域的最新进展,也有望为红外探测器领域带来突破性进展。胶体半导体量子点、量子线碳纳米管和具有组合结构的石墨烯,这些组合结构可能使光电导体、光电二极管或场效应晶体管的高效益探测器设计成为可能。这些技术以及类似的技术使得未来实现高速、紧凑、轻量化和低成本传感器工作成为可能。文中介绍了一些典型的进展,汇总表如表 3 所示。



表 3 新型非制冷红外探测器汇总

Tab.3 Summary of new uncooled infrared detectors

Material	Material characteristics or functions	Device type	Device performance	Ref.
Silicon	Very low power consumption	CMOS-SOI-NEMS	Reduced power consumption and highly adaptable	[43]
VO <sub>x</sub> +Au	Enhanced absorption	Bolometer	At wavelengths $\lambda = 4.8 \mu\text{m}$ and $\lambda = 9 \mu\text{m}$ with the absorption magnitudes more than 0.98 and 0.94; tunable dual-band absorption peaks can be achieved.	[44]
VO <sub>x</sub> +Au	Modulation wavelength	Bolometer	The peak wavelength can be tailored from 2.4 to 10.2 $\mu\text{m}$ .	[45]
$\alpha$ -Si +Au	Enhanced absorption	Bolometer	NEP: 100 pW/Hz <sup>1/2</sup> , $D^* > 5 \times 10^7$ Jones	[46]
Si	Ultra-thin, highly-doped	Bolometer	Fast and highly-sensitive	[47]
Polycrystalline films of Mn-Co-Ni-O	High TCR, low excess noise	Bolometer	At 30 Hz, noise equivalent temperature: $2.1 \times 10^{-7}$ K/Hz <sup>1/2</sup> , responsivity: 330 V/W, detectivity: $0.6 \times 10^8$ cm Hz <sup>1/2</sup> /W, noise equivalent power: $3.7 \times 10^{-10}$ W/Hz <sup>1/2</sup>	[48]
Si <sub>x</sub> Ge <sub>y</sub> O <sub>1-x-y</sub>	High TCR and a low corresponding resistivity can be achieved using various compositions.	Bolometer	TCR: -3.95%/K, the TCR can be increased and resistivity can be decreased by optimizing the film contents at low oxygen concentration	[49]
Graphene	With a variety of reported photodetectors ranging from visible to THz frequencies	Bolometer	TCRs up to 900%/K, and the ability to resolve temperature variations down to 15 $\mu\text{K}$ .	[50]
Graphene	Can be synthesized inexpensively via a non-toxic process	Photodetector	Modulates the back-gate voltage to increase the photoresponse by a factor of approximately 600 compared to that for a conventional graphene photodetector.	[51]
HgTe CQD	Tunable optical response and the ease of fabrication	CQD detectors	Have peak $D^*$ of $7.5 \times 10^{10}$ Jones at 2.2 $\mu\text{m}$ at room temperature.	[52]
SiN <sub>x</sub>	Has a bent cantilever due to the micromachining techniques	Optical readout FPA	The curvature radius of the multilayer cantilever and the optical sensitivity of the system have increased 5 times and 5.74 times.	[53-54]
InAsSb nanowire	On InP substrate	Nanowire Photodetector	The photodetectors comprised nanostructured photoabsorbers, n-InAsSb/p-InP (nanowire substrate) p-n heterojunctions, and 3-D plasmonic gratings. Spanning the entire MWIR regime from 3 to 5 $\mu\text{m}$	[55]
InAs nanowire	A rectification ratio greater than 300 at room temperature	Heterojunctions photodetector	The dark current density is 130 mA/cm <sup>2</sup> at a temperature of 300 K and a reverse bias of 0.5 V.	[56]
PbSe	Low cost, the major choice for mid-IR sensing applications operating in the 1-5 $\mu\text{m}$ spectral range	Photoconductive	$D^*$ : $4.2 \times 10^{10}$ Jones	[57]

2.1 超结构超表面

超结构能有效的提高器件波段选择吸收。图 5 介绍了几种典型的超表面结构。Qi Li<sup>[44]</sup> 等提出了一种于表面等离子体共振的吸收层, 对中波红外 (MWIR) 和长波红外 (LWIR) 波段吸收率有明显的增强作用。该周期性结构是由金圆形图案组成, 位于 SiN/VO<sub>2</sub>/SiN 夹层结构的顶层。通过模拟表明, 该吸收体在波长为 4.8  $\mu\text{m}$  和 9  $\mu\text{m}$  处, 吸收率分别大于 98% 和 94%。要实现可调谐的双频吸收峰值, 可以通过改变图形的

