

# 百万像素胶体量子点中波红外焦平面阵列 成像技术(特邀)

谭伊玫<sup>1,2</sup>, 徐莹莹<sup>1,3</sup>, 张硕<sup>2</sup>, 刘雁飞<sup>2</sup>, 郝群<sup>1</sup>, 唐鑫<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;

<sup>2</sup>中芯热成科技(北京)有限责任公司, 北京 100176;

<sup>3</sup>中国计量科学研究院, 北京 100029

**摘要** 红外探测及成像具有广泛用途,在红外制导、夜视侦察、安防监控及危化品探测等方面发挥了重要作用。现有红外成像焦平面大多由碲镉汞、二类超晶格、铋化钢等块体半导体材料制成,通过倒装键合的方法实现块体材料与硅基读出电路的信号传输。倒装键合对准困难、操作复杂、对设备依赖性较强,难以满足焦平面阵列规模不断增加和像元尺寸不断减小的制备需求。为解决红外焦平面阵列规模提升的瓶颈,采用碲化汞胶体量子点,通过液相旋涂的方法,突破倒装键合限制,实现硅基读出电路直接片上集成。所制备焦平面阵列规模达 $1280 \times 1024$ ,像元间距为 $15 \mu\text{m}$ , $80 \text{ K}$ 工作温度下探测截止波长为 $4.8 \mu\text{m}$ ,响应非均匀性为 $9\%$ ,有效像元率为 $99.96\%$ ,最低噪声等效温差达 $30 \text{ mK}$ ,展现了良好的成像性能。

**关键词** 焦平面阵列成像; 胶体量子点; 百万像素; 捕获型探测器

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232494

## Megapixel Colloidal Quantum-Dot Mid-Wave Infrared Focal-Plane Array Imaging Technology (Invited)

Tan Yimei<sup>1,2</sup>, Xu Yingying<sup>1,3</sup>, Zhang Shuo<sup>2</sup>, Liu Yanfei<sup>2</sup>, Hao Qun<sup>1</sup>, Tang Xin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Zhongxinrecheng Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;

<sup>3</sup>National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**Abstract** Infrared detection and imaging are crucial in a plethora of applications, such as missile guidance, night vision reconnaissance, security monitoring, and hazardous chemical detection. Current infrared imaging focal planes primarily utilize bulk semiconductor materials such as mercury cadmium telluride, type-II superlattice, and indium antimonide. These materials require flip bonding to electrically couple with silicon-based readout circuits. However, the complexity of this coupling process increases sharply as the array size increases and the pixel size decreases. This study proposes an innovative solution to overcome the flip bonding limitation by using mercury telluride colloidal quantum-dots. By employing a liquid phase spin coating method, we can achieve direct on-chip integration of silicon-based readout circuits. The scale of the resulting focal-plane array reached an impressive  $1280 \times 1024$ , with a pixel spacing of  $15 \mu\text{m}$ . Operating at a temperature of  $80 \text{ K}$ , the detection cut-off wavelength was found to be  $4.8 \mu\text{m}$ . The response nonuniformity stood at  $9\%$ , while the effective pixel rate was measured at  $99.96\%$ . Furthermore, the lowest noise equivalent temperature difference reached  $30 \text{ mK}$ , demonstrating a good imaging performance.

**Key words** focal-plane array imaging; colloidal quantum-dot; megapixel; trapping-mode photodetector

## 1 引言

中波红外( $3 \sim 5 \mu\text{m}$ )成像可昼夜工作,其被动成像的特性具有隐蔽性高等优点,广泛用于夜视等场景。

除此之外,中波红外波段覆盖了甲烷等易燃易爆气体的吸收特征峰,在危化品监测方面发挥了重要作用<sup>[1-3]</sup>。现有红外成像器件主要依赖碲镉汞、二类超晶格、铋化钢等块体半导体。由于晶格匹配、应力失调等

收稿日期: 2023-11-14; 修回日期: 2023-12-18; 录用日期: 2023-12-21; 网络首发日期: 2023-12-25

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA0717600)、国家自然科学基金重点项目(62035004)、中央高校基本科研业务费专项

通信作者: \*xintang@bit.edu.cn

问题,块体半导体材料无法在硅基读出电路表面实现直接生长与电学耦合。所制备块体半导体探测器件需要经过像素化、钢柱生长、对准及加压绑定等过程,才能与读出电路对应像素输入电极实现电学互连。随着阵列规模增加,倒装键合成功率急剧降低,极大限制了焦平面像素规模及成像分辨率的提升。

