

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2023)06-1630-32

论文引用格式: Xu J T, Wang X Y, Wang T D, Chen X, Song Z X, Lei H, Liu G and Wen D S. 2023. Review on optical visual sensor technology. Journal of Image and Graphics, 28(06):1630-1661(徐江涛, 王欣洋, 王廷栋, 陈忻, 宋宗玺, 雷浩, 刘罡, 汶德胜. 2023. 光学视觉传感器技术研究进展. 中国图象图形学报, 28(06):1630-1661)[DOI: 10.11834/jig.230039]

光学视觉传感器技术研究进展

徐江涛¹, 王欣洋², 王廷栋³, 陈忻⁴, 宋宗玺⁵, 雷浩⁶, 刘罡⁶, 汶德胜^{6*}

1. 天津大学微电子学院, 天津 300072; 2. 长春长光辰芯光电技术有限公司, 长春 130033;
3. 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 重庆 401332; 4. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
5. 中国科学院西安分院, 西安 710043; 6. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119

摘要: 视觉传感是人类感知外界、认知世界的主要途径, 研究表明人类获取的外界信息大约有 80% 来自于视觉。作为感知外界信息的“电子眼球”, 视觉传感器是消费电子、机器视觉、安防监控、科学探测和军事侦察等领域的核心器件。近年来视觉传感器技术发展迅速, 不同类型的传感器从不同维度提供丰富的视觉数据, 不断增强人类感知与认知能力, 视觉传感器研究工作具有重要的理论与应用需求。本报告以典型光学视觉传感器技术为主线, 通过综合国内外文献和相关报道, 从 CCD 图像传感器、CMOS 图像传感器、智能视觉传感器以及红外图像传感器等研究方向, 梳理论述近年来光学视觉传感器技术的发展现状、前沿动态、热点问题和趋势。

关键词: 光学视觉传感器; CCD 图像传感器; CMOS 图像传感器; 智能视觉传感器; 红外图像传感器

Review on optical visual sensor technology

Xu Jiangtao¹, Wang Xinyang², Wang Tingdong³, Chen Xin⁴, Song Zongxi⁵, Lei Hao⁶,
Liu Gang⁶, Wen Desheng^{6*}

1. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Gpixel Incorporation, Changchun 130033, China;
3. The 44th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 401332, China;
4. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
5. Chinese Academy of Sciences Xi'an Branch, Xi'an 710043, China;
6. Xi'an Institute of Optics and Precision, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China

Abstract: Visual sensing technique is essential for human to perceive and understand the world around them. An “electronic eyeball” can be melted into outdoor-related visual information, and visual sensors are equipped with such domains like consumer electronics, machine vision, surveillance, and academic researches. Visual sensor technology-based multiple sensors can be used to richer multi-dimension visual data, which can enhance human-related perceptive and cognitive ability. This literature review is focused on the growth of optical visual sensor technology, including such image sensors in relevance to CCD, CMOS, intelligent-visual, and infrared-context. The CMOS image sensor chip is produced in terms of CMOS technology, in which image acquisition unit and signal processing unit can be integrated into the same chip. It can be mass-produced to a certain extent. Cost-effective applications can be oriented to such aspects in related to small size, light weight, low cost and low power consumption. With the rapid development of autonomous driving, intelligent transportation, machine vision and other fields, multi-functional and intelligent CMOS image sensors with small size will become the focus of research. The emerging CCD sensor technology and its applications have been facilitating as well. The potentials of CCD

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-03-18; 预印本日期: 2023-03-25

所有作者为共同一作; *通信作者: 汶德胜 ven@opt.ac.cn

image sensor can be applied for such domains in related to remote sensing, astronomy, low light detection. In the future, the multi-spectral TDI CCD architecture based on CCD and CMOS fusion technology will be widely used. Infrared image sensor is configured and set that infrared radiation detection can be converted into physical quantity. The high-performance digital signal processing function can be integrated on the infrared focal plane. The newly infrared image sensor can be focused on larger array, higher resolution, wider spectrums, more flexible sensitivity, multi-band, and system-level chip further.

Key words: optical visual sensor; CCD image sensor; CMOS image sensor; intelligent visual sensor; infrared image sensor

0 引言

光学视觉传感器作为视觉成像装备中的核心光电子器件,使装备可以像人眼一样捕获图像信息,在工业、医疗和天文等专业影像领域中都扮演着极为重要的角色。本文从CCD图像传感器、CMOS图像传感器、智能视觉传感器以及红外图像传感器方向介绍光学视觉传感器领域的发展历史、研究现状、前沿动态、热点问题和趋势。

电荷耦合器件(charge-coupled devices, CCD)是一种以电荷包形式存贮和转移电子的半导体光电子器件,是重要的图像传感器之一。作为图像传感器领域的一次革命性突破,相对于CCD出现前已经较为成熟的传统摄像器件(如真空摄像管、热释电管和硅摄像管等),具有小体积、轻重量、低功耗、长寿命、高灵敏度以及大动态范围等诸多优点。由于其优异的性能,CCD在星载对地遥感成像、高光谱及微光成像等领域得到广泛应用。本文从多光谱TDICCD、高光谱CCD和EMCCD三方面对CCD的最新发展进行了叙述。

20世纪70年代初,CMOS图像传感器在NASA的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)制造成功;80年代末,英国爱丁堡大学成功试制出了世界第一块单片CMOS型图像传感器;2000年日本东芝公司(TOSHIBA)和美国斯坦福大学采用 $0.35\ \mu\text{m}$ 技术开发的CMOS有源像素传感器(active pixel sensor, APS)已成为开发超微型CMOS摄像机的主流产品。2012年,索尼发布了“堆叠式结构”的CMOS图像传感器芯片,将其命名为Exmor RS。2013年,三星电子首次发布ISOCELL技术,在像素单元之间加入物理屏障,能够降低约30%的光线串扰,并通过更广泛的视角来捕捉斜射光线。2017年,索尼又推出了3层堆叠式的CMOS图像传感器

芯片,该芯片在两层电路中间新加入了DRAM层,使得数据的读取更加快速。2019年,三星宣布推出全球首款硬件直出的1亿像素超清CMOS图像传感器。2021年,索尼公司宣布其已成功开发出全球首个双层晶体管像素堆叠式CMOS图像传感器技术,饱和信号量约提升至2倍,增大动态范围的同时降低了噪声。

CMOS图像传感器技术基于传感器工艺架构的不同,主要分为正照式、背照式和堆栈式图像传感器。早期的光学视觉传感器都是正照式结构,其组成结构由上到下依次是:微透镜、Bayer阵列、金属排线(电路层)、光电二极管以及衬底,由于金属排线(电路层)位于感光二极管上方,导致入射到芯片表面的光线不能完全入射到感光二极管。2008年索尼通过将传统晶圆绑定支撑硅片后进行晶圆翻转和减薄,推出了背照式CMOS架构的图像传感器,采用背照式架构,可以有效规避金属排线(电路层)对感光二极管的遮挡,使入射光线可以100%的入射到感光二极管,进一步提升了图像传感器的灵敏度。2012年索尼发布了世界第一款堆栈式图像传感器,堆栈式架构将原本在一个晶圆上的像素区域和电路区域,分别做在了两个晶圆上,并将两块晶圆绑定在一起,堆栈式架构在继承了背照式架构全部优势的基础上,进一步释放电路部分的设计优化空间,比如电路部分可以较像素部分采用更高制程的工艺,使电路部分可以更快、更高质的处理像素输出的数据。此外堆栈式架构的出现,使图像传感器的集成度得到进一步的提升,让各种强大而快速地片上图像处理功能成为可能。

CMOS图像传感器技术与性能对比如图1和表1所示。

随着图像传感器技术的快速发展,背照式及堆栈式架构已逐渐成为图像传感器的主流架构。目前手机摄像头是CMOS图像传感器的最大终端市场,

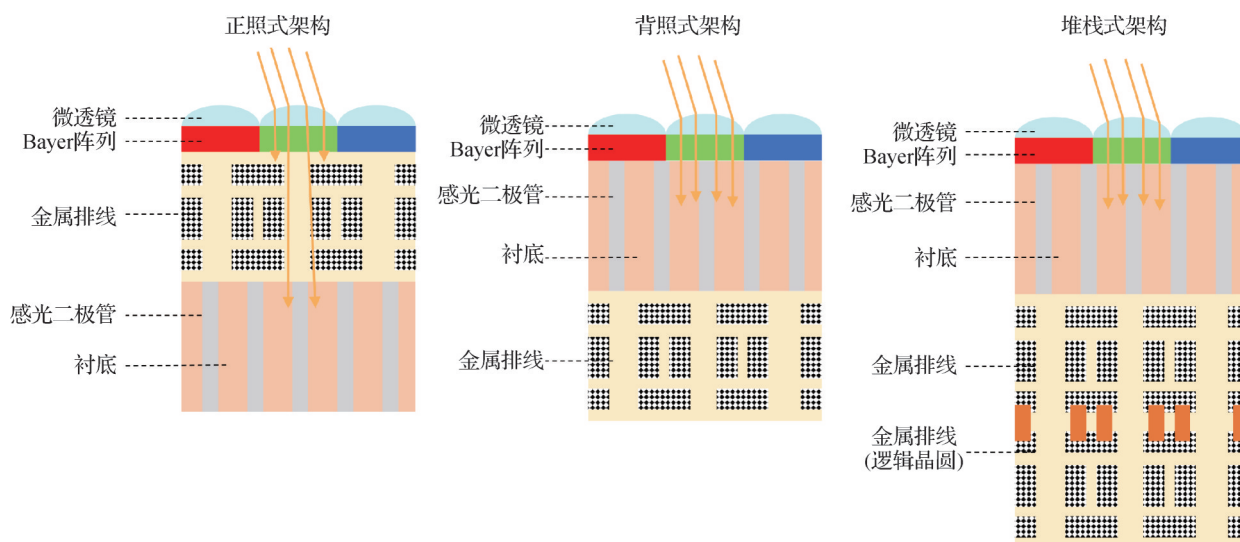


图1 不同架构的CMOS图像传感器技术

Fig. 1 CMOS image sensor technology with different architectures

表1 不同架构的CMOS图像传感器技术性能对比
Table 1 Performance comparison of CMOS image sensor technology with different architectures

序号	主要性能	正照式	背照式	堆栈式
1	填充系数	一般	100%	100%
2	量子效率	50%~70%	>85%	>85%
3	满阱	一般	一般	高
4	成像速度	一般	一般	快
5	集成度	一般	一般	高

但在汽车电子、医疗、安防、工业和物联网等领域的应用也在快速增长。手机领域追求高像素以及多功能化,像素从200、800万发展为目前的4 800万、6 400万,并且进一步向上提升。近年来手机摄像头由双摄像向多摄像过渡发展,功能上除了传统拍照,还有虚化、广角和长焦等差异化要求。安防领域对夜视、红外等要求较高,产品分辨率目前基本在200万像素(1 080 P),后续有望进一步提升至2 K/4 K。汽车领域目前对CMOS图像传感器芯片的像素要求不高,但追求芯片的可靠性与稳定性,受益于ADAS(advanced driving assistance system)、自动驾驶等技术发展趋势,汽车有望接力智能手机,为CMOS图像传感器发展贡献新动能。就工业设备而言,可以预测CMOS图像传感器在机器视觉方面的应用未来还会继续加速发展。

红外线(波长0.75~1 000 μm)是自然界中存在最为广泛的辐射,在物理学中凡是高于绝对零度的

物质都可以产生红外线。通过对红外辐射的探测可以实现对物质的探测定位、温度测量和构成分析。红外探测由于无接触、全天候、抗干扰以及作用距离远等优势,广泛应用于航空航天、生物医学、工业制造、国防军事、环境监测、光通信以及天文观测等领域。在军事上,包括对军事目标的搜索、观瞄、侦察、探测、识别与跟踪;对远、中、近程军事目标的监视、告警、预警与跟踪;在天文遥感上,用于对天体活动、水土资源进行观测;在民用领域,在工业、医学、消费电子、测试计量和科学研究等许多方面也得到广泛应用。随着智能化技术的发展,红外探测技术在自动驾驶、精准医疗等领域的应用将更广泛,地位更重要。

红外探测器是将探测到的红外辐射转换为便于计量的物理量的器件,是红外探测系统的核心。在过去的几十年里,红外探测器技术发展迅速,大量的新型材料、器件不断涌现,红外光电探测器完成了第1代(1970s—1980s)的单元、多元光导器件进行光机串/并扫描成像向第2代(1990s—2000s)扫描型红外焦平面器件、第3代(2000s—2010s)凝视型红外焦平面器件的跨越,目前正朝着以大面阵、高分辨率、宽谱段、高灵敏、多波段和系统级芯片为特征的第4代红外焦平面技术的方向发展。在红外焦平面上集成具有高性能数字信号处理功能,甚至单芯片实现多波段融合探测与识别能力。本文按照近年来红外探测器重点发展的技术方向展开介绍,包括发展情况、主要研究机构以及技术

水平。

1 国际研究现状

1.1 CCD 图像传感器

1.1.1 多光谱 TDI CCD

TDI CCD(time delay integration CCD)在扫描成像时,利用 TDI CCD 行频与扫描速度同步的关系,实现光生信号的累加,达到提高器件响应灵敏度和信

噪比的目的。

TDI CCD 最为典型的应用是作为成像器件应用于卫星遥感对地成像。通过在多个 TDI CCD 上方的增加带通的滤光片实现不同波长范围的探测,最终采用图像融合方式便可获取彩色影像。

目前国际上只有 Teledyne DALSA 公司(美国 Teledyne 下属公司,位于加拿大)提供星用多光谱 TDI CCD 产品。目前最新的多光谱 TDI CCD 产品如表 2 所示。

表 2 Teledyne DALSA 公司多光谱 TDI CCD 产品
Table 2 Teledyne DALSA multispectral TDI CCD products

型号	性能概要
IC-33-04096	分辨率:4 096 × 96 像素(全色) 5 谱段 像素尺寸:7 μm × 7 μm 背照
IC-27-12288	分辨率:12 288 × 128 像素(全色) 5 谱段 像素尺寸:7 μm × 7 μm 正照
IC-50-12288	分辨率:12 288 × 128 像素(全色) 5 谱段 像素尺寸:7 μm × 7 μm 正照 双向 TDI 扫描

可以看出,目前国际上最新的多光谱 TDI CCD 发展水平为 12 288 像素分辨率、7 μm 像素尺寸、5 谱段光谱分辨率。

国际上目前发展了一些以欧洲微电子中心(Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC)的 CCD-in-CMOS 工艺制作的单片式多光谱 TDI CCD (Bello 等,2017)为代表的新型多光谱 TDI CCD(图 2 和图 3)。通常 CCD 采用专用的工艺线制造,而其驱