直径和周期来实现。

Kaikai Du<sup>[45]</sup> 等人提出了一种基于超材料吸收器的非制冷 Bolometer, 吸收峰可达到 90%, 通过调整金盘的几何形状, 可以将吸收波长从 2.4  $\mu\text{m}$  调整至 10.2  $\mu\text{m}$ 。

Aapo Varpula<sup>[46]</sup> 等人设计了一种 30  $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$  的非制冷长波红外 Bolometer, 它能够兼容 CMOS 工艺, 并且热时间常数很小 (67  $\mu\text{s}$ )。在上面生长一层 24.5  $\mu\text{m} \times 24.5 \mu\text{m}$ 、厚度为 30 nm 厚的低热容金属栅吸收

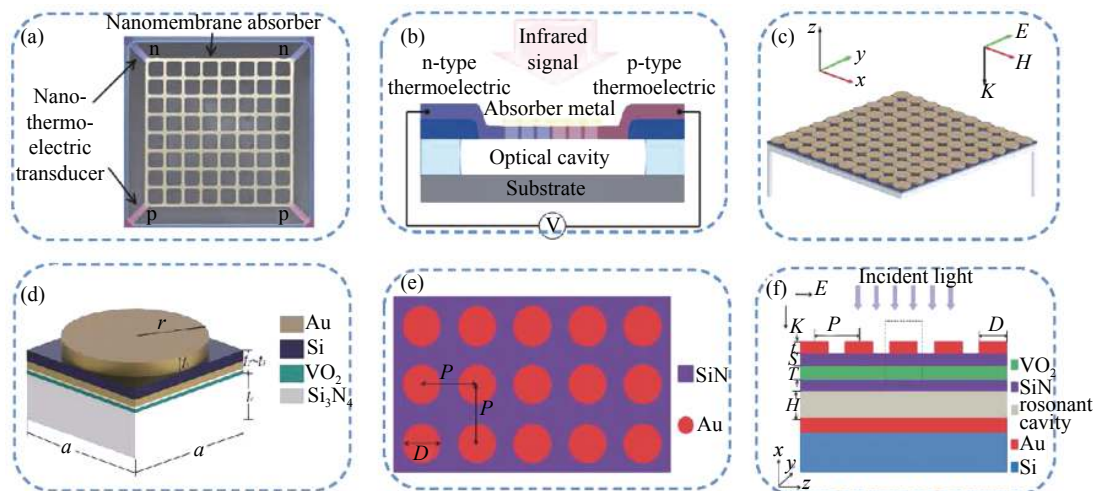


图 5 几种超表面结构。(a) 网格型超表面俯视图; (b) 网格型超表面器件结构示意图; (c) 圆盘型超表面示意图; (d) 圆盘型超表面局部示意图; (e) 双频带吸收器结构的俯视图; (f) 双频带吸收器结构示意图;

Fig.5 Several metasurface structures. (a) Top view of a grid-type metasurface; (b) Schematic diagram of a grid-type metasurface device; (c) Schematic diagram of a disk-type metasurface; (d) Partial schematic diagram of a disk-type metasurface; (e) Top view of the dual-band absorber structure; (f) Schematic diagram of the dual-band absorber structure

层 (TiW), 这层吸收层和下面的光学谐振腔以及背反射层共同组成了一个  $1/4$  波长谐振腔。理论上, 该探测器的  $NEP$  可以到低于  $100 \text{ pW/Hz}^{1/2}$ ,  $D^*$  大于  $5 \times 10^7 \text{ Jones}$ 。

### 2.2 Bolometer 新材料

尽管非制冷 Bolometer 的商业化取得了成功, 但探索性能更好、价格更低廉的新型热敏材料的脚步一直未停歇。目前广泛使用的  $\alpha$ -Si 制备的辐射热计, 虽具有成本效益, 但速度较慢且灵敏度较低。Aapo Varpula<sup>[47]</sup> 等人证明了超薄、高掺杂的硅膜可用于制造快速且高度灵敏的热电 Bolometer。计算结果显示, 更大面阵规模的探测器, 仅受背景辐射限制, 而不受探测器内部噪声的限制。