胶体量子点(CQDs)是一种新兴的液态纳米半导体晶体,具有量子限域效应,通过液相合成的方法制备,可以通过调控合成温度和时间控制吸收光谱,光谱调控范围宽,可以通过简单的加工工艺和较低的成本实现材料的大规模合成。通过调控其尺寸,可以在一定范围内对其带隙进行精准调控<sup>[4-5]</sup>。通过对材料体系及合成方法性能的不断提升,胶体量子点的探测及吸收范围从早期的可见光(CdTe、CdSe)、近红外(PbS、PbSe)逐步拓展至短波红外及中红外波段(HgTe、HgSe)。由于胶体量子点独特的液相合成特性,可以采用滴涂、旋涂、喷涂、提拉法<sup>[6-8]</sup>等方式实现与硅基读出电路的直接电学互连,避免了倒装键合工艺中复杂的对准及加压绑定等流程。所制备焦平面阵列规模及像元尺寸仅取决于读出电路微纳加工精度,因此可实现低成本、大面阵、高均一性成像。

在众多量子点体系中,碲化汞量子点(HgTe CQDs)在中波红外探测及成像方面展现了优异性能。通过银离子掺杂方法,碲化汞量子点中波红外光电二极管性能得到了大幅提升,比探测率达 $10^9$  Jones<sup>[9]</sup>。经过与等离子体纳米光学结构耦合,器件吸收效率可以实现2倍提升,在220 K温度下,实现背景限红外探测性能<sup>[10]</sup>。2019年,通过将短波红外与中波红外量子点垂直堆叠,并在界面处引入空穴重掺杂,形成“n-p-n”型双光电二极管结构,通过两电极结构形式结合偏压极性、偏压幅值调控,实现了短波红外及中波红外的双色探测<sup>[11]</sup>。除单点探测器,碲化汞量子点成像焦平面阵列也获得了较快发展。2022年,北京理工大学唐鑫教授课题组<sup>[6]</sup>报道了8 in晶圆(1 in=2.54 cm),采用阵列规模为 $320 \times 256$ 的读出电路,像元与像元之间的间距为 $30 \mu\text{m}$ ,探测器在室温下能够达到的波长为 $2.5 \mu\text{m}$ 。同年,该团队<sup>[12]</sup>还同时报道了阵列规模为 $320 \times 256$ 、像元间距为 $30 \mu\text{m}$ 的紫外-短波红外双波段焦平面探测器,将微纳加工技术引入器件制备过程。2023年,北京理工大学唐鑫教授课题组<sup>[13]</sup>发表了一篇有关HgTe量子点中波红外焦平面探测器的文章,采用阵列规模为 $640 \times 512$ 的读出电路,其中探测器能够达到的截止波长为 $4.6 \mu\text{m}$ ,通过对探测器性能进行表征和对成像效果进行分析可知胶体量子点与硅基读出电路能够直接耦合集成,突破了倒装键合体制,进一步验证了工艺方法及技术的可行性。

本文报道了首个百万像素HgTe量子点捕获型中波红外焦平面探测器(工作温度为80 K),阵列规模为 $1280 \times 1024$ ,像元与像元之间的间距为 $15 \mu\text{m}$ ,单个像

元开孔尺寸为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。在硅基读出电路上制备不同厚度的本征和n型量子点薄膜,两膜层之间产生载流子的移动和扩散,形成接触电势差和内建电场。该电场的存在能够进一步加速驱动探测器光生载流子的分离,能够使两膜层内源源不断地产生载流子,增加了探测器的工作时间和寿命,并且提高了载流子产生的数量,进而增加探测器的量子效率<sup>[6,10]</sup>。600 °C黑体作为测试光源,由测试结果可知探测器性能和成像效果较优,主要体现在以下参数,探测器的整体平均峰值比探测率可达 $4 \times 10^{10}$  Jones,噪声等效温差为30 mK( $F$ 数为2),探测器的均匀性良好,响应非均匀性和有效像元率分别为9%和99.96%。该探测器在中波红外成像领域表现出优异的性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 量子点焦平面阵列制备