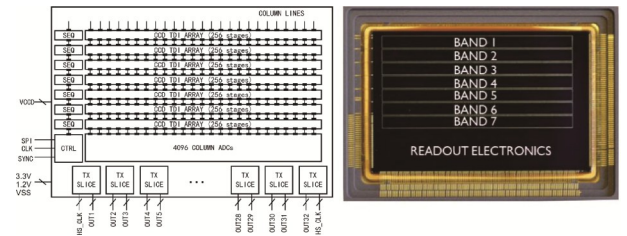


图 3 IMEC 研制的 7 谱段单片式多光谱 TDI CCD (Bello 等,2017)

Fig. 3 7-BAND monolithic multispectral TDI CCD developed by IMEC(Bello et al. ,2017)

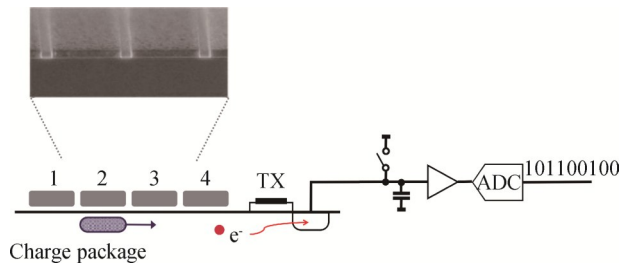


图 2 IMEC 的 CCD-in-CMOS 技术(Bello 等,2017)

Fig. 2 CCD-in-CMOS technology of IMEC (Bello et al. ,2017)

动电路采用常规的板级电路实现,因而体积大、功耗高。IMEC 采用通用的 CMOS 工艺,将驱动电路与 CCD 在单片实现,因而大大改善了器件的驱动复杂度同时降低了功耗,还可以实现片上输出信号的处理,极大改善了后续的应用复杂度。

1.1.2 高光谱 CCD

高光谱技术是利用分光棱镜或光栅等将入射光

光谱分为几十个谱段甚至上百个谱段投射到图像传感器芯片上,以精细光谱分辨力获取目标信息,从而在得到目标的图像的同时,还可获取目标的光谱信息,实现“图谱合一”的技术。

由于CCD高均匀性、高动态和介质膜系等简单的特性,在高帧频保证下,目前星用高光谱探测器芯片大多采用CCD。国际上高光谱CCD的主要供应商为Sarnoff公司。Sarnoff公司开发了系列高光谱用CCD产品(表3)。

表3 Sarnoff公司高光谱 CCD
Table 3 Sarnoff hyperspectral CCD

	型号				
	CCD180 -512-SFT	CCD180 -1M-SFT	CCD160 -256-SFT(NSX1.0)	CCD160 -256-SFT(NSX1.5)	CCD160 -256-SFT(NSX2.0)
阵列规模	512 × 512	1 024 × 1 024	2 048 × 256	2 048 × 256	4 096 × 256
像素尺寸	18 μm × 18 μm	18 μm × 18 μm	16 μm × 16 μm	16 μm × 16 μm	16 μm × 16 μm
最高帧频	500 帧/s	150 帧/s	1 000 帧/s	1 000 帧/s	1 000 帧/s
输出端口数	16	32	32	32	64
产品推出时间	2007年	2007年	2009年	2017年	2017年

CCD 160-256-SFT是Sarnoff公司最新推出的一款背照式高帧频大面阵可见光CCD,阵列规模为2 048 × 256,像元尺寸为16 μm × 16 μm,最高帧频可达到1 000 帧/s,32个输出端。

国际上高光谱CCD的发展趋势为:

1)更小像素尺寸、更高帧频。像素尺寸从18 μm发展到16 μm,帧频从500 帧/s发展到1 000 帧/s以上。支持高光谱成像仪已经由空间分辨率30 m、光谱分辨率10 nm发展到更高水平。

2)更大阵列规模。阵列规模从512 × 512发展到4 096 × 256。支持高光谱成像仪的幅宽从几十公里逐渐增大到一百公里以上。

1.1.3 EMCCD

EMCCD即电子倍增CCD,是灵敏度极高的一种半导体光电探测器件。EMCCD在常规CCD的输出区域前增加一段多级倍增区,在高压(40~50 V)下雪崩倍增。EMCCD通过较高的增益,抑制器件的读出噪声,从而在弱光及极弱光下提高器件的信噪比。

Andor公司首先将EMCCD应用于在2001年发布的iXon系列高端超高灵敏相机上。此后,多款使用EMCCD的相机相继面世,极大推动了天文观测、生物医学和激光监控等领域的发展。

EMCCD产品向以下方面发展:1)高速、高帧频EMCCD;2)大面阵、光子计数EMCCD;3)低驱动电压EMCCD。

在天文观测中,自适应光学系统利用波前探测

器实时测量成像系统的波前相位误差,所观测的目标信号比较微弱,采用高帧频的EMCCD是最佳的选择。

Teledyne E2V公司开发了一款高帧频EMCCD型号为CCD220(图4)。CCD220像素尺寸为24 μm × 24 μm,最高帧频大于1 300 帧/s,最大倍增增益大于1 000倍。采用背照技术,CCD220峰值量子效率超过90%。

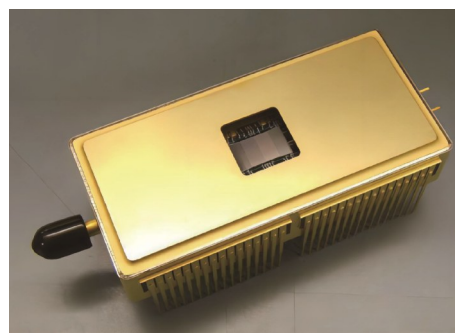


图4 E2V公司CCD220器件实物(Feautrier等,2010)

Fig. 4 CCD220 device object of E2V company
(Feautrier et al., 2010)

Teledyne E2V公司为加拿大开发了一款4 K × 4 K大阵列的EMCCD,型号为CCD282(Gach等,2014)(图5)。CCD282工作在光子计数模式,将用于加拿大10 m光学望远镜。通过降低驱动摆幅降低时钟感生噪声、深度制冷、高增益倍数(≥1 000倍)、>90%的背照量子效率,达到光子计数的最佳性能。

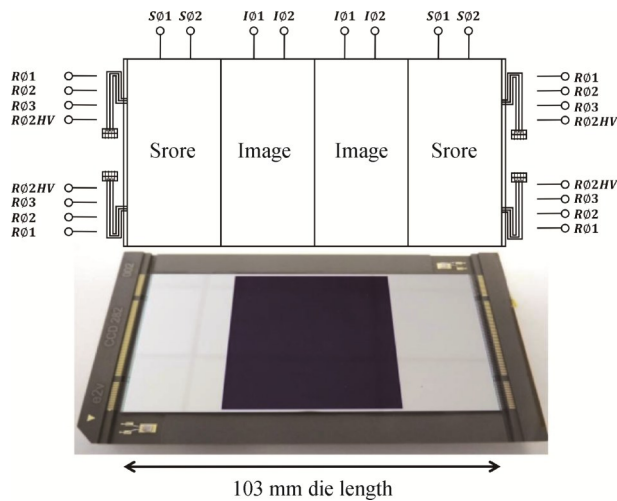


图5 CCD282 器件结构与实物(Gach等, 2014)

Fig. 5 Structure and object of CCD282 device
(Gach et al., 2014)

由于EMCCD需要使用40~50 V的高电压以实现高的电子倍增增益,也会带来使用场景的限制。国际上发展了一些采用较低倍增电压的EMCCD。

对于EMCCD,电子倍增主要发生在倍增区与相邻的电极之间的边界区域,边界区域界限越长,则倍增增益越大。Stefanov等人(2018)设计了一种低电压的EMCCD,通过增加倍增区与相邻电极的交界几何尺寸,实现了低倍增电压下相对较高的倍增增益。

美国安森美公司设计了一种两相倍增结构,基于18 V左右的倍增电压,尽管低单级倍增增益,在多倍增级数(>2 000级)的情况下,仍然可以获得适当的总倍增增益。同时,采用浮栅放大器自动判断是否倍增,可适用于日光到星光、高光到背光下全天时成像应用,例如监控、防卫/军事、科学及医疗成像、智能交通系统。

1.2 CMOS 图像传感器

1.2.1 正照式架构CMOS图像传感器技术

正照式架构CMOS图像传感器由于其自身架构的局限,填充系数偏低,灵敏度要低于背照式和堆栈式架构的传感器,但因其制造工序相对少,所以其成本也要低于其他架构的同类产品,因此对于一些应用环境光线可控、成本控制要求较高的场景,如工业检测、机器视觉等领域,正照式架构的CMOS图像传感器还有着广泛的应用,以Sony、AMS、Teledyne E2V等为代表的图像传感器企业推出了一系列正照式架构光学视觉传感器芯片。

Sony作为光学视觉传感器领域的领军企业,引

领了全球光学视觉传感器技术的发展。2017年推出了一系列4.5 μm 的正照式全局快门图像传感器产品,产品分辨率涵盖7.1 MP、2.8 MP、2 MP和1.7 MP,该系列图像传感器采用了双ADC设计,使在同一帧图像上实现低增益和高增益两种数据信息,高增益实现高灵敏度和最小读出噪声,低增益可以提升芯片的满阱容量,通过相机ISP进行高低增益数据信息的处理结合,进一步提升了芯片的动态范围(表4)。此外,该芯片同时支持双重触发及自触发两种触发模式,使该系列正照式架构光学视觉传感器更好地满足工业领域的应用需求。

表4 Sony公司推出的正照式全局快门图像传感器产品
Table 4 Sony's official global shutter image sensor

序号	主要性能	IMX428	IMX429	IMX430	IMX432
1	分辨率/MP	7.1	2.8	2	1.7
2	像素尺寸/ μm	4.5	4.5	4.5	4.5
3	噪声/ e^-	5.5	5.5	5.5	5.5
4	动态范围/dB	72	72	72	72
5	成像速度/(帧/s)	35	43	132	98

AMS是奥地利一家光学解决方案的全球领导者,在传感、光源和可视化领域提供独特的产品和技术组合,于2016年收购了比利时CMOS图像传感器领先供应商CMOSIS,AMS自2012年起推出了一系列正照式全局快门图像传感器产品,并在如今的全球工业领域仍有着极为广泛的应用,最先推出了5.5 μm 的正照高灵敏度、流水线式全局快门CMOS图像传感器产品,分辨率涵盖12 MP、8 MP、4 MP和2 MP,采用了真正的相关双采样(CDS),显著降低了固定模式噪声和暗噪声。该传感器集成了16个以上LVDS通道,使传感器实现了更高的成像速度。2016年推出了全新一代4.6 μm 系列的正照式全局快门CMOS图像传感器产品,采用其专利技术的8T晶体管像素结构,分辨率为20 MP和47.5 MP,采用了暗电平箝位等复杂的新型片上降噪电路,能够在弱光环境下捕捉到高质量的影像,并且能够提供绝佳的电子快门效率(表5)。

美国Teledyne E2V作为国际领先的图像传感器公司,利用最新生产工艺以及像素设计技术,发布了Emerald系列图像传感器产品,像素尺寸涵盖2.8 μm 和2.5 μm 等,极小的像素尺寸,可以使客户获得更

高分辨率,但同时降低光学镜头尺寸,降低整体系统成本(表6)。

表5 AMS推出的正照式全局快门图像传感器产品

Table 5 AMS's official global shutter image sensor product

序号	主要性能	CMV2000	CMV4000	CMV8000	CMV12000	CMV20000	CMV50000
1	分辨率/MP	2	4	8	12	20	47.5
2	像素尺寸/ μm	5.5	5.5	5.5	5.5	4.6	4.6
3	噪声/ e^-	13	13	8.6	13	8	8.8
4	满阱/ ke^-	13.5	13.5	11.7	13.5	15	14.5
5	动态范围/dB	60	60	61	60	66	64
6	成像速度/(帧/s)	340	180	104	300	30	30

表6 Teledyne E2V推出的正照式全局快门图像传感器

Table 6 Teledyne E2V produced normal global shutter image sensor

序号	主要性能	Emerald 2 M	Emerald 3.2 M/5 M	Emerald 8.9 M/10 M	Emerald 12 M/16 M	Emerald 36 M	Emerald 67 M
1	分辨率/MP	2	3.2/5	8.9/10	12/16	37.7	67
2	像素尺寸/ μm	2.8	2.8	2.8	2.8	2.5	2.5
3	噪声/ e^-	2.8	2.8	2.8	2.8	3	2.5
4	动态范围/dB	68	66	67.5	67.5	67	67
5	成像速度/(帧/s)	80	68/54	91/80	31/23	43	32

1.2.2 背照式架构CMOS图像传感器技术

背照式架构光学视觉传感器是在正照架构的基础上,对已经加工好的正照传感器晶圆进一步开展绑定支撑硅片、垂直翻转、衬底打薄、表面钝化、镀抗反射膜和焊盘刻蚀等工艺后,实现背照式传感器的制造。通过开展背照式架构的光学视觉传感器技术研究,可以使传感器像素实现100%的填充系数,进一步提升了芯片的灵敏度,所以此类传感器的主要应用领域为生命科学、天文和医疗等低照度应用场

景,确保传感器在低照度场景下依然保持着高质量的成像效果,代表性的背照式架构光学传感器企业主要以Sony、Teledyne E2V为主。

Teledyne E2V公司针对生命科学、天文成像领域,为了获得微弱的天体目标或细胞影像,在采用背照式传架构的基础上,同样会进一步提升像素尺寸,在其推出的一些代表性背照式产品中,像素尺寸普遍超过了 $10\ \mu\text{m}$,并且也在推出一些更大像素尺寸

表7 Teledyne E2V推出的背照式传感器产品

Table 7 Background sensor product from Teledyne E2V

序号	主要性能	CCD42-40	CCD250-82	CCD290-99	CIS113
1	分辨率/MP	4	16.4	81	8.8
2	像素尺寸/ μm	13.5	10	10	16
3	噪声/ e^-	3	5	2.5	2.3
4	满阱电荷/ ke^-	100	135	90	/
5	峰值量子效率/%	>90	85	80	/

注:“/”表示未知。

此外,随着背照式技术的不断进步,针对工业领域的背照式架构传感器也在不断地涌现。面向工业

装备领域,Sony研发了全新一代的背照式全局快门像素结构设计,发布了一系列 $2.74\ \mu\text{m}$ 的背照式全

局快门图像传感器产品(表8),该系列图像传感器同样采用了双ADC设计,进一步提升了芯片的动态范围,并且该系列芯片支持微秒级超短的快门时间间隔。通过采用背照式架构,提升了芯片灵敏度,在保证同等成像质量的前提下,可以使图像传感器像素尺寸进一步降低,使芯片的分辨率可以做得更大。

表8 Sony公司推出的2.74 μm背照式全局快门图像传感器产品

Table 8 2.74 launched by the company μ M-back global shutter image sensor product