中国科学院上海技术物理研究所的黄志明<sup>[48]</sup> 团队对 Mn-Co-Ni-O 薄膜材料和探测器进行了研究, 薄膜材料的电阻率约为  $260 \Omega \cdot \text{cm}$ , TCR 系数约为  $-3.9\%/K$ ; 器件的响应率和探测率为  $323 \sim 335 \text{ V/W}$ 、 $D^*$  为  $0.59 \times 10^8 \sim 0.61 \times 10^8 \text{ Jones}$ 。

对  $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_{1-x-y}$  材料的研究也是另一个热门方向。Lutful Hai<sup>[49]</sup> 等人通过射频磁控溅射系统, 在通  $\text{Ar/O}_2$  的氛围下用两个独立的硅靶和锗靶同共溅制备  $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_{1-x-y}$  薄膜, 通过调节组份可以改变材料的 TCR 和电阻,  $\text{Si}_{0.054}\text{Ge}_{0.877}\text{O}_{0.069}$  的 TCR 可以到

$3.5\%/K$ , 电阻率可以到  $629 \Omega \cdot \text{cm}$ 。Koppula<sup>[58]</sup> 等人对  $\text{Si}_x\text{Ge}_y\text{O}_{1-x-y}$  的 Bolometer 进行了研究, 发现增加超结构后, 电阻率降低了 2.2~5.3 倍, TCR 提高了  $6\% \sim 10\%$ 。像素尺寸为  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  的 Bolometer, 最高电压响应率为  $4.37 \times 10^4 \text{ V/W}$ 、探测率为  $1.19 \times 10^9 \text{ Jones}$ 。真空退火后最低噪声为  $1.2 \times 10^{-16} \text{ V}^2/\text{Hz}$ 。

### 2.3 石墨烯

随着石墨烯等超材料技术的发展, 能够在大部分甚至全部红外波段工作的宽波段红外探测技术受到越来越多的关注。

2017 年, U.Sassi<sup>[50]</sup> 等人报道了一种石墨烯中波探测器, 通过一种特殊的浮动金属结构, 将电荷集中在石墨烯通道的顶部栅极电容器上, 从而使 TCR 达到  $900\%/K$ , 并且能够识别的温度变化为  $15 \mu\text{K}$ 。

2020 年, 日本的 Shimatani<sup>[51]</sup> 报道了一种基于热释电效应的长波红外 (LWIR) 石墨烯光电探测器。器件使用铌酸锂 ( $\text{LiNbO}_3$ ) 衬底, 通过衬底的热释电效应增强光栅, 来产生光栅效应。与传统的石墨烯光电探测器相比, 这种有效的调节背栅电压可以增加大约 600 倍的光响应。该研究结果有助于今后实现高响应率、低成本的光电探测器在热成像、医疗保健和气体分析等领域的应用。

近些年, 美国、新加坡等国的研究团队都不同程

度上取得了突破,进一步验证了其独特的性能特点和潜在的技术优势。这些新的红外探测器主要通过材料的纳米级特性以及结构的有序设计来实现红外探测,通常具有工作温度高(不需要低温制冷)、灵敏度高许多潜在的技术特性。虽然目前还有各种各样的缺陷和不足,但是其未来的发展和应用潜力不可估量,有可能给传统的红外/光电探测器技术领域带来根本性的变革。

## 2.4 量子点

量子点由于其特殊的性质和低廉的制作成本而吸引了众多研究者的关注。2019年,芝加哥大学的

Tang 等人<sup>[52]</sup>提出了一种用 HgTe 胶体量子点制作的柔性红外探测器,该探测器具有机械柔韧性,  $D^*$ 高(2.2  $\mu\text{m}$  处  $D^*$ 为  $7.5 \times 10^{10}$  Jones), 响应时间短(约为 260 ns), 可以用于敏感的红外电子眼中。图 6(a)、(b) 和 (c) 是该探测器的结构和成像图。同年,该作者还提出一种双波段的 HgTe 胶体量子点探测器<sup>[59]</sup>, 该探测器为叠层结构, 两种尺寸的 HgTe 量子点为 SWIR (<2.5  $\mu\text{m}$ ) 和 MWIR(3~5  $\mu\text{m}$ ), 通过改变偏压的极性和大小, 双频探测器可在 SWIR 模式和 MWIR 模式之间快速切换。