HgTe量子点的材料特性以及合成方法已有多篇文章可供参考<sup>[14-16]</sup>。下面介绍材料合成的主要方法和思路:将量子点合成所需的无机汞盐及单质碲溶解到作为反应溶剂的油胺中,将混合溶液放到玻璃瓶中并在热板上加热,热板温度达100 °C以后,采用移液枪注入三辛基膦。根据所需的合成波段控制合成的反应温度和时间,能够控制量子点生长尺寸的大小,进而实现对所需量子点波长的准确调控,此过程需要在无水无氧环境中实现,避免引入合成杂质和水汽以影响合成材料波长和性能。室温下吸收截止波长为 $3.8 \mu\text{m}$ 的探测器在80 K下的响应截止波长达 $4.8 \mu\text{m}$ 。

通过混合液相配体交换的方法控制HgTe量子点的掺杂。在此过程中:首先需要将原来的油胺配体置换出来,使用移液枪向HgTe量子点中加入 $\beta$ -巯基乙醇,超声1 min取下层液体;将HgTe量子点从非极性溶剂转移到极性溶剂中,极性溶剂使用的是N,N-二甲基甲酰胺溶液;之后需要对量子点极性进行调控,采用液相法进行掺杂,引入电子或空穴,向本征型量子点/DMF溶液中加入 $\text{HgCl}_2$ 或 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 制备n型和p型HgTe量子点。

使用捕获模式制备的HgTe中波红外探测器的三维仿真结构如图1(a)所示,捕获型器件的本征层和n型层之间载流子的掺杂不同,产生的载流子的垂直移动形成电场,红外光激发产生电子和空穴,在两个叠加电场的驱动下,产生电子和空穴的移动,伴随着光电流的产生。而垂直的内建电场此时发挥了重要作用,它将光生电子捕获到n型量子点层内,阻止了电子与空穴的复合,减少了光生电子的流失,提高探测器响应增益。探测器像素区中的每个像素点都有两个电极。内外部电场相结合促进了载流子的驱动、传输和收集,不仅减少了损耗还有效地提高了探测器的量子效率<sup>[14]</sup>。

HgTe量子点硅基兼容的特性可以实现与读出电路信号直接耦合,能够不受制备规模的限制实现大面

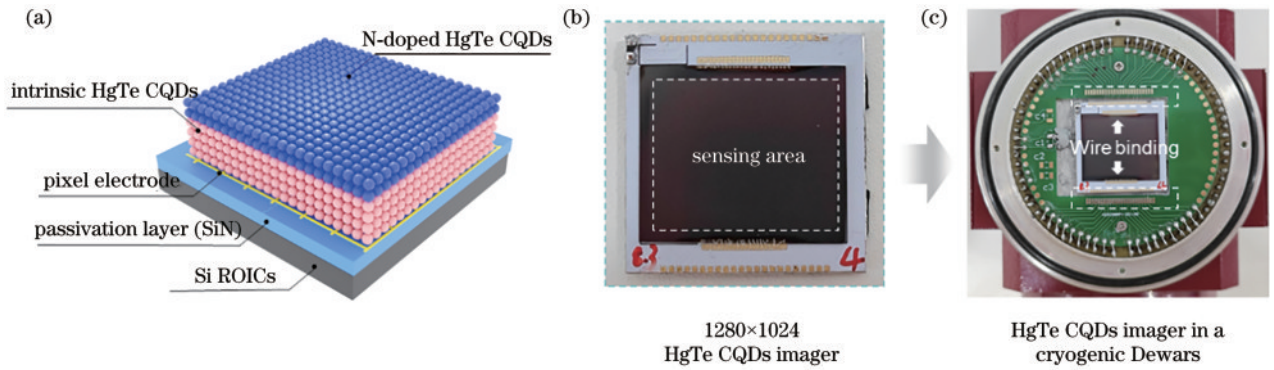


图 1 所提探测器。(a)结构示意图;(b)信号引出示意图;(c)杜瓦测试封装示意图

Fig. 1 Proposed detector. (a) Structure diagram; (b) signal extraction diagram; (c) Dewar test package diagram