序号	主要性能	IMX540	IMX541	IMX542
1	分辨率/MP	24.5	20.4	16.2
2	像素尺寸/μm	2.74	2.74	2.74
3	噪声/e-	2.1	2.1	2.1
4	满阱/ke-	9.5	9.5	9.5
5	动态范围/dB	71	71	71
6	成像速度/(帧/s)	35	42	52

1.2.3 堆栈式架构CMOS图像传感器技术

为了满足传感器小型化和多功能化的应用需求,一种全新的传感器架构应运而生,这就是目前最先进的堆栈式架构光学视觉传感器技术(许佳佳等,2014),该架构将原本在一个晶圆上的像素区域和电路区域,分别做在了两个晶圆上,并将两块晶圆绑定在一起,该种架构的出现使传感器的像素和电路部分可以进行独立设计及优化,使传感器电路部分可以与像素部分采用不同的制程工艺,使电路性能可以得到进一步的提升。晶圆绑定方式也从最早的硅通孔(TSV)连接,演变成了通过在像素层和电路层的连接面上构建Cu焊盘直接连接的方式进行连接,随着堆栈式架构技术的不断发展,使得未来更多数量的晶圆绑定成为可能,从而使具有集成图像处理功能的视觉传感器成为可能。

Sony最先面向智能手机领域推出了一系列堆栈式架构光学视觉传感器技术,并在iphone、三星、小米和OPPO等多款手机上实现了应用,其主要特点是在像素层和电路层之间新加入了DRAM层(动态随机存储单元),DRAM层在整个CMOS模组当中充当缓存角色,用于存储像素层获取到的图像信息,因此大幅提升了传感器处理数据的速度。由于堆栈式传感器技术推出较晚,受当前技术的成熟度低和成

本高的影响,目前的应用领域主要集中在手机等消费类领域。

1.3 智能视觉传感器

1.3.1 量子视觉传感器

量子视觉传感器是基于CMOS工艺利用创新的半导体设计在每个像素元件中缩小了转换电容的电容值,从而极大地放大了每个光子产生的电信号。这种极高的信号放大率,解决了传统CMOS图像传感器内部噪声过大的问题,尤其在低照度条件下,光子产生的电信号极弱,传感器内部噪声覆盖信号,使得目标信息无法准确呈现,通过这种方式实现了在室温条件下的单光子探测和光子数分辨(Zizza,2015)。

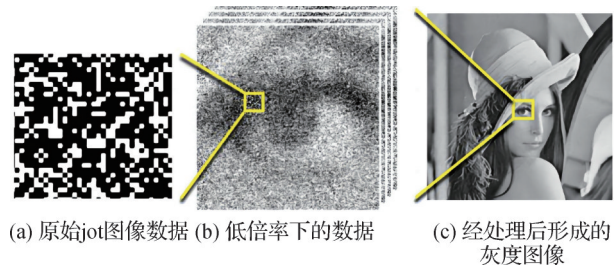


图6 光子计数图像传感器技术(Zizza,2015)

Fig. 6 Quanta image sensor technology(Zizza,2015)

(a) raw jotted image data; (b) data at low magnification; (c) grayscale image after processing)

2021年,美国Gigajot Technology公司推出了一款16.7 MP分辨率的3D堆栈式量子图像传感器(Ma等,2021),像素尺寸1.1 μm,噪声仅0.19 e-,该系列产品可以在室温下以全速工作状态进行光子计数,并具有高动态范围。与传统的小像素CMOS图像传感器相比,量子图像传感器的读出噪声性能提升了5~10倍,可实现以前无法实现的超低照度成像,适用于科学、医疗、国防、工业和航天等领域。

1.3.2 三维成像视觉传感器

三维成像视觉传感器能够获得图像的三维信息,在科学研究、工业检测、安全监控和消费娱乐等领域具有广泛的应用前景。目前,商用的三维成像技术主要有立体视觉技术,结构光技术以及飞行时间技术(time-of-flight, ToF)等。其中ToF技术具有低功耗和微型化的重要优势,能够满足便携式电子设备的需求,已成为目前三维成像视觉传感器的研究热点。

D-ToF(direct time of flight)传感器通过使用高分辨率的时间数字转换器(time-to-digital converter,

TDC)和通常由单光子雪崩二极管(single-photon avalanche diode, SPAD)实现的高增益光电探测器记录光子入射时间,直接测量光的飞行时间以计算深度(Ota等,2022)。尽管D-ToF传感器可以实现较长的探测距离,但其横向分辨率是有限的。这是因为每个像素通常需要大量的片上存储器和处理单元,以避免SPAD的光子检测概率和暗计数率的影响。在实现具有高横向分辨率的D-ToF传感器时,特别是在极端的环境光条件下,需要在功耗、动态范围和帧速率之间进行权衡。

早期的D-ToF传感器采用正面照射(front-side illuminated, FSI)CMOS工艺实现,具有像素尺寸大和横向分辨率低的缺点。最近,D-ToF传感器采用了3D堆叠BSI CMOS工艺,以实现小像素尺寸和高横向分辨率。在这些传感器中,像素阵列和逻辑电路可以首先在不同的芯片中单独优化,然后通过面对面键合技术连接。

日本的Ota等人(2022)提出了像素化曝光控制和自适应时钟充电,将D-ToF传感器的横向分辨率提高至 960×960 ,在3D堆叠的BSI CMOS工艺下,动态范围为143 dB,功耗为0.37 W。索尼公司使用小的像素群来进行光子检测以抑制背景光,在117 klux的背景光下实现的最大检测距离达到200 m以上(Kumagai等,2021)。

I-ToF(indirect time of flight)传感器测量调制光的相移来间接计算深度。与D-ToF传感器相比,I-ToF传感器可以实现更高的横向分辨率。这是因为I-ToF传感器可以通过执行简单的计算来检测相移,而无需以像素为单位的大容量存储器和处理单元。然而,由于光源的发射功率有限和光电探测器的灵敏度有限,I-ToF传感器的检测距离很短。此外,I-ToF传感器有两个关键问题:移动物体的运动伪影和背景光的深度误差。

为了抑制运动伪影,2020年,韩国的Kim等人(2020)提出了一种动态的伪4-Tap方法,可以在单帧中生成深度图像,并使用了过像素的MIM电容来实现120 klux以上的背景光消除。2021年,韩国三星电子提出了另一种具有 $3.5 \mu\text{m}$ 4-Tap像素和 1280×960 分辨率的I-ToF传感器(Keel等,2021a)。在这个传感器中,使用了多重交错和伪随机调制方法来分别降低峰值电流和消除多用户干扰。

早期的I-ToF传感器采用FSI CMOS工艺实现,

具有像素尺寸大、横向分辨率低的缺点(Payne等,2014)。2018年,美国微软采用了BSI CMOS工艺来提高像素的灵敏度,以减少像素尺寸并提高横向分辨率(Bamji等,2018)。韩国三星电子采用了三维堆叠的BSI CMOS工艺,以进一步缩小像素尺寸并提高横向分辨率(Keel等,2021b)。

为了进一步提高D-ToF传感器的横向分辨率,2020年,日本松下提出了结合D-ToF和I-ToF方法的H-ToF(hybrid time of flight)结构。通过检测短距离的相位,同时用长距离的计数光子创建一个稀疏的深度图,横向分辨率已经提高到 1200×900 像素,深度分辨率可配置到10 cm(Okino等,2020)。2022年,韩国的Park等人(2022)提出了使用基于四级搜索和时间门控的 Δ 强度相位检测的像素内直方图TDC的H-ToF传感器,实现了 80×60 像素的横向分辨率和1.5 cm的深度分辨率。近年来用FSI CMOS工艺实现的H-ToF传感器原型,不仅实现了与I-ToF传感器类似的高深度分辨率,而且还实现了比I-ToF传感器更远的探测距离。

总体来说,目前D-ToF传感器的分辨率已经提高到100万像素,SPAD阵列的功耗在高光照条件下显著增长。在未来,更智能的像素结构和信号处理单元有望实现具有高帧率的节能D-ToF传感器。具有高横向分辨率和深度分辨率的I-ToF传感器已经使用类似于CIS工艺的方法实现。然而,未来仍需要减少来自背景光的运动伪影和深度误差,以提高应用的可靠性。对于H-ToF传感器,可以采用3D堆叠BSI CMOS工艺来进一步减小像素尺寸并提高横向分辨率。

1.3.3 仿生视觉图像传感器

传统视觉传感器由快门统一控制曝光,以帧为单位记录动态影像画面。例如电影每秒记录24帧画面,但从机器视觉的角度来看,这种传统的传感器仍存在一定的应用缺陷,首先帧间可能丢失高速运动细节信息,因此传统视觉传感器向着高帧率趋势发展;其次每帧重复记录大量静态背景光强信息,因此高帧率高分辨率的视频流对后端计算造成更大的负担,并带来对数据通讯、存储更大的压力。国际上许多机构从事高清高速成像设备的研究,代表性的高清高速摄像机如下:

美国Fastec Imaging公司开发的IL5便携式高速相机支持在设定时间内快速实时存储高清图像,支

持 $2\,560 \times 2\,048$ 像素的分辨率, 帧率为 634 帧/s。美国 Vision Research 公司开发的 Cine Mag 接口, 数据存储速率高达每秒 1 G 像素。采用这种接口, 秉承着灵活性、多功能性和易用性, 开发了 Phantom 系列高清高速数码相机 (Burgett, 2018)。型号包括 C210、M10、M310、M120、V1840、V2512 等, 最新的 V2640 型号高速数码相机于 2018 年发布。美国 NAC 公司生产的 Memrecam HX 系列相机分辨率为 $2\,560 \times 1\,920$ 像素, 在全分辨率下帧率高达 850 帧/s。德国 Mikrotron 公司推出了一系列高速相机存储设备, 如 EoSens®QUAD1.1S 高速相机, 可以在高光度的前提下, 以 2 500 帧/s 以上的帧率拍摄分辨率 $1\,280 \times 864$ 像素的高速图像。德国 PCO 公司生产的高速相机 pco. dimax cs4 采用高速 CMOS 作为光敏器件, 帧率高达 1102 帧/s, 分辨率为 $2\,016 \times 2\,016$ 像素。在 $1\,920 \times 1\,080$ 像素的分辨率下, 帧率可以提高到 2 128 帧/s。

相较于传统视觉传感器, 生物视觉系统在图像信息感知以及处理能力上表现更为优越。研究者受其成像特性的启发, 摒弃了帧的概念, 提出动态视觉传感器 (dynamic vision sensor, DVS) 和脉冲图像传感器。传统视觉传感器将运动场景量化为图像序列, 而动态视觉系统图像传感器仅输出变化像素单元的光强信息, 将动态场景量化为微秒级精度的高时间分辨率事件流, 并向高速、高精度和小像素尺寸发展, 目前代表性研究成果如下:

2008 年, Delbruck 团队首次将 DVS 商业化, 它仅输出不断变化的像素信息, 并以微秒精度将动态场景量化为事件流 (Lichtsteiner 等, 2008)。2015 年, Delbruck 团队使用可编程电容耦合放大器作为预放大级, 并提出阈值减法代替复位法 (Yang 等, 2015)。该方法不仅提高了信号的完整性, 并将时间对比灵敏度提高到 1%。2017 年, Suh 团队使用行采样电路对相邻像素进行分组, 并行处理事件数据, 极大地提高了事件读取速度, 像素尺寸减小到 $9\ \mu\text{m}$, 事件输出数据速率高达 300 Meps (Son 等, 2017)。2017 年~2020 年, 韩国 Samsung 公司推出了 DVS-Gen2, DVS-Gen3, DVS-Gen4 等型号的商用相机, 空间分辨率扩展到 $1\,280 \times 960$ 像素。相较于 IniVation 公司, 动态范围小, 最大仅 100 dB。2020 年, Suh 团队使用像素尺寸为 $4.95\ \mu\text{m}$ 的 Cu-Cu 连接在两层晶圆中实现了像素电路 (Suh 等, 2020)。每像素功耗为 122 nW, 最

大事件速率为 1.3 Geps。栅极诱导泄漏方案用于抑制周期性噪声事件, 同时为减少伪影采用全局事件保护功能。2020 年, Finateu 团队使用 Cu-Cu 连接工艺实现了一种新的 $4.86\ \mu\text{m}$ 像素大小的堆叠事件视觉传感器。传感器实现了事件数据压缩技术, 并将事件率提高到 1.066 Geps (Finateu 等, 2020)。

一些机构还提高了传感器输出事件数据的质量。由于 DVS 像素尺寸减小, 它更易受到噪声影响并触发噪声事件。2019 年, Li 等人 (2019) 提出的动态视觉图像传感器可以抑制像素噪声。由于背景噪声的随机性, 且在时间和空间邻域内不存在相关性, 因此, 该方法利用有效事件的时间和空间相关性来过滤掉随机背景噪声。2020 年, Akararai 等人 (2020) 提出由 DVS 系统来完成 DVS 架构。DVS 架构是由嵌入在几个相邻的 DVS 像素中心的冗余压缩电路实现的, 它实现了事件数据的时空冗余压缩。另外, 事件数据确实对绝对光强信息的测量, 因此一些机构提出同步输出事件流与灰度值的动态视觉传感器结构。2011 年, Posch 团队提出可以直接使用对数光电探测器的输出电压作为其光强度信息的 CeleX 架构。当选择一个像素时, 这个电压可以由光源跟随器读取, 从而实现量化光强度 (Posch 等, 2011)。2014 年, Brandli 等人 (2014) 提出了一种动态有源像素视觉传感器, 它共享一个光电二极管, 并在像素级集成了 APS 和 DVS, 可以输出同步静态背景灰度信息和异步动态事件信息。

1.3.4 微光高动态视觉传感器

科技高速发展的时代, 安防、汽车和计算机等领域的新视觉应用所需的灵活性更高, 需要在室内/室外、白天/夜晚以及各种场景下实时工作。高动态范围 (high dynamic range, HDR) 传感器可以用来实现这一目标, 它在高照度和低照度环境下都具有优异的成像性能。

2002 年, 日本静冈大学 Sony 等研究机构合作, 在 $0.18\ \mu\text{m}$ 工艺下, 研究了不同光照条件下 CMOS 有源像素的噪声组成和分布规律, 提出一种列级处理电路, 利用多帧过采样 (Kawai 和 Kawahito, 2002)、增益自适应 (Sakakibara 等, 2005) 等新方法, 提高了低光条件下像素的灵敏度和信噪比。2009 年, 他们详细分析了列并行相关多采样技术对噪声的抑制效果, 主要是对 $1/f$ 噪声和 RTS 噪声有明显的抑制效果。此外, 他们还提出了有助于抑制 RTS 噪声的方