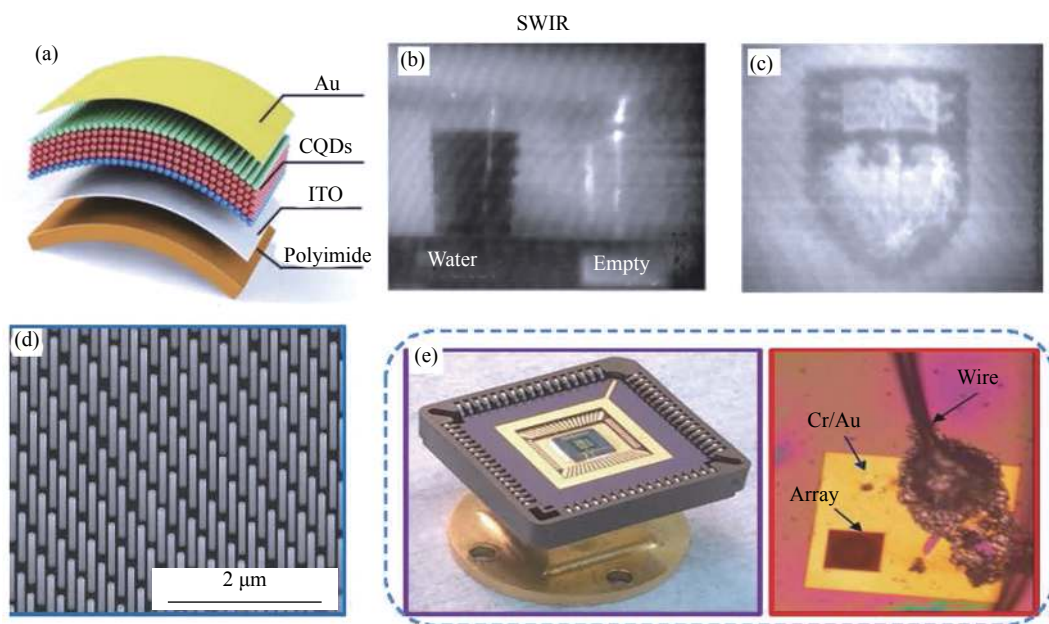


图 6 新型非制冷红外探测器<sup>[52,56]</sup>。(a) 柔性 HgTe CQDs 光电探测器的器件结构图; (b) 两个有水和没有水的塑料杯的 SWIR 图像; (c) 芝加哥大学印刷徽标的 SWIR 图像; (d) InP (111) B 衬底上生长的 InAs 纳米线阵列; (e) 100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  纳米线阵列引线键合的视图;

Fig.6 New uncooled infrared detector<sup>[52,56]</sup>. (a) Illustration of the device architecture of flexible HgTe CQDs photovoltaic detectors; (b) SWIR images of two plastic cups with and without water; (c) SWIR images of a printed logo of University of Chicago; (d) As-grown InAs nanowire arrays on InP (111) B substrate; (e) Wire-bonded close-up view of 100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  nanowire array

2020年, Sean Hinds 等人<sup>[60]</sup>首次提出了阵列规格为 1920×1080 的胶体量子点扩展短波红外 (eSWIR) 相机, 波长从 300 nm 到 2100 nm, 像元间距为 15  $\mu\text{m}$ 。在室温下工作时, 探测率为  $1 \times 10^{12}$  Jones, 暗电流为 32 fA。这种方法制备的探测器, 探测能力仅次于 MCT, 而且器件的暗电流和量子效率还有改进空间。这项技术在将来很有可能用于与 MCT、InSb 等热像仪相提并论。

根据 Image Sensors World 的报道<sup>[61]</sup>, 比利时的

IMEC(Interuniversity Microelectronics Centre) 在 2019 年开发的第一代量子点 SWIR 阵列探测器, 其阵列规格为 758×512, 像元间距为 5  $\mu\text{m}$ , 在 1450 nm 波长达到的外量子效率大于 20%。而第二代芯片目前经过测试, 其像素间距将低至 1.8  $\mu\text{m}$  (典型 InGaAs 探测器的像素间距在 15  $\mu\text{m}$  到 20  $\mu\text{m}$  之间)。