阵的晶圆制备,其简单易行的制备方式能够在低成本下实现大规模制备,提高了制备产量。介绍器件的制备流程:首先进行基底的清洗,将晶圆放入丙酮中,超声清洗 5 min 后取出用氮气吹干;再将晶圆放入 IPA 溶液中超声清洗 5 min,取出用氮气吹干;溶液清洗结束之后将晶圆放入等离子机清洗 5 min 以去除晶圆表面水氧杂质;基底清洗结束之后进行膜层的制备,将晶圆放到匀胶机的吸盘上,使用 10 mL 的移液枪吸取一定量的本征型 HgTe 量子点滴到晶圆表面,使量子点能够铺满整个晶圆,使用匀胶机 500 r/min 低转速将滴涂到晶圆上的量子点均匀平铺到晶圆表面,再使用高转速 3000 r/min 将晶圆表面多余的材料甩出,这时在晶圆表面会形成一层均匀的膜层。重复上述过程旋涂多层本征型 HgTe 量子点。本征型量子点达到适当的厚度之后旋涂多层 n 型 HgTe 量子点,使得本征型量子点薄膜与 n 型量子点薄膜的厚度比为 9:1。膜层制备结束之后,使用划片机将单个芯片从 8 in 晶圆上裁切下来。如图 1(b)和图 1(c)所示,对从晶圆上取下的芯片进行封装前的中测,以便筛选较优性能的探测器,使用导热硅胶将芯片粘贴到 PCB 铝转接板上,导热硅胶固化之后,使用铝丝键合机在芯片引脚和转接板引脚之间键合上铝丝,能够稳定地引出信号。捕获型 HgTe 中波红外焦平面探测器需要降温使用,因此测试过程需要在真空杜瓦中进行,同样使用铝线键合机对 PCB 铝转接板与杜瓦引脚进行信号引出,真空泵获取杜瓦真空,向液氮杜瓦中倒入液氮进行降温测试。为了更好地屏蔽环境中热源、可见光及短波红外光的影响,确保实验结果的准确性,在液氮杜瓦瓶中安装 F 数为 2 的带有 3.7~4.8 μm 带通滤光片的冷屏屏蔽噪声信号。

### 2.2 捕获型量子点焦平面阵列性能表征

对本文捕获型 HgTe 中波红外焦平面探测器进行性能表征,采用校准后的黑体作为光源,探测器与黑体发射腔内部光源之间的距离约为 42 cm,能够保证黑体辐射源均匀地辐照到探测器像素区。探测器连接到源表以及测试系统将信号采集读出,得到相关的数据。探测器测试表征计算的内容包括器件的光响应、比探

测率、噪声电压、响应不均匀性、有效像元率等。

对于光响应,采集 600 °C 黑体照射时焦平面阵列中单个像元的光响应电压值并计算出探测器的平均响应电压值。平均响应电压  $\bar{V}_s$  的公式为

$$\bar{V}_s = \frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_s(i, j), \quad (1)$$

式中:  $M$  为像元的总行数,  $N$  为像元总列数;  $d$  为死像元的个数;  $h$  为过热像元的个数。黑体辐射源均匀地辐照到探测器的像素区之后,入射光子被吸收,产生光生电子及空穴。捕获型探测器能够将内外部电场结合起来,增强了载流子移动的动力。在电场的驱动下,光生载流子被累积到读出电路内部的积分电容上,经过放大电路和模数转换电路转变成电压值输出。图 2(a)为探测器光响应的二维分布图和像素点统计直方图,由图可知像素区内各个像素点的光响应较强。像素点统计直方图的整体宽度能够表明器件的均匀性,直方图较窄说明焦平面阵列中单个像素之间响应相差不大,说明探测器响应均匀性较高,进一步说明读出电路上的膜层制备均匀,符合硅基兼容的特性。

采集 600 °C 黑体下的像元电压响应率和像元噪声电压值,结合单个像元器件面积,能够计算出单个像元器件探测率,平均峰值探测率  $\bar{D}_{bb}^*$  的计算公式为

$$\bar{D}_{bb}^* = \frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left[ \sqrt{\frac{A_D}{2\pi}} \times \frac{R(i, j)}{V_N(i, j)} \right], \quad (2)$$

式中:  $R(i, j)$  为像元电压响应率;  $V_N(i, j)$  为像元噪声电压;  $A_D$  为焦平面像元面积。图 2(b)为探测器比探测率的二维分布图和像素点统计直方图,探测器的峰值比探测率可达  $4 \times 10^{10}$  Jones。

红外焦平面阵列的非均匀性反映了探测器各像元响应不一致,其中读出电路和探测器之间的耦合是影响探测器非均匀性的重要因素。由于 HgTe 量子点硅基兼容的特性使其可与读出电路直接耦合,简化制备流程,提高了器件膜层的均匀性,也进一步降低了探测器的非均匀性,文中探测器的响应非均匀性为 9%。