法,在像素源跟随器中添加驱动电流开关(Kawahito等,2009)。2012年,静冈大学的Seo等人(2012)采用了一种列并行两级折叠积分/cyclic 17位精度ADC,可以实现固定模式噪声为 $0.021 e^-$, $1.2 e^-$ 像素随机噪声,85 dB的动态范围的效果。在 0.01 lux 照度下,图像传感器几乎没有可视的量化噪声。2012年,荷兰代尔夫特理工大学Chen等人(2012)提出CIS中的列并行数字相关多采样技术用于降低噪声。基于 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS工艺的传统四管像素使用这种结构,采用列并行放大器和一个数字相关多采样(correlated multi sample, CMS)电路,可大大降低像素读出时的随机噪声。在黑暗条件下测量结果表明,该结构的噪声可达 $127 \mu\text{Vrms}$,通过降低读出噪声可使电路的信噪比提高10.4 dB。同年,他们提出同时使用CMS相关多采样、高增益列级放大器和像素内的BSF(埋沟源跟随器装置)的方法(Chen等,2012),以进一步降低TRN,根据实验测试,TRN可以达到 $0.7 e^-$ 。2015年,日本静冈大学的团队提出了一种新型像素结构,他们将利用穿透效应进行复位的掺杂结构取代了复位管,实现了 220 uV/e^- 的转换增益和 $0.27 e^-$ 的读出噪声。2020年,瑞士洛桑联邦理工学院的团队提出一种新型5T像素结构(Boukhayma等,2020),不但能够达到 250 uV/e^- 的转换增益,而且在像素内使用具有薄氧化层的源跟随器,将读出噪声降低到 $0.32 e^-$ 。2020年,日本东北大学的团队通过使用横向溢流集成沟槽电容器和杂质浓度非常低的p型Cz-Si衬底改进了像素工艺(Murata等,2020),实现了71.3 dB的信噪比和89.7%的量子效率。

在产业界的研究中,不但满足微光应用的灵敏度和噪声要求,而且考虑了CIS动态范围指标。2005年,日本东北大学首次提出了基于横向溢出集成电容(lateral overflow integration capacitor, LOFIC)技术的动态范围扩展,使动态范围不受光敏单元的满阱容量的限制,动态范围可以大大提高(Sugawa等,2005)。2017年,索尼实现了 $3.875 \mu\text{m}$ 像素尺寸的内置存储器和LOFIC技术(Sakano等,2017),将饱和和信号扩展到 $224 ke^-$ 。2021年,安森美半导体公司推出一款像素尺寸为 $4.2 \mu\text{m}$ 采用LOFIC结构的全球曝光CMOS图像传感器,在单曝光流水线全局曝光模式下实现了90 dB的动态范围,在双曝光滚筒(electronic rolling shutter, ERS)模式下可实现110 dB

的动态范围(Sampath等,2021)。

1.4 红外图像传感器

自1959年Lawso研制出碲镉汞(HgCdTe, MCT)的长波红外探测器以来,红外探测器的发展前沿、技术引领就掌握在国外几家主要研究机构、厂商手中。近年来常用红外探测器材料有碲镉汞、InGaAs、InAs/InGaSb T2SL、量子阱等。利用这些不同材料的特性,围绕对红外探测器应用需求的不同,国外研究机构开展了一系列相关研究。

1.4.1 大面阵红外探测器

大面阵红外探测器广泛应用于空间红外遥感领域,在天文学观测、光度测量和气象观测等方面具有重要价值。为了平衡视场与分辨率之间的矛盾,解决途径之一就是采用高分辨率、超大规模的红外焦平面探测器组件,并通过拼接单片大面阵来获得更大的探测器阵列规模。国际上美国(Dorland等,2009)、法国(Nedelcu等,2018)、英国(Feautrier等,2022)、比利时(Gershon等,2013)的科研单位和企业均对大面阵红外探测器进行了探索和研究。

美国在大面阵红外探测技术领域研究多年,实现了从 $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$ 、 $2 \text{ K} \times 2 \text{ K}$ 到 $4 \text{ K} \times 4 \text{ K}$ 及更大规模红外探测器的研制(史漫丽和凌龙,2017),目前在世界红外领域处于领先地位。美国洛克威尔科技公司(Rockwell Scientific Company, RSC)已研制出 $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$ 、 $2 \text{ K} \times 2 \text{ K}$ 、 $4 \text{ K} \times 4 \text{ K}$ 规模的大面阵红外探测器,读出集成电路(ROIC)的演进过程如图7所示。HAWAII-2RG(H2RG)应用于詹姆斯·韦伯空间望远镜,其CMOS ROIC的阵列规模达到 $2 \text{ K} \times 2 \text{ K}$ (像元间距 $18 \mu\text{m}$),并具有灵活的 $1/4/32$ 输出配置,以兼容各种天文应用的高背景控制器(Bai等,2004)。基于H2RG架构还能够拼接实现更大规模的焦平面阵列,如 $4 \text{ K} \times 4 \text{ K}$ 的HAWAII 4RG-15(H4RG-15)红外马赛克焦平面阵列(Hall等,2016)。

美国雷神视觉(Raytheon Vision Systems, RVS)公司长期为天文学提供多种规模的高性能红外探测器芯片组件,阵列尺寸从 $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$ 至 $8 \text{ K} \times 8 \text{ K}$ 不等,像素间距范围达到 $8 \sim 27 \mu\text{m}$,光谱响应范围达到 $0.4 \sim 28 \mu\text{m}$ (Starr等,2016)。图8中展示了雷神公司生产的碲镉汞 $4 \text{ K} \times 4 \text{ K}$ (像素间距 $20 \mu\text{m}$)的红外探测器阵列。雷神公司与罗切斯特理工学院(RIT)于2022年(Figer等,2022)报道了合作项目SATIN,以研发可应用于天体物理学研究的碲镉汞

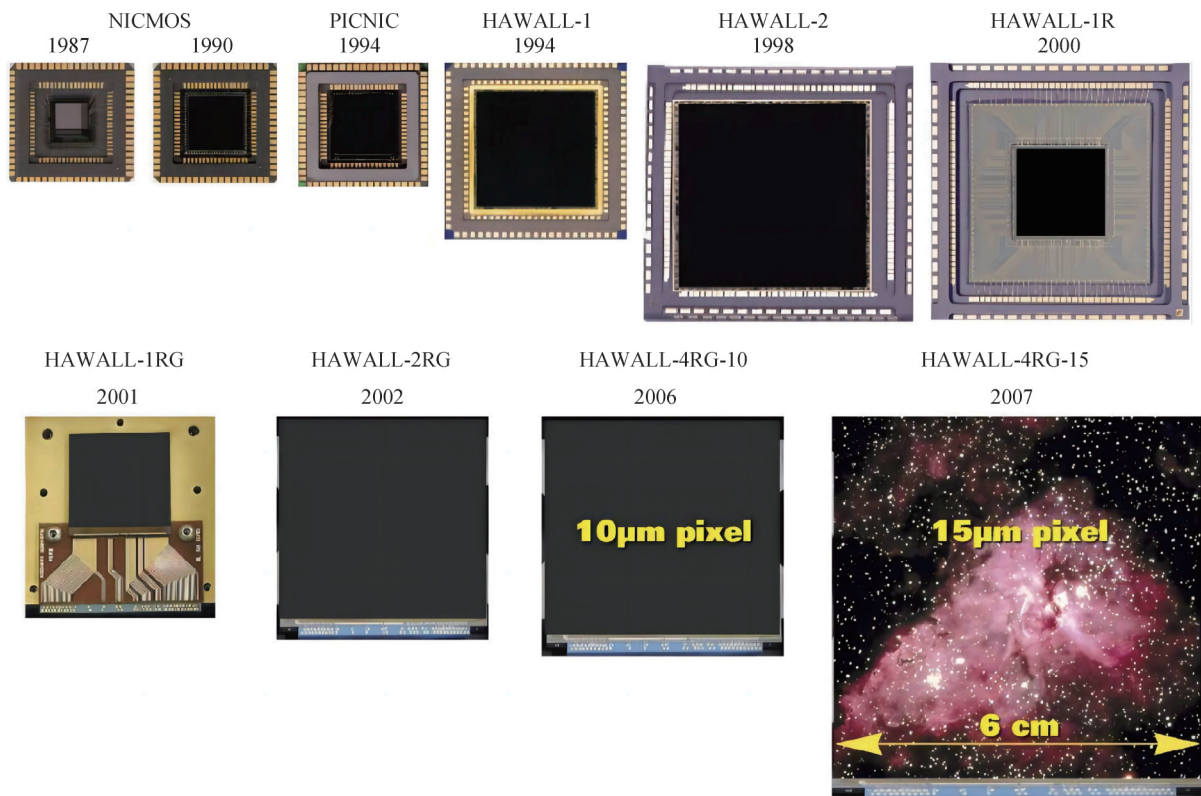


图7 RSC ROIC的演进过程(Chuh等,2006)

Fig. 7 Evolution of RSC ROIC(Chuh et al. ,2006)

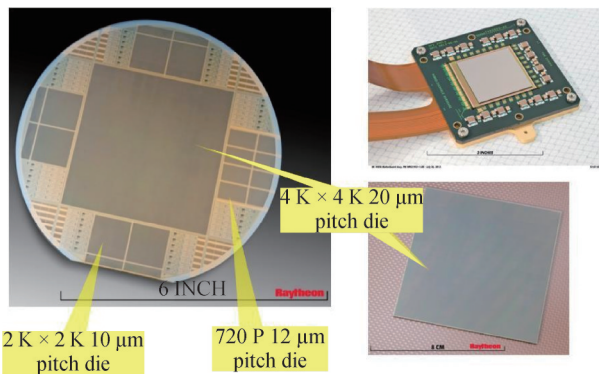


图8 美国雷神公司HgCdTe 4 K × 4 K红外阵列(Starr等,2016)

Fig. 8 Raytheon HgCdTe 4 K × 4 K infrared array
(Starr et al. ,2016)

超大布局的新型红外探测器 HELLSTAR, 它将达到红外天文学史上最大的像素规模 $4\text{ K} \times 6\text{ K}$ (像素间距 $10\ \mu\text{m}$)。雷神公司的长期目标是采用分子束外延的方式在大尺寸晶圆(8~12英寸)上生长 $15\ \mu\text{m}$ 像元的 $8\text{ K} \times 8\text{ K}$ 或 $14\text{ K} \times 14\text{ K}$ 的大面阵红外焦平面阵列(李燕兰等,2022)。

美国 Teledyne 公司(Blank等,2012)、Zandian 等人(2016)先后推出 $2\text{ K} \times 2\text{ K}$ (像素间距 $18\ \mu\text{m}$) 的 H2RG 焦平面与 $4\text{ K} \times 4\text{ K}$ (像素间距 $10\ \mu\text{m}$) 的

H4RG-10焦平面,并在此基础上于2012年与美国夏威夷大学和 GL Scientific 合作开发了适用于地面天文观测的 H4RG-15焦平面阵列,其规模可达到 $4\text{ K} \times 4\text{ K}$ (像素间距 $15\ \mu\text{m}$),可操作性大于97%,功耗小于 4 mW ,暗电流小于 $0.01\ \text{e}^-/\text{s}$ 。Teledyne公司于2018年成功研制并交付了近红外光谱光度计(NISP),它是欧洲航天局欧几里得项目中的有效载荷,用于研究宇宙中的暗能量与暗物质。NISP探测器系统由16个 $2\text{ K} \times 2\text{ K}$ 的 H2RG 红外传感器芯片组件、16个 SIDECAR ASIC 传感器芯片等模块构成,具有较高的带内量子效率、良好的空间均匀性、低读出噪声、低暗电流和紧密的分布等性能(Bai等,2018)。Teledyne公司 Cheriyan 等人(2022)为应用于地基天文学的 COSMOS 项目提供了 $8\text{ K} \times 8\text{ K}$ (像元间距 $10\ \mu\text{m}$) 的深低温 CMOS 相机,该探测器的量子效率高于90%,具有极低的时间噪声(小于 $1\ \text{e}^- \text{rms}$)和暗电流(在 $-25\ ^\circ\text{C}$ 时小于 $0.05\ \text{e}^-/\text{p/s}$)。

法国 Lynred 与 Leti 公司于2022年成功研制了应用于天文大规模阵列 ALFA 计划的 $2\text{ K} \times 2\text{ K}$ (像元间距 $15\ \mu\text{m}$) 碲镉汞近红外探测器阵列,该探测器具有较低的暗电流(低于 $0.1\ \text{e}^-/\text{p/s}$)和高于80%的

量子效率。

1.4.2 宽谱段红外探测器

近年来,宽谱段成像技术由于在遥感、矿产探测和生物医学等方面得到广泛运用而备受关注。

2006年,日本发射了红外天文卫星 AKARI,其有效载荷红外相机 IRC 可在近中红外波段(1.8~26.5 μm)下进行观测任务,在9 μm 和18 μm 下进行全天观测,可实现对天体目标进行宽视场的深度成像。其中的两款探测器阵列均由美国雷神公司提供,包括工作在1.8~5.5 μm 波段,512 \times 412规格的InSb探测器;以及工作在4.6~13.4 μm 和12.6~26.5 μm 波段,256 \times 256规格的Si:As探测器(Onaka等,2007)。

美国 QmagiQ 公司于2013年(Reisinger等,2013)报道了640 \times 512(像素间距25 μm)QWIP长波红外焦平面阵列,工作波段为8~12 μm (测试后响应波段为7.5~11.5 μm),将该光谱窗口划分为200个单独的通道切片(每个波段20 nm),在40 K温度下,当积分时间为16 ms时,在整个波段的切片中NETD低于200 mK。该技术应用于2013年启动的Landsat 8任务中的地球观测热红外成像仪器。

应变超晶格(SLS)技术的光谱响应可覆盖4~13 μm 区间,且工作温度可提高至77 K附近,平均量子效率超过20%,具有制作宽谱段红外探测器的巨大潜力。NASA 戈达德太空飞行中心与QmagiQ公司合作,于2012年推出了640 \times 512混合型SLS宽谱段探测器,像素尺寸为20 μm ,响应波段为4~12 μm ,并搭配FLIR/Indigo 0402 ROIC。推出了1 K \times 1 K SLS探测器阵列,响应范围为1~13 μm ,并集成了5波段的滤波器(Jhabvala等,2020)。

T2SL材料的能带可调,能覆盖3.1~30 μm 波段,具有应用在高温工作下8~14 μm 宽谱段长波红外探测器的巨大潜力(Kwan等,2021)。美国JPL于2021年(Gunapala等,2021)报道了一款基于铋化合物T2SL高温工作型势垒红外探测器(BIRD)焦平面阵列,它能够提供连续可调的截止波长,波段范围覆盖4~15 μm ,可用于中波、长波红外探测,具有出色的均匀性和可操作性。