## 2.5 双材料的新型非制冷探测器

双材料制成的悬臂梁非制冷红外探测器制造工艺可以完全与常规的集成电路制造工艺兼容, 理论

上,它的 NETD 可以做到很小<sup>[62]</sup>,这样就能降低 FPA 的成本。我国很早就开展了相关工作的研究,中科大的 Zhang 团队<sup>[53-54]</sup>提出了一种光-机械式的非制冷红外探测器,这种探测器是由热膨胀系数不同的两种材料制成,当探测器吸收红外辐射时,热膨胀系数不同的两种材料会发生热致弯曲效应。当辐射功率不同,其弯曲的程度也会不同,这个弯曲量可以通过光学读出的方法进行读出。新成立的澳大利亚 Calumino 公司<sup>[63]</sup>也推出了一种用于物联网的双材料新型非制冷探测器,其像元间距为  $36 \times 16$  的 FPA 利用悬臂结构,通过光学或电容变化读出,器件的 NETD 小于 100 mK。这种探测器的价格非常有优势,主要用于包括安全尤其是老年人的安全等。

## 2.6 其他新型探测器

除了上面列举的应用外,国内外学者还致力于研究一些新型的探测器。加州大学的 Ren<sup>[55-56]</sup>等人报道了一种 InP 衬底上的 InAs 和 InAsSb 纳米线制备的中波红外室温光电探测,主要包括纳米结构的光吸收器、n-InAsSb /p-InP(纳米线基板)p-n 异质结和 3-D 等离子体微元光栅。这项工作为非制冷纳米线光电探测器对工业和研究环境中的中波红外甚至更长的波长下的进行光电探测等应用奠定了基础。图 6(c) 和 (d) 就是该探测器阵列和键合示意图。

Weng<sup>[57]</sup>等人介绍了其在非制冷中波红外光导型 PbSe 探测器和光伏型 PbSe 探测器的新方法方面的研究进展。光导型 PbSe 探测器的探测率达到  $4.2 \times 10^{10}$  Jones, 基于对光导型探测器的研究,开发了一种使用 PbSe 微晶生产光伏性探测器的新方法,初步研究的结果非常令人鼓舞。

美国加州理工大学 Harry Atwater 教授<sup>[64]</sup>研究团队介绍了一种带有纳米光子共振结构的热电探测器。该器件通过光学结构,对入射光进行选择吸收和局部汇聚,响应率可以达到 38 V/W,其响应速率比传统热电器件的快 10 到 100 倍。

## 3 结论和展望

经过近十年的发展,国内非制冷红外探测器技术进步显著,某些技术上甚至可以和国外厂家的主流产品相提并论。随着国家对红外探测技术的重视,特别是 2020 年新冠疫情的刺激,未来对红外热像仪的需

求会不断扩大,热成像技术和应用市场还有更多的潜力有待挖掘。

第一个大趋势是将成像和光学部分都移动到晶圆级制造,使得大批量生产的优势最大化,增加规模经济效益。第二大趋势是减小传感器的芯片尺寸,因此,一场缩小像素间距的竞争将持续进行。第三个大趋势是低成本、低分辨率传感器市场的需求。由于低端市场扩张,为低成本、低分辨率传感器打开市场机遇的大门。因此,低成本技术,如热电辐射计、热敏二极管或热电堆,有可能在市场上成功推出产品,与低分辨率 Bolometer 进行竞争。

非制冷探测器除了不断降低成本、缩小像元尺寸、扩大面阵规格外,还需要不断探索新的探测机制和探测方式,其中包括新材料、新器件、新机理的探索,为未来多样化的需求奠定基础。

## 参考文献:

- [1] Hubert Jerominek, Francis Picard, Swart Nicholas R, et al. Micromachined uncooled  $\text{VO}_2$ -based IR bolometer arrays[C]//Proc of SPIE, 1996, 2746: 60-71.
- [2] Lei S Y. Uncooled infrared focal plane array imaging in China[C]//Proc of SPIE, 2015, 9451: 945119.
- [3] Balcerak R. Uncooled infrared sensors: rapid growth and future perspective[C]//Proc of SPIE, 2000, 4028:36-39.
- [4] Takasawa S. Uncooled LWIR imaging: applications and market analysis[C]//Proc of SPIE, 2015, 9481: 94810H.
- [5] Wood R A, Han C J, Kruse P W. Integrated uncooled infrared detector imaging arrays[C]//IEEE, 1992: 132-135.
- [6] Wang Chenggang, Song Guang. Development of sensitive film technology for uncooled infrared focal plane array detector [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(8): 927-929. (in Chinese)  
王成刚, 宋广. 非制冷红外焦平面探测器热敏薄膜技术研究进展[J]. *激光与红外*, 2017, 47(8): 927-929.
- [7] Bañobre A. Silicon based uncooled microbolometer[D]. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 2018.
- [8] Lamsal C, Ravindra N M. Simulation of spectral emissivity of vanadium oxides ( $\text{VO}_x$ )-based microbolometer structures [J]. *Emerging Materials Research*, 2014, 3(4): 194-202.
- [9] Bhan R K, Saxena R S, Jalwania C R, et al. Uncooled infrared microbolometer arrays and their characterisation techniques [J]. *Defence Science Journal*, 2009, 59(6): 580-589.
- [10] Sherif Sedky P F, Kris Baert, Lou Hermans, et al. Characterization and optimization of infrared poly SiGe