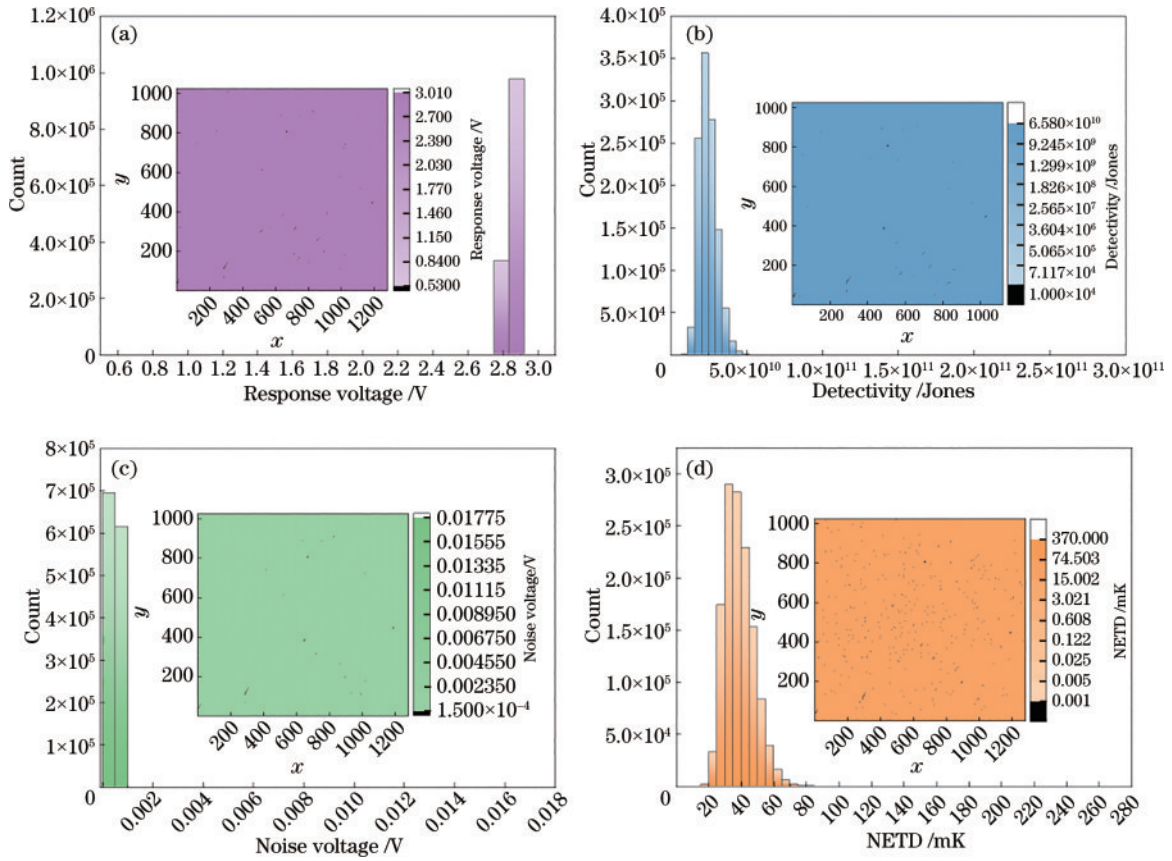


图 2 探测器的相关参数分布和响应统计直方图。(a)光响应;(b)比探测率;(c)噪声;(d)噪声等效温差

Fig. 2 Distribution of relevant parameters and response statistical histograms of the detector. (a) Light response; (b) specific detectability; (c) noise; (d) noise equivalent temperature difference

通过代入 600 °C 黑体下器件平均响应率和像元电压响应率, 响应不均匀性 (UR) 的表达式为

$$V_{UR} = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [R(i,j) - \bar{R}]^2} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:  $\bar{R}$  为平均响应率;  $R(i,j)$  为像元电压响应率。

探测器的噪声作为衡量探测器性能和成像质量的重要指标, 主要由 3 个方面决定: 一是读出电路本身有积分电容和放大电路等引入的噪声; 二是在制备过程中探测器像素点薄膜的均匀性; 三是读出电路与量子点薄膜之间耦合均匀性。探测器的噪声是影响探测器成像效果的重要因素, 当探测器噪声小且均匀时, 器件的成像效果均匀性好、图像噪点少、对比度高。晶圆级旋涂工艺提高了单片器件薄膜厚度均匀性, HgTe 量子点硅基兼容的特性也提高了耦合均匀性, 大大降低了器件噪声。器件的噪声分布图和统计直方图如图 2(c) 所示, 由器件的统计直方图可知, 直方图较窄说明焦平面阵列中单像元器件的噪声相近且均匀, 其结果与图 2(a) 的器件光响应直方图相对应, 能够进一步说明捕获型 HgTe 量子点中波红外探测器的硅基兼容性好, 器件制备均匀性好, 能够实现焦平面阵列中像元器件之间噪声和响应均匀一致性高。平均噪声电压