1.4.3 高灵敏度红外探测器

灵敏度是光电探测器最重要的性能指标之一,表示探测器捕获信号的灵敏程度,若数值越高,则探测器对弱光的探测能力越强。比探测率表征了探测

器捕获弱信号的灵敏度,可通过降低噪声功率或提高光响应度来增加比探测率。由于暗电流噪声是红外探测器中不可忽略的噪声源,可通过抑制暗电流来降低噪声功率。同时,探测器的响应度由外量子效率与光电导增益决定,可以通过引入高外量子效率和高光电导增益的新结构、新材料来实现响应度的提升(张金月等,2021)。

德国AIM公司于2010年(Breiter等,2010)报道了基于碲镉汞的640 \times 512(像素间距为15 μm)中波和长波探测器,其中中波探测器在配备F/4.6冷屏,积分时间为5 ms时,NETD小于25 mK;长波探测器的NETD小于38 mK(F/2,积分时间180 μs)。并于2015年(Lutz等,2019)推出了改进版640 \times 512(像素间距15 μm)MCT长波探测器,其平均NETD约为20.8 mK(积分时间1.06 ms)。

美国JPL于2010年(Nguyen等,2010)提出了InAs/GaSb超晶格长波红外探测器,在77 K、10.3 μm 处(200 mV偏置电压下)的暗电流密度达到 1.01×10^{-5} A/cm²,峰值量子效率为30%。并于2018年报道了InAs/InAsSb超晶格吸收层长波红外探测器,规模为640 \times 512,量子效率达到37%,在60 K下,NETD达到21 mK。于2019年推出的640 \times 512(像素间距24 μm)BIRD结构长波探测器的NETD可达到16.3 mK(尚林涛等,2021)。

美国西北大学Dehzangi等人(2020)于2020年报道了基于T2SL InAs/InAs_{1-x}Sb_x平面型中波红外探测器的成像演示,截止波长为4.28 μm 。探测器采用锌离子注入,可实现在77 K、偏置电压-80 mV下比探测率可达到 9.12×10^{11} Jones,峰值响应率为0.68 A/W(3.35 μm 处),量子效率达到23.5%(无防反射涂层),此时暗电流密度为 1.23×10^{-6} A/cm²,R0 \times A为 1.53×10^4 Ωcm^2 。

日本宇宙航空研究开发机构JAXA于2021年(Katayama等,2021)报道了320 \times 256和640 \times 512(像素间距均为15 μm)规模的T2SL中波红外焦平面。为应用于地球静止气象和大气化学任务,探测器需要超高的灵敏度,并且要对甚长波区域(截止波长15 μm)进行响应。在20 K测试温度及-20 mV偏压下,暗电流密度为 1×10^{-4} A/cm²,单元探测器的响应度约为0.1 A/W(15 μm)、比探测率可达到 5.7×10^{11} Jones;在77 K、-20 mV偏压下,暗电流密度为 4×10^{-2} A/cm²,单元探测器比探测率可达到 1.3×10^{10}

Jones。

韩国 i3system 公司于 2022 年 (Ko 等, 2022) 报道了 InGaAs 短波探测器, 在 200 K 工作温度下, 平均量子效率为 70.1%, 在 -0.1 V 偏压下该探测器具有 6.80×10^{-9} A/cm² 的暗电流密度和 2.33×10^{13} Jones 的峰值比探测率; 以及 InAs/GaSb/AlSb/GaSb T2SL 短波探测器, 在 200 K 下, 截止波长为 $2.45 \mu\text{m}$, 平均量子效率为 51.3%, 暗电流密度为 1.1×10^{-7} A/cm², 峰值比探测率为 4.68×10^{12} Jones。

1.4.4 双色/多色红外探测器

双色或多色探测器同时获得多个波段的目标信息, 能够有效抑制复杂背景、排除干扰, 从而提高探测目标的能力。双色探测器主要有平面、叠层两种技术路线, 如图 9 所示。

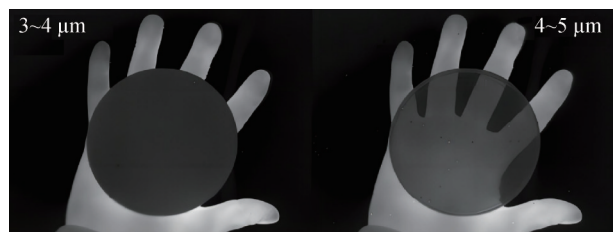


图9 384×288 InAs/GaSb SL 双色探测器下拍摄的图像 (Rehm 等, 2011)

Fig. 9 Three hundred and eighty-four × image taken under 288 InAs/GaSb SL two-color detector (Rehm et al., 2011)

美国 AIM 公司于 2007 年 (Münzberg 等, 2007) 报道了基于铋化物 T2SL 的 384×288 M/MWIR 双色红外探测器, 每个像素 ($40 \mu\text{m}$) 同时组合了 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 和 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段范围的光谱信息来进行目标探测, 其成像质量较好。较长波段的 NETD 小于 12 mK ($F/2, 2.8 \text{ ms}$), 较短波段的 NETD 小于 22 mK ($F/2, 2.8 \text{ ms}$)。为了减小尺寸和像元间距, AIM 与 IAF 进行合作, 将每个像素上的钢柱由 3 个减为 2 个, 并保持信号积分时间重合, 探测器尺寸减小为 256×256 , 像素尺寸降为 $30 \mu\text{m}$ 。

雷神公司长期致力于制造双色红外焦平面阵列, 曾为美国导弹防御局的 SM-3 项目 ($256 \times 256, 30 \mu\text{m}$ 间距, L/LWIR FPAs)、美国陆军夜视和电子传感器理事会的 TMT 项目 (640×480 , 像素间距 $20 \mu\text{m}$, M/LWIR FPAs)、DBFM 项目 ($1280 \times 720, 20 \mu\text{m}$ 间距, M/LWIR FPAs) 等多个项目提供设备。并于 2009 年 (Smith 等, 2010) 报道了 512×512 (像素间距

$30 \mu\text{m}$) 的碲镉汞 L/LWIR 红外焦平面, 其读出电路支持“集成后读出”和“集成时读出”两种操作, 可选择单色或双色两种模式, 该器件适用于弹道导弹防御等任务。后经过在分子束外延 (MBE) 生长和晶圆制造方面实施了改进, 配备 SB-410 ROIC 后, 测试发现 L/LWIR 双色探测器的性能接近单色液相外延 (LPE) 长波探测器的性能 (Smith 等, 2010)。

韩国亚洲大学 Hwang 等人 (2021) 和刘炜 等人 (2021) 提出了 p-Ge/n-MoS₂ 范德华异质结双色探测器, 响应波段范围为 $406 \sim 1550 \text{ nm}$, 具有近光伏 (-0.5 V) 和光导 (-3.5 V) 两种工作模式, 不同的反向偏置电压决定了可见光或红外光的响应度。

英国 Leonardo 公司于 2022 年 (Greenen 等, 2022) 报道了碲镉汞 M/LWIR 双色红外探测器, 覆盖范围为 $3.7 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 9.4 \mu\text{m}$, 该探测器由 GaAs 基板上的金属有机气相外延 (MOVPE) 生长得到, 像元间距为 $12 \mu\text{m}$, 并装配 FLIR-1308 ROIC。通过对 1280×1024 阵列进行测试, 发现在中波通道 (积分时间 16.5 ms) 下, 实际 NETD 与理论 NETD (纯背景限制) 的比值为 1.15, 缺陷约为 1.78% (缺陷定义为 NETD 比值超过 3、光子响应通量超过正负 25% 的像素比例), 信号效率为 46.79% (信号效率定义为光子通量与电子的转换效率); 长波通道下 (积分时间 0.7 ms), NETD 比值为 1.05, 缺陷约为 0.33%, 信号效率为 56.17%。

1.4.5 高温工作型红外探测器

红外探测器通常需要工作在低温条件下以保证较低的暗电流, 因为较大的暗电流会严重降低探测器的性能。然而配备制冷机又会增加探测系统的体积, 提高成本和设计难度。因此为了降低成本、尺寸、重量和功耗, 研究人员提出了高温工作型 (HOT) 红外探测器, 其关键技术在于降低暗电流。非制冷探测器可工作在室温下, 常用的热敏材料以氧化钒和多晶硅为主, 前者在精度和灵敏度的性能较为突出, 后者更易于实现量产 (Glozman 等, 2006)。

以色列 SCD 公司是 InSb 中波红外焦平面阵列的代表制造商, 生产了多款性能稳定的 HOT 红外探测器。于 2006 年 (Glozman 等, 2006) 报道了可工作在 100 K 及以上温度的 InAlSb 中波红外探测器, 由于使用外延生长材料获得了更高的 p-n 结质量, 减少了生长复合 (GR) 中心的数量, 因此显著降低了器件的暗电流。随着 Al 的加入, 带隙增大, 进一步提

高了工作温度。经测试,该探测器的成像质量稳定、空间均匀性高,可应用于高质量成像仪、手持红外相机、导引头、瞄准吊舱及空中侦查等方面。SCD于2012年(Klipstein等,2012)报道了在GaSb或GaAs衬底上生长的具有InAsSb活性层和AlSbAs阻挡层的n型bariodes中波探测器。通过去除窄带隙光子吸收有源层材料的损耗电场,来抑制GR电流,该器件的工作温度可达到180 K,NETD为43 mK。SCD于2022年(Klipstein等,2022)报道了基于T2SL的XBn和XBp探测器,验证了基于InAs/GaSb和InAs/InAsSb T2SL势垒探测器在中波波段内可在130 K下运行,在长波波段内可在77 K下工作,NETD为15 mK,如图10所示。

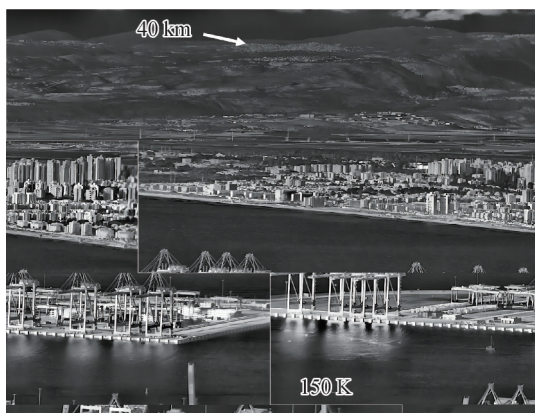


图10 150 K温度下XBn 2 560 × 20 485 μm间距Crane探测器的成像演示(Klipstein等,2022)

Fig. 10 XBn 2 560 at 150 K × imaging demonstration of 20 485 μm spacing Crane detector (Klipstein et al., 2022)

法国蒙彼利埃第二大学的Perez等人(2015)提出了基于nBn架构的InSb红外探测器,通过抑制SRH(shockley-read-hall)复合过程减小GR电流,来实现较高的工作温度。该器件在77 K时的暗电流为 1×10^{-9} A/cm²。经测试,该探测器的工作温度可达到120 K。该团队于2019年(Perez等,2019)报道了非镓InAs/InAsSb T2SL红外探测器,用于全中波波段(3~5 μm)的检测,该器件可工作在135~140 K温度下。

德国AIM公司于2019年报道了基于碲镉汞p-on-n 1 024 × 768(像素间距10 μm)长波红外模块的研制,预计NETD约为30 mK,像素可操作性大于99.3%。并于2022年(Lutz等,2022)报道了上述器件的研制成果,工作温度在100 K的性能表现良好,

NETD约为30 mK,可操作性超过99.5%,帧频为120 Hz,截止波长为11 μm,公司下一步的计划是要将焦平面工作温度提高至100 K以上。

非制冷红外焦平面探测器无需制冷装置,能够在室温状态下,具有体积小、质量轻、功耗小、寿命长、成本低和启动快等优点,在民用工业领域得到广泛应用与发展。

美国密苏里大学Cheng等人(2011)设计了一种基于VOx的非制冷型L/LWIR微测热辐射计,其比探测率高达 1.62×10^9 Jones。该器件的NETD在8~9.4 μm和9.4~10.8 μm波段分别为14 mK和16 mK,计算得到的吸收系数在两个光谱波段分别为59%和65%。

德国的行星研究所于2022年(Helbert等,2022)报道了为Io任务设计的热红外多光谱成像仪TMAP,其中包括一个采用非制冷型1 024 × 768规格的微测热辐射计,其探测波段为4.5~16 μm,NETD小于50 mK。

比利时XenICs公司研制了Gobi系列非制冷型的测辐射热计,规模为640 × 480(像素间距17 μm),响应波段为8~14 μm,NETD约为55 mK,具有较高的灵敏度,且外形紧凑、易于集成。

1.4.6 红外偏振探测器

偏振作为红外辐射的重要物理特性,红外偏振成像技术能够同时获取红外辐射强度与偏振信息,有效丰富了图像的特征信息。偏振探测能够有效区分人造目标与自然物体,可用于追踪导弹、探测地雷、探查水下目标和识别伪装等任务。

偏振成像可分为分时成像、分振幅成像(Mudge和Virgen,2011)、分孔径成像(Pezzaniti和Chenault,2005)和分焦平面成像。其中,分焦平面成像的偏振元件直接集成在FPA上,因其体积小、集成度高以及系统稳定等优势成为当下偏振成像的主流方式。光学偏振元件作为传统偏振探测器不可或缺的部件,但是会导致其响应低、空间分辨率低、图像配准不佳以及成本较高等问题。若将具有各向异性的半导体材料作为光探测器的感光层,利用其天然的偏振光敏感性,将有效简化偏振探测器的设计,适用于制造新型的偏振光电探测器。

美国陆军研究实验室于2001年(Beekman和van Anda,2001)将线性光栅刻蚀在量子阱长波红外光电探测器焦平面的像素上,并定性描述了偏振性

能。相邻像素上具有正交光栅,可有效消除像素配准错误。该款探测器的尺寸为 288×384 (像素间距 $40 \mu\text{m}$),可工作在凝视模式或微扫描模式下。

2007年法国阿尔卡特—泰雷兹 III-V 实验室的 Antoni 等人(2007)发现小像素的偏振敏感量子阱红外光电探测器的响应度性能良好,可以集成到大面阵的焦平面阵列中。同年美国佐治亚州立大学的 Perera 等人(2007)提出了一款改进版隧穿效应量子点光探测器(T-QDIP)结构,耦合金属栅极之后可以制成具有波段选择性的偏振敏感双色红外探测器。

法国 Thales 公司于2008年用线性光栅代替二维光栅成功地刻蚀在百万像素的长波红外量子阱探测器上。

2014年美国范德比尔特大学的 Hong 等人(2014)研究了多层 BP 场效应晶体管中的电传输与光电效应,其各向异性可应用于偏振光电探测中。

新加坡南洋理工大学的 Liu 等人(2016)于2016年通过研究 ReS₂ 的偏振敏感光响应,发现不同偏振态的入射光通过具有各向异性的 ReS₂ 后经历了不同程度的吸收,证明了晶体结构固有的各向异性性质,可用于实际的集成光学应用。