- bolometers [J]. *IEEE Transactions On Electron Devices*, 1999, 46(4): 675-682.
- [11] Richards P L. Bolometers for infrared and millimeter waves [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(1): 1-24.
- [12] Feng T, Jin W Q, Si J J. Uncooled infrared focal plane detector and its technology development trends [J]. *Infrared Technology*, 2015(3): 177-184. (in Chinese)  
冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态[J]. *红外技术*, 2015(3): 177-184.
- [13] Yu Baijun. Design of readout circuit of vanadium oxide uncooled infrared focal plane detector[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.(in Chinese)  
俞白军. 氧化钒非制冷红外焦平面探测器读出电路设计[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [14] Trouilleau C, Fièque B, Noblet S, et al. High-performance uncooled amorphous silicon TEC less XGA IRFPA with 17  $\mu\text{m}$  pixel-pitch[C]//Proc of SPIE, 2009, 7298: 72980Q.
- [15] Carapezza E M, Grealish K, Kacir T, et al. An advanced infrared thermal imaging module for military and commercial applications[C]//Proc of SPIE, 2005, 5796: 186-192.
- [16] Benirschke D, Howard S. Characterization of a low-cost, commercially available, vanadium oxide microbolometer array for spectroscopic imaging [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(4): 040502.
- [17] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Challenges of small-pixel infrared detectors: a review [J]. *Rep Prog Phys*, 2016, 79(4): 046501.
- [18] Gong H, Wu N, Ni Y, et al. Design, fabrication and testing of 17  $\mu\text{m}$  pitch 640 $\times$ 480 uncooled infrared focal plane array detector[C]//Proc of SPIE, 2015, 9674: 96740W.
- [19] Andresen B F, Fulop G F, Hanson C M, et al. Novel vacuum packaged 384 $\times$ 288 broadband bolometer FPA with enhanced absorption in 3-14  $\mu\text{m}$  wavelength[C]//Proc of SPIE, 2017, 10177: 101771R.
- [20] Kimata M, Tokuda T, Tsuchinaga A, et al. Vacuum packaging technology for uncooled infrared sensor [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2010, 5(2): 175-180.
- [21] Wang Qiang, Zhang Yougang. Research progress of the packaging techniques for uncooled infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(9): 837-842. (in Chinese)  
王强, 张有刚. 非制冷红外焦平面探测器封装技术研究进展[J]. *红外技术*, 2018, 40(9): 837-842.
- [22] Esashi M. Wafer level packaging of MEMS [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(7): 073001.
- [23] Dumont G, Rabaud W, Baillin X, et al. Pixel level packaging for uncooled IRFPA[C]//Proc of SPIE, 2011, 8012: 80121I.
- [24] FLIR Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30]<https://www.flir.cn/browse/camera-cores-amp-components/thermal-camera-cores/lwir/>.
- [25] DRS. Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30].<https://www.leonardodrs.com/commercial-infrared/products/thermal-imaging-detectors/>.
- [26] Lynred.Products[EB/OL].(2020-10-15)[2020-10-30]<https://www.lynred.com/products>.
- [27] SCDUSA-IR.Products[EB/OL].(2020-10-15)[2020-10-30]<https://scdusa-ir.com/products/>.
- [28] Iray.USA-IR. Products[EB/OL].(2020-10-15)[2020-10-30]<http://www.iraytek.com/products/tcq/%CE%BCm12/>.
- [29] DALI. Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30]<http://www.dali-tech.com/products/13>.
- [30] 高芯科技. Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30]<http://www.gst-ir.com/product/index/mid/27.html>.
- [31] GWIC. Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30]<http://www.gwic.com.cn/product.html>.
- [32] Ishikawa T, Ueno M, Endo K, et al. Low-cost 320 $\times$ 240 uncooled IRFPA using a conventional silicon IC process[C]//Proc of SPIE, 1999, 3698.
- [33] Ueno M, Kosasayama Y, Sugino T, et al. 640 $\times$ 480 pixel uncooled infrared FPA with SOI diode detectors[C]//Proc of SPIE, 2005, 5783:566-577.
- [34] Fujisawa D, Hanaoka M, Kosasayama Y, et al. Development of new pixel structure for beyond 12  $\mu\text{m}$  pixel pitch SOI diode uncooled IRFPAs[C]//Proc of SPIE, 2020, 111407: 114071A.
- [35] Wang S D, Xu D H, Xiong B, et al. Infrared detection system based on MEMS thermopile sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2017, 36(2): 107-113. (in Chinese)  
王司东, 徐德辉, 熊斌, 等. MEMS热电堆传感器的红外探测系统[J]. *传感器与微系统*, 2017, 36(2): 107-113.
- [36] Gao X. Design of CMOS compatible micromechanical thermopile infrared detector[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.  
高璇. CMOS兼容的微机械热电堆红外探测器的设计[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [37] Ivanov S D, Kostsov E G. Thermal detectors of uncooled multi-element infrared imaging arrays. I. Thermally insulated elements [J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2016, 51(6): 601-608.
- [38] Hyseni G, Caka N, Hyseni K. Infrared thermal detectors parameters: Semiconductor bolometers versus pyroelectrics [J].

- WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 2010, 9: 238-247.
- [39] Okuyama M, Togami Y, Hamakawa Y, et al. Pyroelectric infrared-CCD image sensor using LiTaO<sub>3</sub> [J]. *Sensors and Actuators*, 1989, 16(3): 263-271.
- [40] Pyreos. Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30] <https://pyreos.com/>.
- [41] InfraTec. Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30]<https://www.infratec.cn/>.
- [42] Shao Xiumei, Gong Haimei, Li Xue, et al. Research progress of high-performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(8): 629-635. (in Chinese)  
邵秀梅, 龚海梅, 李雪, 等. 高性能短波红外InGaAs焦平面探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2016, 38(8): 629-635.
- [43] Saraf T, Brouk I, Bar-Lev Shefi S, et al. CMOS-SOI-MEMS uncooled infrared security sensor with integrated readout[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2016, 4(3): 155-162.
- [44] Li Q, Yu B Q, Li Z F, et al. Surface plasmon-enhanced dual-band infrared absorber for VO<sub>x</sub>-based microbolometer application [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(8): 085202.
- [45] Du K, Li Q, Zhang W, et al. Wavelength and thermal distribution selectable microbolometers based on metamaterial absorbers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-8.
- [46] Varpula A, Tappura K, Tiira J, et al. Nano-Thermoelectric Infrared Bolometer [J]. *arXiv*, 2019.
- [47] Varpula A, Grigoras K, Tappura K, et al. Silicon based nano-thermoelectric bolometers for infrared detection [J]. *Proceedings*, 2018, 2(13): 894.
- [48] Ouyang C, Zhou W, Wu J, et al. Uncooled bolometer based on Mn<sub>1.56</sub>Co<sub>0.96</sub>Ni<sub>0.48</sub>O<sub>4</sub> thin films for infrared detection and thermal imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(2): 022105.
- [49] Lutful Hai M, Cheng Q, Hesani M, et al. Amorphous SixGe<sub>1-x-y</sub>O<sub>1-x-y</sub> thin films for uncooled infrared microbolometers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 95: 227-235.
- [50] Sassi U, Parret R, Nanot S, et al. Graphene-based mid-infrared room-temperature pyroelectric bolometers with ultrahigh temperature coefficient of resistance [J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14311.
- [51] Shimatani M, Fukushima S, Okuda S, et al. Room temperature long-wavelength infrared graphene photodetectors using photogating via the pyroelectric effect[C]//Proc of SPIE, 2020, 11407: 1140717.
- [52] Tang X, Ackerman M M, Shen G, et al. Towards infrared electronic eyes: flexible colloidal quantum dot photovoltaic detectors enhanced by resonant cavity [J]. *Small*, 2019, 15(12): e1804920.
- [53] Fu J, Shang H, Shi H, et al. Design optimization and performance analysis of deformed optical readout focal plane array [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(6): 065012.
- [54] Shi H, Zhang Q, Qian J, et al. Optical sensitivity analysis of deformed mirrors for microcantilever array IR imaging [J]. *Opt Express*, 2009, 17(6): 4367-4381.
- [55] Ren D, Azizur-Rahman K M, Rong Z, et al. Room-temperature midwavelength infrared inassb nanowire photodetector arrays with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivation [J]. *Nano Lett*, 2019, 19(5): 2793-2802.
- [56] Ren D, Meng X, Rong Z, et al. Uncooled photodetector at short-wavelength infrared using InAs nanowire photoabsorbers on InP with p-n heterojunctions [J]. *Nano Lett*, 2018, 18(12): 7901-7908.
- [57] Weng Binbin, Qiu Jijun, Zhao Lihua, et al. Recent development on the uncooled mid-infrared PbSe detectors with high detectivity[C]//Proc of SPIE, 2014, 8993: 899311.
- [58] Koppula A K R K, Abdullah A A, Liu T, et al. Material response of metasurface integrated uncooled silicon germanium oxide SixGe<sub>1-x-y</sub>O<sub>1-x-y</sub> infrared microbolometers[C]//Proc of SPIE, 2019, 11002: 110021L.
- [59] Tang X, Ackerman M M, Chen M, et al. Dual-band infrared imaging using stacked colloidal quantum dot photodiodes [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 277-282.
- [60] Hinds S, Klem E, Gregory C, et al. Extended SWIR high performance and high definition colloidal quantum dot imagers[C]//Proc of SPIE, 2020, 11407: 1140707.
- [61] WorldIS[EB/OL].(2020-10-15)[2020-10-30]<https://www.image-sensors.com/image-sensors-europe/event-overview>.
- [62] Datskos P, Rajic S, Lavrik N. Performance of uncooled microcantilever thermal detectors[C]//Proc of SPIE, 2005, 5721: 136-150.
- [63] Calumino. Products[EB/OL]. (2020-10-15)[2020-10-30][www.calumino.com](http://www.calumino.com).
- [64] Mauser K W, Kim S, Mitrovic S, et al. Resonant thermoelectric nanophotonics [J]. *Nat Nanotechnol*, 2017, 12(8): 770-775.