$\bar{V}_N$  的计算公式为

$$\bar{V}_N = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_N(i,j), \quad (4)$$

式中:  $V_N(i,j)$  为像元噪声电压。器件平均噪声电压为 0.5 mV。

图 3 为 600 °C 黑体下, 探测器盲元和过热像元分布图, 蓝色代表死像元, 红色代表过热像元, 器件有效像元率为 99.96%。符合式 (5) 的像元为死像元  $d$ :

$$R(i,j) - \frac{1}{2} \bar{R} < 0. \quad (5)$$

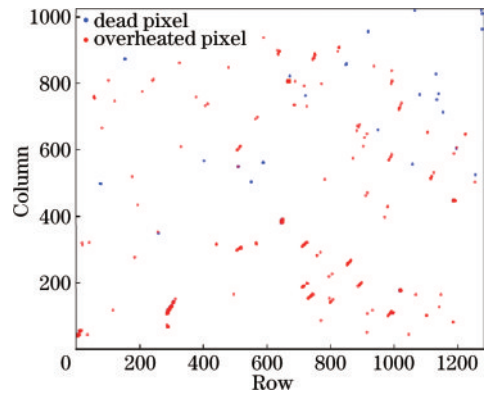


图 3 探测器的盲元及过热像元分布

Fig. 3 Dead and overheated pixel distributions of the detector

符合式(6)的像元为过热像元  $h$ :

$$V_N(i, j) - 2\bar{V}_N > 0. \quad (6)$$

噪声等效温差是红外热探测器重要指标之一。探测器通过物体温度辐射成像,探测器本身与周围辐射环境将产生噪声,对探测器的成像质量有很大的影响。当系统输出的信噪比为 1 时,黑体目标和黑体背景的温差称为噪声等效温差,反映了探测器的温度灵敏度。当探测器噪声温差变小时,其灵敏度也不断提高。该探测器的性能表征是采用 20 °C 和 35 °C 温度下的面源黑体。捕获型探测器的平均噪声等效温差 (NETD) 的计算公式为

$$V_{NETD} = \frac{1}{M \times N - (d + h)} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{T - T_0}{V_s(i, j) / V_N(i, j)}, \quad (7)$$

式中:  $V_N(i, j)$  为低温下输出的像元噪声电压值;  $V_s(i, j)$  为黑体温差下的响应电压值;  $T_0$  为低的黑体温度;  $T$  为高的黑体温度。

验证器件膜层中本征层和 n 型层的厚度对器件性能的影响,以确定最优膜厚比。在器件制备过程中使用台阶仪对本征层厚度和总膜厚进行测试,可计算得出 n 型层的厚度,得到本征层和 n 型层的厚度比 ( $T_{intrinsic}:T_n$ ),不同膜厚比下器件的 NETD 如图 4 所示。由图 4 可知:本征层和 n 型层的膜厚比在 9:1 时器件 NETD 最小,器件的温度灵敏度最优;随着 n 型层厚占比不断增加,器件的噪声增加,NETD 增加;当膜厚比小于 9:1 时,随着膜厚比的减小,器件响应减小,NETD 增加。由实验结果可知,器件制备过程中本征层和 n 型层的膜层厚度比最优值为 9:1,这时器件的 NETD 达到最小值。

### 2.3 量子点焦平面探测器成像结果

中波红外热成像探测器反映了场景和人物的温度

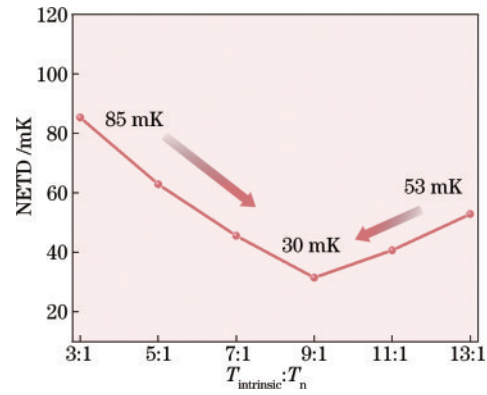


图 4 探测器本征层和 n 型层膜厚比与 NETD 的关系  
Fig. 4 Relationship between the thickness ratio of detector intrinsic layer and n-type layer and NETD