俄罗斯莫斯科物理技术学院的 Semkin 等人(2022)于2022年根据石墨烯—金属结的光响应对栅极电压和偏振角的异常依赖性来实现中波红外偏振探测,经验证该探测器的偏振灵敏度较高(两个正交偏振的信号比可达到10)。

2 国内研究进展

2.1 CCD图像传感器

国内在多光谱 TDI CCD、高光谱 CCD 和 EMCCD 三方面也取得了重要进展,目前的器件性能达到了国际一流水平。



图11 国产某五谱段多光谱 TDI CCD

Fig. 11 A domestic five-band multispectral TDI CCD

国内在高光谱 CCD 的研制上,突破了多抽头健壮性、垂直区高行频技术以及背照高量子效率等关键技术,后续将进行更大阵列规模的高性能高光谱 CCD 的研制。国内在器件表面镀膜技术实现高光谱技术方面也取得了部分进展。

国内在 EMCCD 的研制方面,突破了背照高量子效率、多抽头并行读出、高速低噪声放大器以及低 RC 时间延迟技术,基本达到了工程实用化水平。

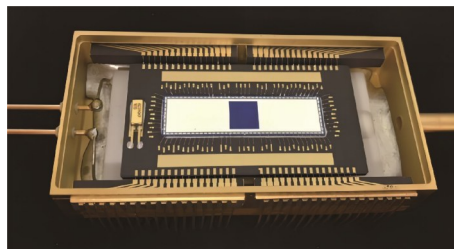


图12 中国电子科技集团公司第四十四研究所
对标 CCD220 器件实物

Fig. 12 Physical object of CCD220 device benchmarking in
China Electronics Technology Group
Corp. No. 44 Research Institute

2.2 CMOS 图像传感器

国内对于 CMOS 图像传感器技术的研究起步较晚,最初仅有少部分企业开展了面向手机等消费类领域的光学视觉传感器研究,随着我国不断推出对于集成电路产业的扶持政策,越来越多的企业开展了视觉传感器的研究。在科研领域,中国电子科技集团公司第四十四研究所、771 所、772 所、长春光机所等机构均开展了光学视觉传感器的研究,产品主要面向大型科学装置等应用。在商业领域,长光辰芯、思特威等一系列专注于视觉传感器研发的企业逐渐走向国际,市场份额逐步提升。

2.2.1 正照式架构 CMOS 图像传感器

长光辰芯成立于2012年,是国内一家专注于高性能 CMOS 图像传感器的设计的企业,总部位于长春,在国内杭州和大连、比利时安特卫普、日本东京设有研发中心。2016年起,该公司陆续推出了一系列正照式全局快门 CMOS 传感器,像素尺寸包括 $2.5 \mu\text{m}$ 、 $3.2 \mu\text{m}$ 和 $4.6 \mu\text{m}$,分辨率最高可达 152 MP,通过采用先进的电荷域全局快门像素设计,及真相关多采样降噪技术,进一步降低全局快门传感器的读出噪声,最低读出噪声仅为 $1.6 e^-$,可满足工业检测、新能源、智能交通以及人工智能等多样化领域的应用需求。

表9 长光辰芯推出的正照式全局快门图像传感器产品

Table 9 Positive global shutter image sensor product launched by Changguang Chenxin

序号	主要性能	GMAX2505/2509/2518/0505	GMAX3265/32103/32152	GMAX3809	GMAX4651
1	分辨率/MP	5/9/18/25	65/103/152	9	51
2	像素尺寸/ μm	2.5	3.2	3.8	4.6
3	噪声/ e^-	1.8/1.8/2.7/1.6	4	3.2	7.6
4	动态范围/dB	65.5/65.5/66.9/65.8	66/66.4/67.3	70.7	65.8
5	成像速度/(帧/s)	290/290/139/150	71/24/16	65	30

2.2.2 背照式架构 CMOS 图像传感器技术

面向生命科学、天文和微光夜视等低照度成像领域,长光辰芯自2015年起推出了系列化的背照式架构 CMOS 图像传感器产品,其最新推出的亚电子读出噪声、适用于微光成像的背照式 CMOS 图像传

感器 GLUX9701,通过结合低噪声设计及先进的背照式工艺,使得该系列在超低照度环境($<10^{-3}$ lux)下具备清晰成像能力,最低读出噪声为 $0.85 e^-$,且功耗仅为180 mW,更为重要的是,噪声分布的均匀性得到显著提高。

表10 长光辰芯推出的背照式架构传感器产品

Table 10 Backlit architecture sensor products launched by Changguang Chenxin

序号	主要性能	GSENSE2020BSI	GSENSE400BSI	GSENSE4040BSI	GSENSE6060BSI	GLUX9701BSI
1	分辨率/MP	4	4	16.7	36	1.3
2	像素尺寸/ μm	6.5	11	9	10	9.76
3	噪声/ e^-	1.6	1.6	1.6	2.3	0.85
4	动态范围/dB	90.5	96	66	77	89
5	峰值量子效率	95%@600 nm	95%@570 nm	90%@600 nm	95%@580 nm	90%@600 nm

思特威创新性地研发了 Voltage Domain SmartGS®技术,其最新的第二代 SmartGS®技术,采用大 Pixel 的 BSI 工艺设计,使暗光下的感光度、噪声和暗电流等性能均得到了进一步的优化,同时也采用了并行电压域读取结构,大幅提升了最大快

门速度,完善对高速运动物体的清晰抓拍,同时基于上述技术,推出了一系列 $4 \mu\text{m}$ 和 $4.2 \mu\text{m}$ 的背照式全局快门图像传感器产品(Miyauchi等,2020),为智能交通应用减少光污染、赋能全天候应用及工业智能升级提供利器。

表11 思特威推出的背照式架构传感器产品

Table 11 Backlit architecture sensor products launched by Smart Sens

序号	主要性能	SC130GS	SC350HGS	SC410GS	SC910GS	SC950HGS
1	分辨率/MP	1.3	3	4	9	9
2	像素尺寸/ μm	4	4.2	4.2	4	4
3	动态范围/dB	60	62	60	68	62
4	成像速度/(帧/s)	240	75	50	50	65

2.2.3 堆栈式架构 CMOS 图像传感器技术

面向电影制作、无人机和专业摄像等领域,长光辰芯发布了全新 GCINE 系列中首款产品——GCINE4349,这是长光辰芯基于在工业级、科学级

CMOS(sCMOS)和摄影级产品方面的技术基础而研发的一款堆栈式架构的传感器产品,该产品专为高端视频成像设计,采用 $4.3 \mu\text{m}$ 像素设计,49 MP 像素全画幅,支持多种读出模式下的8 K或像素合并

式4 K分辨率输出。同时芯片在16 bit ADC(64×1.2 Gbps sub-LVDS)采样下,8 K模式下帧频高达120 帧/s,像素合并式4 K模式下帧频高达240 帧/s。

2.3 智能视觉传感器

2.3.1 量子视觉传感器

目前,国内对于量子视觉传感器的研究相对较少,尚处在起步的阶段。如香港城市大学和天津大学方面,针对量子视觉传感器的建模分析、噪声消除和图像重建等方面开展了研究。

2.3.2 仿生视觉图像传感器

领先的融合视觉传感芯片研发商锐思智芯,在事件驱动型传感器领域拥有超过8年研究经验,2022年7月发布了专门为高端成像应用而设计的融合视觉传感芯片ALPIX-Eiger,像素尺寸为 $1.89 \mu\text{m}$,分辨率达到8 MP,通过搭载独创的Hybrid Vision融合视觉专利技术,在像素层面实现了图像传感和事件感知的融合,可广泛用于手机、运动相机等小型化智能设备。

豪威集团在2022年发布了产品级CIS/EVS融合视觉芯片OV60B10,该芯片采用豪威集团独有的in-pixel timestamp及相关的高速读出技术,相对于业界已有的Time stamping during readout方式,能大幅提高EVS的时间标签精度,并降低时间标的抖动,可广泛适用于超高速图像重构、高动态范围成像、ADAS、智能座舱、眼球追踪、物体追踪以及SLAM等多种场景。

仿生视觉图像传感器方面,2007年,香港大学Shoushun和Bermak(2007)提出了一种高速公平仲裁结构,通过调整相邻两次仲裁过程中的像素优先级,在一定程度上保证了所有像素仲裁优先级的一致性。2012年天津大学提出了基于AER方式的CMOS图像传感器(于璐,2012),模仿视网膜结构设计动态视觉信息的输出,采用双采样脉冲宽度调制电路,对像素结构和仲裁电路进行了行为级的建模和仿真,但没有进行流片验证。2013年天津大学提出了基于时间域的AER异步图像传感器像素设计(李东盛,2014),引入了一种新的时间误差方法,以 8×8 的像素阵列进行了仿真,同样未进行流片验证。2017年天津大学提出了一种时域灵敏度增强型的动态视觉传感器,通过在像素单元增加亚阈值区的MOS管个数来增强像素的灵敏度(徐江涛等,

2017)。2017年深圳大学发表了仿视网膜细胞的硅图像传感器像素设计和基于SMIC $0.13 \mu\text{m}$ 工艺的动态视觉传感器设计采用基础的像素电路设计并以 8×8 像素阵列进行了流片,但芯片功能并未得到实现(陆河辉,2016)。Chen和Guo(2019)于2019年提出异步时基图像传感器可以融合时间对比度检测和亮度测量。DVS像素结构只对变化的像素和触发事件做出反应。脉冲宽度调制像素结构对变化的光强度信息进行量化。脉冲视觉图像传感器方面,2017年北京大学数字视频编解码技术国家工程实验室黄铁军团队提出了一种全新的视觉形式,称为视达(Vidar = Visual + radar)。视达受灵长类视网膜中心凹采样机制的启发,采用脉冲序列表达光的变化过程,能够有效在更为精细的时间尺度下保留物理光强变化的时序信息。基于视达模型,北大团队采用与传统相机同样的CMOS传感器和消费级的集成电路,研制出了脉冲视觉芯片和相机,实现空间分辨率 400×250 、时间分辨率 $25 \mu\text{s}$,动态范围达到100 dB。

2.3.3 三维成像视觉传感器

基于飞行时间的三维图像传感器的研究方面,国内的许多高校、科研院所和企业作出了很大的贡献。2014年,西安电子科技大学基于 $0.18 \mu\text{m}$ CMOS工艺设计了一款 256×256 的CMOS图像传感器,像素为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$,该像素结构的特点是将像素分成两部分,减小了电荷的横向传输距离,提高了电荷的传输速度。2020年,天津大学的徐江涛等人根据TOF原理设计了双浮栅(floating diffusion, FD)节点且梯度掺杂的像素结构,并提出了一种对电荷转移不完全问题的校准算法,仅通过改变时序和处理数据便可提高传感器精度;以及一种时钟传输结构以消除因时钟传输带来的列FPN噪声,可以实现在100MHz调制频率下将调制对比度校准到98%以上(李嘉文,2020)。2020年,西安电子科技大学的朱樟明、杨银堂研究团队设计了一款DTof SPAD激光雷达传感器芯片。该DTof SPAD激光雷达传感器芯片在单芯片上不仅集成了核心感光器件SPAD及精准测距电路,同时该传感器具有多种测距精度优化和抗背景光干扰算法等功能,该传感器具有超30 帧/s的刷新率,分辨率为 $32 \times 32 \times 4$,同时该芯片在200 mW的功耗下可以实现12~15 m的远距离高精度探测,满足航空航天、无人系统、消费电子等应用对远距离三维感知的需求。深圳市灵明光子

科技有限公司于2021年发布了自主研发、采用全球先进背照式3D堆叠工艺技术的D-ToF单光子成像传感器ADS3003,其物理分辨率达到了 240×160 ,面阵尺寸为0.35英寸,室内环境下测量距离可达15 m,室外环境下可达5 m,帧率最高可达50帧/s,其综合性能达到了国际一流水平。

芯视界在单光子D-ToF(SPAD)技术和应用落地上处于领先地位,是全球率先研究单光子D-ToF三维成像技术的先驱之一。2020年发布了QQVGA分辨率单光子(SPAD)面阵D-ToF传感器VI4310,分辨率为 160×120 、最高支持120帧/s刷新率,在200 mW的整体超低功耗下(包括DSP和ISP算法)实现10 m的远距离探测,在单芯片上实现了核心感光器件SPAD Array及精准测距电路、图像处理算法等高度集成。

2.3.4 微光高动态视觉传感器

微光高动态图像传感器方面,2018年,中国科学院大学的团队针对科学级CMOS图像传感器进行研究(张元涛,2018),其基底构造与CCD传感器一致,而采用CMOS读出电路的结构,通过这种方式进一步降低系统噪声,同时保证了高灵敏度和大动态范围的成像要求。同年,南京理工大学的团队基于NSC1105图像传感器和NVT-5型像增强器,对宽动态彩色像增强CMOS成像系统进行了研究(王逸伦,2018),实现了行驱动的优化及图像降噪、彩色化处理。天津大学研发了 10^{-4} lux微光成像芯片和超高灵敏度128级TDI等成像芯片(Nie等,2016)等,满足国家重大应用需求。思特威公司凭借独有的双转换增益技术、聚焦视频成像的高动态范围等技术,研制了超星光级系列、车载系列和全局快门等系列芯片,可实现140 dB超高动态范围、0.58 e⁻超低读出噪声以及240帧/s图像采集帧率等性能,满足安防监控、机器视觉、智能交通以及消费电子等应用需求。2018年,思特威早于索尼发布了第一款背照式全局快门产品(许佳佳等,2014),如今,这款国产自研的高端背照式全局快门产品,已经广泛应用在更多新兴机器视觉应用中。

2.4 红外图像传感器

国内从上世纪80年代后期陆续开始红外焦平面探测器的研制。尽管国内的第2代、第3代红外焦平面技术在材料、器件工艺、读出电路、杜瓦和致冷等方面取得一些进展,完成了几类器件的研制,但还

有许多关键技术还没有完全突破,可靠性、工程化和通用化与标准化水平有待进一步提高;第4代产品刚开始进行技术突破,到目前为止,只有为数很少的工程化产品提供使用。虽然近几年国家在红外探测器技术方面加大投入,但总体水平与西方发达国家相比仍有较大差距。

2.4.1 大面阵红外探测器

国内研究大面阵的单位和公司有中国科学院上海技术物理研究所(上海技物所)、昆明物理研究所和华北光电技术研究所等。

中国科学院上海技物所于2014年成功研制了 640×512 大规模T2SL红外焦平面器件,于2020年研制了规模达 $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$ (像元间距 $15 \mu\text{m}$)的T2SL长波焦平面。并于2022年(张阳等,2023)提出满足工程化应用需求的对称式八杆的冷平台支撑机构,来支撑某航天项目的 $6 \text{ K} \times 6 \text{ K}$ 超大规模面阵红外探测器。