**第一作者简介：**余黎静 (1986-), 女, 博士生, 高级工程师。2006 年本科毕业于北京理工大学应用物理系, 同年进入昆明物理研究所工作, 2012 年硕士毕业于昆明物理研究所。一直从事光电材料和器件的研究工作, 参与和负责了多个重大项目的研究。所参与或负责的项目, 获夜视集团科技成果二等奖两次, 获兵器工业集团公司科技进步三等奖一次, 获云南省科技进步一等奖一次。Email: yulijing29@163.com



**通讯作者简介：**唐利斌 (1978-), 男, 博士 (后), 研究员级高级工程师 (正高), 博士生导师。在昆明物理研究所从事光电材料与器件的研究工作, 科技带头人。云南省创新团队带头人, 中国兵器创新团队带头人, 中国兵器领军科学家培养计划入选者, 云南省技术创新人才, 云岭学者, 《红外技术》编委。在《ACS Nano》等国内外期刊发表 161 篇研究论文, 论文被引用 4930 余次。申报专利 63 项, 其中授权 26 项。指导毕业 20 余名博士、硕士, 多名研究生获国家奖学金。Email: sscitang@163.com



**通讯作者简介：**郝群, 女, 北京理工大学特聘教授, 博士生导师。长期在新型光电成像传感技术和光电精密测试技术领域从事教学和科研工作, 主要研究方向包括新型光电成像技术、仿生光电感测技术、抗振干涉测量技术及仪器等方面。主持国家自然科学基金仪器专项/重点项目、基础加强计划项目、国防基础科研重大/重点项目、国家 863 项目等多项国家级项目。研究成果获得省部级技术发明一等奖 3 项、省部级其它奖项多项; 发表 SCI 论文 90 余篇, 出版专著 3 部; 国际会议上作特邀报告二十余次; 授权国家发明专利 90 余项。获国家教育教学成果二等奖 1 项, 省部级教育教学成果一等奖 2 项、二等奖 3 项。Email: qhao@bit.edu.cn