分布,其成像质量的影响因素有焦平面阵列的响应非均匀性、响应漂移性、盲元、目标物的辐射对比度等。需要利用后端电路和算法进行进一步处理,红外图像处理技术主要包括图像的非均匀性矫正、盲元检测与补偿、图像直方图增强及图像降噪等。由上述探测器性能测试结果可知,该探测器具有均匀性高、有效像元率高、噪声均匀且较低、响应较强等特点,因此在成像过程中只需进行两点非均匀性矫正。采用基于参照源的非均匀矫正方法,在面源黑体 20 °C 和 35 °C 的辐射下分别测试探测器的响应值,然后进行归一化处理,使得相同辐射条件下的探测器响应曲线重合于一条曲线,得到清晰的成像效果。

使用捕获型 HgTe 量子点中波红外探测器进行人和物体的红外热成像。图 5 为人体及人手持冷饮和冷热水的中波热成像。如表 1 所示,本文介绍的捕获型



图 5 百万像素量子点中波红外热成像  
Fig. 5 Mid-wave infrared thermal imaging with megapixel quantum dot detector

表 1 本文工作与之前量子点焦平面阵列以及主流红外相机性能指标对比

Table 1 Results of this paper compared with those of previous quantum-dot focal plane arrays and mainstream infrared cameras

Ref.	Material	Wavelength / $\mu\text{m}$	Resolution	Detectivity /Jones	NETD /mK
[17]	PbS CQDs	0.4–2.0	388 $\times$ 288	10 <sup>12</sup>	–
[18]	PbS CQDs	0.7–1.4	640 $\times$ 512	2.1 $\times$ 10 <sup>12</sup>	–
[19]	HgTe CQDs	1.8	640 $\times$ 512	–	–
[6]	HgTe CQDs	2.5	320 $\times$ 256	8 $\times$ 10 <sup>10</sup>	–
[20]	HgTe CQDs	4.5	320 $\times$ 256	–	102–199
[13]	HgTe CQDs	4.6	640 $\times$ 512	2 $\times$ 10 <sup>10</sup>	51
[21]	V0 <sub>x</sub>	7.5–14	640 $\times$ 512	–	40
[21]	InSb	3.5–5.0	640 $\times$ 512	–	27
This work	HgTe CQDs	4.8	1280 $\times$ 1024	4 $\times$ 10 <sup>10</sup>	30

HgTe 量子点中波红外探测器与 PbS 量子点探测器和 HgTe 量子点短、中波光导型焦平面阵列以及主流品牌 FLIR 的红外相机相比较,相关核心指标具有领先优势。探测器的阵列面积较大,80 K 温度下探测波长可达 4.8  $\mu\text{m}$ ,NETD 达 30 mK。

HgTe 量子点中波红外焦平面探测器相比传统半导体红外材料探测器,具有制备技术转换效率高和成本低的特点。传统半导体红外材料需要在晶格匹配的衬底上进行外延生长,采用倒装键合技术进行硅基读出电路的集成。HgTe 量子点中波红外焦平面探测器的制备过程简单并且可以晶圆级制备,大大缩短了生产时间,提高了制备效率和成品率。制备器件所用设备成本较低,进而减少了设备维护修缮成本,该制备技术转换效率高,成本低,具有很大的优势。

### 3 结 论

报道了捕获型 HgTe 量子点中波红外焦平面探测器的性能参数和成像能力,证明了量子点与硅基兼容的特性,展示了探测器红外热成像能力。采用液相旋涂方法,突破了传统块体材料倒装键合限制,实现量子点材料与硅基读出电路的直接片上集成。与之前量子点焦平面探测器相比,所提器件展现出领先的优势,制备的焦平面阵列规模达 1280 $\times$ 1024,像元间距为 15  $\mu\text{m}$ 。探测器在 80 K 工作温度下展现出优异的性能,探测截止波长为 4.8  $\mu\text{m}$ ,噪声等效温差为 30 mK ( $F=2$ ),具有均匀的高响应,非均匀性低至 9%,有效像元率高达 99.96%,峰值比探测率可达 4 $\times$ 10<sup>10</sup> Jones,并且通过实验可知器件最优本征层和 n 型层的膜厚比为 9:1。所提器件能够实现晶圆级集成,解决了红外焦平面阵列规模提升瓶颈,在热成像和探测领域展现了良好的前景。