同年报道了 2560×2048 (像素尺寸 $10 \mu\text{m}$),中心距为 $1 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的InGaAs焦平面探测器,峰值探测率优于 1.0×10^{13} Jones,有效像元率达到99.7%(李雪等,2022)。

昆明物理研究所于2020年报道了 $2 \text{ K} \times 2 \text{ K}$ (像素间距 $18 \mu\text{m}$)的中波和短波红外焦平面器件,采用p型碲镉汞材料,通过B⁺注入,钢柱与读出电路互联,形成n-on-p平面结器件,在77 K测试温度下表现出较好的均匀性和较低的盲元水平(孔金丞等,2020)。并于2022年报道了具有有效像元数超过99.9%、平均峰值探测率大于 4×10^{12} Jones、暗电流密度为 1 nA/cm^2 的 $2 \text{ K} \times 2 \text{ K}$ (像素间距 $18 \mu\text{m}$)碲镉汞红外焦平面器件(龚晓丹等,2022)。

华北光电技术研究所于2022年报道了一款 1280×1024 (像素间距 $10 \mu\text{m}$)碲镉汞长波探测器(祁娇娇等,2022),截止波长为 $9 \mu\text{m}$,有效像素数不少于99.4%,非均匀性不超过4%。

我国的大面阵探测器在规模和像素尺寸方面都努力向国外看齐,现已有诸多产出,但参数和性能方面仍存在一定差距。

2.4.2 宽谱段红外探测器

中国科学院上海技物所于2014年报道了 320×256 (像素间距 $30 \mu\text{m}$)InAs/GaSb T2SL长波红外焦平面探测器(许佳佳等,2014),响应波段为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,在77 K测试温度下,探测器100%截止波长为

10.5 μm , 平均峰值探测率为 8.41×10^9 Jones, 盲元率为 2.6%, 不均匀性为 6.2%。并于 2019 年(饶鹏等, 2019)以该探测器为核心部件, 开发了高灵敏度长波红外探测系统, 可实现信息获取噪声为 0.065 mV, 系统的 NETD 达到 19.6 mK, 黑体探测率达到 7.72×10^{10} Jones。同年上海技物所报道了长波量子阱级联探测器(Zhou 等, 2019), 宽带响应范围为 7.6~10.4 μm , 其光谱形状和线宽可根据薄势垒的厚度进行调整, 同时对工作温度不敏感。该器件可以在超过液氮温度下工作, 在 77 K 下, 峰值响应度为 63 mA/W, 约翰逊噪声限制探测率为 5.1×10^9 Jones; 在 30 K 下, 约翰逊噪声限制探测率可达到 2.5×10^{12} Jones。

中国科学院半导体研究所的 Jiang 等人(2019)和蒋洞微等人(2020)基于 InAs/GaSb T2SL, 研制了具有 N-M- π -B- π -M-N 结构的 L/LWIR 双色探测器。在 50 mV~-10 mV 偏压下, 蓝色通道在 2~8 μm 波长范围内的探测率为 10^{11} Jones 以上, 在 -50 mV~-80 mV 偏压下, 红色通道在 7~12 μm 波长范围内的探测率能达到 10^{11} Jones 以上。

2.4.3 高灵敏度红外探测器

中国科学院上海技物所于 2022 年(于春蕾等, 2022)报道了国内首个 2560×2048 (像素间距 10 μm) InGaAs 短波红外焦平面探测器, 工作波段为 0.9~1.7 μm , 室温下暗电流密度为 11.62 nA/cm², 峰值探测率达到 1.11×10^{13} Jones, 响应不均匀性优于 3%, 焦平面有效像素率高于 99.7%, 动态范围大于 120 dB, 并进行了演示成像。

华北光电技术研究所于 2020 年推出了 640×512 , 感光材料为碲镉汞或铟化铟, 像素尺寸为 10 μm 、15 μm 、25 μm 的中波红外焦平面探测器, 其 NETD 分别为 30 mK、15 mK、13 mK。同年推出了 1280×1024 中波红外焦平面探测器, 像素尺寸分别为 10 μm 、15 μm , NETD 分别为 25 mK、20 mK。

武汉高芯科技于 2018 年(Tan 等, 2018)报道了 640×512 (像素间距 15 μm) 的基于 InAs/GaSb T2SL 的长波红外焦平面探测器, 在 80 K 工作温度下, 8.1 μm 处的光谱响应度为 3.93 A/W, 量子效率可达 38.6%, 峰值探测率为 1.65×10^{11} Jones, 以及 99.5% 的像素可操作性。该公司的碲镉汞制冷型红外焦平面具有较高的灵敏度和良好的画面均匀性, 如规模为 320×256 、像素间距为 30 μm 的 C330M 中波红外探测器, 其 NETD(F/2) 可达 9 mK, 有效像素率超过

99.5%, 动态范围超过 80 dB。

华北光电技术研究所于 2020 年推出了 1024×6 碲镉汞长波红外焦平面探测器, 像素尺寸(μm) 为 20×24 , 平均 NETD 为 3×10^{11} Jones, 有效像素率为 99.5%, 响应率不均匀性小于等于 7%。

昆明物理研究所于 2021 年报道了规格为 640×512 , 像元间距分别为 15 μm 和 25 μm 的 p-on-p 碲镉汞长波探测器, 两款探测器的截止波长为 10 μm , NETD 均不超过 25 mK, 有效像元数大于等于 99% (郝斐等, 2022)。

同时, 国内许多学者针对提升探测器的灵敏度, 提出了新的技术途径和器件。南京大学的 Long 等人于 2016 年提出并制备了一种将石墨烯夹在 MoS₂ 与 WSe₂ 原子薄层之间形成的 p-g-n 异质结构(Long 等, 2016), 其内建电场有效抑制了暗电流, 在室温下能够在可见光到短波(400~2400 nm)波段内响应, 尤其在近红外波段的比探测率可达到 10^{11} Jones。

北京大学 Yin 等人(2018)展示了基于二维 Bi₂O₂Se 晶体的红外探测器, 它在 1200 nm 处的灵敏度可达到 65 A/W, 室温下具有约为 1 ps 的超快光响应率, 可通过改进晶体生长、探测器几何形状和制造工艺来达到更好的性能。

华南理工大学的解博名等人(2022)报道了基于激子解离窄化机制的改进型层级器件, 从而实现响应峰值为 940 nm 近红外窄带有机光电探测器, 该器件峰值比探测率高达 2.3×10^{13} Jones。

目前国内有许多高等院校的科研队伍致力于解决探测器的高灵敏度的问题, 已取得显著突破, 需要与企业展开密切合作, 推动产学研深度融合, 尽快将技术途径等科研成果实现产出。

2.4.4 双色/多色红外探测器

华北光电技术研究所于 2020 年(邢艳蕾等, 2020)报道了一款 S/MWIR MCT 红外双色探测器, 规模为 320×256 , 像素间距为 30 μm , 平均峰值探测率为 2.21×10^{12} Jones 和 2.13×10^{11} Jones。

北京理工大学 Luo 等人(2022)提出了一种谐振腔增强型的胶体量子点(CQD)双波段红外光电探测器, 可对短波和中波红外进行响应, 响应度最大为 1.6 A/W 且探测率最高可达 2×10^{11} Jones。

中国科学院上海技物所胡伟达团队(Martyniuk 和 Rogalski, 2022)于 2022 年提出了一种非制冷型双色红外探测器, 其中 BP/MoS₂ p-n 结用于中波检测,

MoS₂/Si n-p 结用于近红外检测,形成BP/MoS₂/Si的垂直范德华异质结构。室温下探测器在中波3.5 μm处的峰值探测率为 6.4×10^9 Jones,比探测率为 3.51×10^9 Jones,在近红外探测下的比探测率为 3.34×10^8 Jones。

高德红外于2021年公布了自主研发的国内首款百万像素级双色红外探测器,如今已实现量产。基于T2SL的C330S中长波双色探测器的阵列规模为 320×256 ,像素间距为30 μm,波段覆盖范围为中波3.7~4.8 μm、长波7.7~9.5 μm,中波波段的NETD小于20 mK、电路动态范围超过76 dB,长波波段的NETD小于25 mK、动态范围大于80 dB,探测器的有效像元率超过99.0%,响应非均匀性小于8%,工作温度范围-45 °C~+71 °C。

2.4.5 高温工作型红外探测器

上海技物所于2019年(周易等,2019)报道了基于InAs/GaAsSb带间级联 320×256 中波红外焦平面,该器件在127 K下NETD为55.1 mK,盲元率为2.3%。中国科学院上海技物所于2021年(Wang等,2022)报道了范德华异质结构的快速非制冷型中波红外探测器,其响应时间为13 ns,光响应度为2.5 A/W,量子效率大于85%,室温下的黑体辐射峰值探测率为 2×10^{10} Jones,77 K下的峰值探测率为 10^{11} Jones。

昆明物理研究所于2022年(陈军等,2023)报道了基于As注入掺杂p-on-p技术的 640×512 (像素间距15 μm)中波红外碲镉汞探测器,工作温度为150 K,NETD小于15 mK。并配合该器件研制了重量小于270 g的探测器组件。

中国科学院半导体研究所于2022年(She等,2022)报道了一种AlAsSb/InAsSb超晶格势垒结构,以降低光响应的偏压依赖性,并研制了p-B-n T2SL中波红外探测器,在150 K时的截止波长约为5 μm。且在150 K、-100 mV下的暗电流密度为 1.2×10^{-4} A cm⁻²,在峰值响应度处的量子效率为29%,比检测率为 1.2×10^{11} Jones。

国内红外非制冷探测器发展迅速,多家企业推出非制冷产品在各工业领域得到应用。

北方广微致力于非制冷型红外焦平面探测器的研制与生成,旗下共7款非制冷型红外探测器,其中GWIR0202X1A长波探测器的阵列规模为 384×288 ,像元间距为25 μm,响应波段为8~14 μm,NETD小于35 mK,热响应时间低于12 ms,帧频可达60 Hz。

艾睿光电是国内研制非制冷红外芯片的领军企业,于2021年公布了世界第一款8 μm非制冷红外热成像探测器芯片,规模为 1920×1080 ,能满足轻量化、高性能的需求,该技术应用于该公司多款产品上,如Asens汽车红外热像仪。该公司的非制冷型红外芯片共14款,像素间距有10 μm、12 μm、17 μm,其中像素间距为10 μm的RTDS101M红外探测器芯片采用非制冷型氧化钒微测热辐射计,光谱响应范围为8~14 μm,阵列规模为 1280×1024 ,可操作率超过99.5%,NETD(f/1.0,30 Hz,300 K)小于50 mK,热响应时间低于10 ms,工作温度范围为-40 °C~+85 °C,帧频可达60 Hz。2021年,研制了8 μm的非制冷红外热成像探测器芯片,面阵规模为 1920×1080 ,能够满足红外热成像仪轻量化、高性能的需求。

高德红外推出的基于氧化钒晶圆级封装非制冷红外探测器可对8~14 μm波段进行光谱响应,具有高灵敏度,全系列的典型NETD小于40 mK,工作温度范围为-40 °C~+85 °C,规格有 640×512 (像素间距12 μm)、 400×300 (17 μm)、 256×192 (12 μm),热响应时间小于12 ms。该公司金属封装的氧化钒非制冷长波红外探测器有 1280×1024 (像素间距12 μm)、 800×600 (17 μm)、 640×512 (12 μm)、 400×300 (17 μm)规模,光谱响应范围为8~14 μm,工作范围为-40 °C~+85 °C,且热响应时间均小于12 ms,典型NETD分别达到50 mK、30 mK、40 mK、30 mK。

大立科技推出的基于非晶硅非制冷焦平面探测器的光谱范围也可达到8~14 μm,以DLE1920-15 μm为例,其NETD(f/1,300 K,50 Hz)低于50 mK,规模为 1920×1080 ,像素间距为15 μm,工作温度范围为-40 °C~+60 °C。

2.4.6 红外偏振探测器

华中科技大学的Li等人(2018)研究发现基于少层GeAs₂的偏振敏感光探测器具有高度的各向异性,其振动能力和平面各向异性使得二维材料GeAs₂成为探索层间耦合和未来光电器件应用的重要方向。

郑州大学的Wu等人(2019)报道了一种基于石墨烯/PbSe₂/锗异质结的偏振探测器并进行了高分辨率偏振成像的演示,证明该探测器具有高偏振敏感度(112.2)、宽谱段响应(紫外到中波波段)以及响应速度快等优点。

中国科学院半导体研究所的魏钟鸣团队针对主族层状低维半导体,研究其光电各向异性在偏振成像领域的应用(赵凯等,2022)。2017年该团队(Wang等,2017)基于二维GeSe研制出532 nm、638 nm、808 nm偏振敏感光电探测器,表现出良好的可重复周期、偏振角及显著的二向色比,证明少层GeSe具有集成SW-NIR光学应用的能力,可应用于偏振检测。Zhao等人(2021)研制基于准一维Sb₂S₃材料的偏振探测器,无需借助光学偏振片,即可进行偏振成像,在360~1 550 nm波段内的光谱响应较好。2021年该团队通过合金化的方法研制了基于Sb-S-Se纳米线(NW)的宽波段偏振探测器,它在紫外—可见光—近红外波段内均具有良好的光谱响应和偏振特性,相较于Sb₂S₃偏振探测器具有更高的响应率(6.38 A/W)与探测率(1.63×10^9 Jones)。

2022年中国科学院上海技物所的胡伟达团队(Chen等,2022)将动能匹配和能带匹配的范德华异质结应用于红外探测器,发现该BP/Bi₂O₂Se异质结红外探测器具有较高的偏振特性,在2 μm 表现出17的大偏振比。

北方广微GWPL0318X2A偏振探测器具有640 \times 512规模,像元间距为17 μm ,光谱响应范围为8~14 μm ,NETD小于40 mK,热响应时间低于15 ms,帧频可达50 Hz。该偏振探测器的偏振方向为0°、90°、45°、135°,消光比超过2,可应用于辅助面部识别、目标识别、油污检测以及道路检测等方面。

3 国内外研究进展比较

3.1 CCD图像传感器

国内在多光谱TDI CCD、高光谱CCD和EMCCD三方面取得了重要进展,目前的器件性能达到了国际一流水平。

国产多光谱TDICCD已经批量应用于高分辨率遥感成像卫星,国产高光谱CCD突破了关键技术,国产EMCCD基本具备了工程化应用能力。

3.2 CMOS图像传感器

通过对上述正照式、背照式和堆栈式架构的CMOS图像传感器技术的国际国内研究现状进行比较分析可知,在工业、医疗和天文等专业影像领域,国际和国内的视觉传感器企业所开展的研究方向基本一致,针对不同架构的传感器类型,均有着国际领