### 参 考 文 献

- [1] 祁金勇, 郑家鑫, 张鑫, 等. 飞秒激光制备硬脆材料红外微光学器件及应用(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(4): 04024505.
- [2] 胡明灯, 熊雄, 吴建乐, 等. 红外探测器冷屏设计[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 0904001.
- [3] 刘洋, 李博, 顾国超, 等. 轻小型短波红外自准直高光谱成像仪设计[J/OL]. 光学学报: 1-16[2023-12-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20231214.1037.066.html>.
- [4] Liu Y, Li B, Gu G C, et al. Small short wave infrared light autocollimation hyperspectral imager design[J/OL]. Acta Optica Sinica: 1-16[2023-12-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1252.O4.20231214.1037.066.html>.
- [5] Keuleyan S, Lhuillier E, Guyot-Sionnest P. Synthesis of colloidal HgTe quantum dots for narrow mid-IR emission and detection[J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(41): 16422-16424.
- [6] Zhang H Z, Peterson J C, Guyot-Sionnest P. Intraband transition of HgTe nanocrystals for long-wave infrared detection at 12  $\mu\text{m}$ [J]. ACS Nano, 2023, 17(8): 7530-7538.
- [7] Zhang S, Bi C, Qin T L, et al. Wafer-scale fabrication of CMOS-compatible trapping-mode infrared imagers with colloidal quantum dots[J]. ACS Photonics, 2023, 10(3): 673-682.
- [8] Tilley R D, Saito S. Preparation of large scale monolayers of gold nanoparticles on modified silicon substrates using a controlled pulling method[J]. Langmuir, 2003, 19(12): 5115-5120.
- [9] Luo Y N, Tan Y M, Bi C, et al. Megapixel large-format colloidal quantum-dot infrared imagers with resonant-cavity enhanced photoresponse[J]. APL Photonics, 2023, 8(5): 056109.
- [10] Ackerman M M, Tang X, Guyot-Sionnest P. Fast and sensitive colloidal quantum dot mid-wave infrared photodetectors[J]. ACS Nano, 2018, 12(7): 7264-7271.
- [11] Tang X, Ackerman M M, Guyot-Sionnest P. Thermal imaging with plasmon resonance enhanced HgTe colloidal quantum dot photovoltaic devices[J]. ACS Nano, 2018,

- 12(7): 7362-7370.
- [11] Tang X, Ackerman M M, Chen M L, et al. Dual-band infrared imaging using stacked colloidal quantum dot photodiodes[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(4): 277-282.
- [12] Zhang S, Bi C, Tan Y M, et al. Direct optical lithography enabled multispectral colloidal quantum-dot imagers from ultraviolet to short-wave infrared[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(11): 18822-18829.
- [13] 谭伊玫, 张硕, 罗宇宁, 等. 640×512 规模碲化汞量子点中波红外焦平面阵列(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(7): 20230377.  
Tan Y M, Zhang S, Luo Y N, et al. 640 × 512 HgTe colloidal quantum-dot mid-wave infrared focal plane array (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(7): 20230377.
- [14] Guyot-Sionnest P. Electrical transport in colloidal quantum dot films[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2012, 3(9): 1169-1175.
- [15] Keuleyan S, Lhuillier E, Brajuskovic V, et al. Mid-infrared HgTe colloidal quantum dot photodetectors[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(8): 489-493.
- [16] Peterson J C, Guyot-Sionnest P. Room-temperature 15% efficient mid-infrared HgTe colloidal quantum dot photodiodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(15): 19163-19169.
- [17] Goossens S, Navickaite G, Monasterio C, et al. Broadband image sensor array based on graphene-CMOS integration[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 366-371.
- [18] Liu J, Liu P L, Chen D Y, et al. A near-infrared colloidal quantum dot imager with monolithically integrated readout circuitry[J]. *Nature Electronics*, 2022, 5(7): 443-451.
- [19] Gréboval C, Darson D, Parahyba V, et al. Photoconductive focal plane array based on HgTe quantum dots for fast and cost-effective short-wave infrared imaging[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(26): 9359-9368.
- [20] Buurma C, Pimpinella R E, Ciani A J, et al. MWIR imaging with low cost colloidal quantum dot films[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9933: 993303.
- [21] TELEDYNE FLIR[EB/OL]. [2023-12-15]. <https://www.flir.cn/>.