先的代表性产品,如背照式架构研究方面,日本Sony推出了2.74 μm 像素的系列化背照式全局快门产品,国内的思特威也同样推出了4 μm /4.2 μm 像素系列化背照式全局快门产品;美国Teledyne E2V推出了一系列科学级背照式产品,峰值量子效率超过90%,国内的长光辰芯则推出了科学级背照式CMOS视觉传感器产品,峰值量子效率最高可达95%。

综合比较来看,国际的视觉传感器企业数量更多,产品丰富,并且在视觉传感器领域的研究起步早,拥有丰富的光学视觉传感器的技术基础,以Sony为代表的传感器企业引领了全球视觉传感器技术的发展。虽然国内在视觉传感器领域的研究起步较晚,但近些年随着政府大力支持集成电路产业的发展,推出了一大批产业扶持政策,越来越多的企业把研发方向放在了光学视觉传感器方向,使得我国的光学视觉传感器技术实现了突飞猛进的发展,推出了一系列具有国际同类领先水平的高性能视觉传感器产品,在全球图像传感器市场所占的市场份额逐步提升,研发能力已经达到国际同类的最高水平。

3.3 智能视觉传感器

由于我国CMOS图像传感器研究和产业化起步较晚,国内在CMOS图像传感器领域的研究与世界先进水平相比还有一定差距,不过近年来随着对该领域关注度的提升,越来越多的机构加入了该领域的研究。

1) 三维成像视觉传感器。在三维成像视觉传感器方面,由于ToF技术对光学传感芯片要求相对较高,国外芯片产业发展较早且产业链较为完善,目前国外传感器芯片厂商在国内ToF产业链中基本占据着主导地位,国内智能端的三维图像传感器供应也都被日本索尼公司等公司垄断。

同时,在相关的性能优化以及结构创新中,国内外也存在着较大差距。2016年,中国科学院半导体研究所报道了256 \times 256分辨率ToF图像传感器,测距误差为1.6%。2018年,日本索尼公司推出了320 \times 240分辨率的ToF传感器,1 m处的测距误差为5.9 mm。同年,索尼公司推出VGA分辨率ToF传感器产品IMX456QL,已广泛应用于各类智能终端,其1 m处分辨率约为6 mm。2018年,美国微软公司报道了基于光栅解调像素的1 024 \times 1 024分辨率ToF

图像传感器,测距误差达到1.2%。目前我国研究技术较之国外还有相当大的差距,这需要一定的时间和努力去弥补。

2) 仿生视觉图像传感器。在仿生视觉图像传感器方面,经过对比发现,国内起步较晚。2012年、2013年天津大学研制出了电路但是没有进行流片验证,2017年深圳大学设计的动态视觉传感器进行流片后功能却未实现,一定程度上反映了与国外的差距较大。国外在2015年开始就对信号的完整性、灵敏度以及抑制噪声方面展开了研究并颇有成效。国内也对信号的灵敏度研究颇有进展,例如天津大学设计的DVS通过在像素单元增加堆叠的二极管连接亚阈值MOS管来增强像素的灵敏度,除此之外,Chen等人(2019)提出的ATIS可以融合时基对比度检测和亮度测量,也是国内动态视觉传感器的重要突破之一。

3) 微光高动态图像传感器。在微光高动态图像传感器方面,虽然国内近几年在微光图像传感器方向的发展突飞猛进,但是与国外的先进技术相比,在转换增益、读出噪声、量子效率和动态范围等方向还是有所差距。从全球市场来看,索尼和三星是绝对的技术引领者和市场占有者,国内的豪威科技、格科微电子和思特威等企业在车载、安防等领域占据着一定的市场。另外,天津大学、上海集成电路研发中心以及中国科学院等单位也具有一定的技术实力。

总体来说,我国CMOS图像传感器研究和产业化虽然起步较晚,但国内的众多高校、科研院所和企业都已经开展了深入的研究,积累了很多宝贵的经验和研究成果,为我国研制世界一流的CMOS图像传感器芯片产品提供了强有力的支撑。

3.4 红外图像传感器

在红外探测器发展方面,与国外科研机构相比,国内的科研机构对于红外探测器的研究起步较晚。因此,欧美的科研机构一般处于“领跑”的状态,而国内的科研机构更多的是属于“跟跑”的状态:大多数红外探测器的开创性工作由欧美科研机构开展,完善了红外探测的材料理论,建立了完整高性能的红外探测器生产工艺与生产设备。而国内的科研机构开展的主要是对其提出技术路线的跟随与优化,虽然可以在类别和功能已经逐步赶上,但在性能、规模和集成度方面与国外仍有较大的差距。此

外在红外探测器的生产制造方面仍然受到很大的约束。大规模的红外读出电路的生产这一关键工序目前主要仍掌握在国外厂商,红外探测器材料生长、耦合和封装测试相关的仪器设备目前主要供应商也为国外厂商。需要国内的研究机构与产业界共同合作,推动红外探测器生产制造的国产化替代,减小我国红外探测器的生产周期、生产成本和生产良率,大面阵红外探测器国内外参数对比如表12所示。

表12 大面阵红外探测器国内外参数对比

Table 12 Comparison of parameters of large area array infrared detectors at home and abroad

国家	研究机构	年份	规模	像素间距/ μm
美国	RSC公司	2004	2 K \times 2 K	18
		2016	4 K \times 4 K	15
	雷神公司	2016	4 K \times 4 K	20
		2022	4 K \times 6 K	10
	Teledyne公司	2012	4 K \times 4 K	15
		2022	8 K \times 8 K	10
法国	Lynred公司	2022	2 K \times 2 K	15
		2020	1 K \times 1 K	15
中国	中国科学院 上海技物所	2022	2 K \times 2 K	10
		2020	2 K \times 2 K	18
	昆明物理研究所	2022	2 K \times 2 K	18
		2022	1 K \times 1 K	10

另外,在民用非制冷领域国内的探测器厂商,如高德红外、艾睿光电、大立科技和飒特红外等,均在非制冷红外探测器方面投入了力量进行攻关,并发布了非制冷红外相关的新产品,也具备了批量化的生产能力。基于中国更为广阔的应用需求,国内非制冷红外探测器目前发展蓬勃、势头强劲。未来通过学术界与工业界的机构的合作,共同促进红外探测器的产业发展(表13和表14)。

4 发展趋势与展望

1) 多光谱TDI CCD方面。未来基于CCD和CMOS融合工艺的CCD感光—CMOS电路读出的多光谱TDI CCD架构将逐渐成熟并大量应用。

2) 高光谱CCD方面。未来围绕更高帧频、更大阵

表13 国内外双色红外探测器对比

Table 13 Comparison of two-color infrared detectors at home and abroad

国家	研究机构	年份	波段	材料
美国	AIM公司	2007	M/MWIR	碲化物 T2SL
	雷神公司	2009	M/LWIR L/LWIR	碲镉汞
意大利	都灵理工大学	2020	M/LWIR	碲镉汞
韩国	亚洲大学	2021	VIS/IR	p-Ge/n-MoS2
英国	Leonardo	2022	M/LWIR	碲镉汞
中国	复旦大学	2019	VIS/NIR	MoS2/InAlAs/InGaAs
	半导体所	2019	L/LWIR	InAs/GaSb T2SL
	北京理工大学	2022	S/MWIR	CQD
	上海技物所	2022	NIR/ MWIR	BP/MoS2/Si

表14 国内外HOT红外探测器对比

Table 14 Comparison of HOT infrared detectors at home and abroad

国家	研究机构	年份	工作温度/K	NETD/mK
以色列	SCD公司	2006	100 (MWIR)	14
		2012	180 (MWIR)	43
		2022	130 (MWIR)/77 (LWIR)	15
美国	密苏里大学	2011	非制冷型 (L/LWIR)	14/16
法国	蒙彼利埃第二大学	2015	120 (MWIR)	-
		2019	140 (MWIR)	-
德国	AIM公司	2022	100 (LWIR)	30
	行星研究所	2022	非制冷型 (MWIR, LWIR)	50
中国	中国科学研究院	2019	127 (MWIR)	55.1
	上海技物所	2021	非制冷型 (MWIR)	-
	昆明物理研究所	2022	150 (MWIR)	15
	半导体研究所	2022	150 (MWIR)	-
	北方广微	-	非制冷型 (LWIR)	35
	艾睿光电	-	非制冷型 (LWIR)	40

注：“-”表示未知。

列规模、背照高量子效率宽光谱响应、背照高调制传递函数等技术进一步发展。以器件表面镀滤光膜实现高光谱探测的新型探测器技术也将继续完善并实用化。

3)EMCCD方面。除了大面阵、光子计数等具有极致性能的EMCCD之外,低驱动电压EMCCD、具备全天时成像功能的浮栅放大器信号选择型EMCCD将继续发展。

从全球市场来看,Yole公布的2020年CMOS图

像传感器市场报告显示,CMOS图像传感器的市场价值达到了207亿美元,预计到2026年全球CMOS图像传感器市场总量将达到315亿美元。2020年7月,国务院印发的《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策》指出,中国芯片自给率要在2025年达到70%。而我国目前半导体自给率仅达到36%,国产化替代刻不容缓。因此,CMOS图像传感器的发展前景良好。随着自动驾驶、智能

交通和机器视觉等领域的快速发展,对CMOS图像传感器提出更高灵敏、更宽动态范围以及更低噪声的需求,CMOS图像传感器的发展面临更高技术要求的挑战。因此,研究高量子效率、高满阱容量像素设计技术及低噪声高速读出电路设计技术,对于提高我国图像传感器自主研发水平,满足国内对于高端CMOS图像传感器的需求,具有极大的科学价值和经济效益。

背照式架构的CMOS图像传感器将成为传感器市场的主流产品,背照式架构传感器凭借超过灵敏度,已经成为生命科学、天文和广电等专业影像领域的第一选择,并且各个图像传感器企业均已经推出了面向工业领域的背照式全局快门传感器产品,未来随着背照式架构技术的不断成熟,制造成本逐渐下降,背照式架构的图像传感器将会在更多的领域实现应用,成为未来传感器市场的主流产品。

高集成度的智能化视觉传感器将成为研究重点,随着堆栈式架构技术的快速发展,让视觉传感器实现小型化的同时,多功能化也成为全球在视觉传感器方向的研究重点,2020年索尼最新推出世界首款集成了AI(artificial intelligence)运算单元的智能化视觉传感器IMX500,通过堆叠式工艺,在传感器的逻辑晶圆上设计配备了DSP(digital signal processing),专门用于AI信号的处理和缓存,虽然该传感器在处理复杂的分析任务方面还存在瓶颈,但高集成度的智能化视觉传感器有可能打破传统的图像传感器和处理器分离的模式,必将成为各企业竞相研发的重点。

ToF技术具有低功耗和微型化的重要优势,能够满足便携式电子设备的需求。近年来国内外不断展开研究,提出了各种高分辨率、低测距误差的ToF传感器结构。然而,目前ToF传感器仍存在量程与精度无法兼顾,抗背景光干扰差以及三维信息解算慢等问题,需要发展新型的设计技术。仿生视觉图像传感器未来可面向多传感器融合的神形态工程系统发展。将视觉、语音及触觉等多神形态传感器融合,应用于神形态工程的智能感知系统。

红外探测器经过近50年的蓬勃发展,已经成功研制响应覆盖短波到甚长波,规模从长行列覆盖到 $8\text{K} \times 8\text{K}$ 大面阵,多色集成的各类高性能红外探测器,具有成像系统体积小、质量轻、功耗低、系统灵敏度高以及工作帧频高等一系列优点。然而,随着红

外探测需求的进一步提升,如目标多变、背景复杂、复杂环境和任务多元等应用挑战还需要从以下几个方面进一步发展:

1) 红外大面阵探测器均存在非均匀性问题,非均匀性影响探测精度,特别是在弱信号探测时尤为严重。解决该问题需要从红外探测器材料生长工艺,读出电路一致性以及读出电路与探测器耦合进行入手。

2) 针对自动驾驶等复杂红外背景的应用,单一波段的红外探测器容易受环境变化的干扰,导致无法对目标进行准确识别。需要发展具有多维度信息获取能力的红外探测器,同时获取多个光谱维、偏振维的红外图像。

3) 探测器向高集成度、小型化方向发展,这主要体现在像元间距越来越小,阵列规模越来越大。后端需要处理的图像压力越来越大,需要将整个红外探测系统与红外焦平面进行集成,发展感存算一体的红外探测器,将智能化的处理技术在片上进行集成。发展新型红外微分探测器,将抑制复杂背景的功能置于读出电路端,实现微弱目标探测的对比度和图像信噪比的提升。

4) 提高红外探测器的环境适应性,红外探测器广泛应用的一个主要约束就是对低温环境的要求,如何降低高性能红外探测器的工作温度需求、降低工作功耗、提高组件封装的集成度也是未来一段时期的主要研究内容。

致谢 本文由中国图象图形学学会视觉传感专业委员会组织撰写,该专委会链接为<http://csig.org.cn/detail/2547>。

参考文献(References)

- Akrarai M, Margotat N, Sicard G and Fesquet L. 2020. A novel event based image sensor with spacial and temporal redundancy suppression//Proceedings of the 18th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). Montreal, Canada: IEEE: 238-241 [DOI: 10.1109/newcas49341.2020.9159847]
- Antoni T, Nedelcu A, Marcadet X, Facoetti H and Berger V. 2007. High contrast polarization sensitive quantum well infrared photodetectors. *Applied Physics Letters*, 90 (20) : #201107 [DOI: 10.1063/1.2739408]
- Bai Y B, Farris M, Fischer L, Maiten J, Kopp R, Piquette E, Ellsworth J, Yulius A, Chen A, Tallarico S, Hernandez E, Holland

- E, Boehmer E, Carmody M, Beletic J W, Cho H, Holmes W, Seiffert M, Pravdo S, Jhabvala M and Waczynski A. 2018. Manufacturability and performance of 2.3- μm HgCdTe H2RG sensor chip assemblies for Euclid//Proceedings of SPIE 10709, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VIII. Austin, USA: SPIE: #1070915 [DOI: 10.1117/12.2317733]
- Bai Y B, Farris M C, Joshi A and Chuh T Y. 2004. Large-format hybrid visible silicon focal plane arrays for space- and ground-based astronomy//Proceedings of SPIE 5499, Optical and Infrared Detectors for Astronomy. Glasgow, UK: SPIE: 151-161 [DOI: 10.1117/12.553055]
- Bamji C S, Mehta S, Thompson B, Elkhatib T, Wurster S, Akkaya O, Payne A, Godbaz J, Fenton M, Rajasekaran V, Prather L, Nagaraja S, Mogallapu V, Snow D, McCauley R, Mukadam M, Agi I, McCarthy S, Xu Z P, Perry T, Qian W, Chan V H, Adepu P, Ali G, Ahmed M, Mukherjee A, Nayak S, Gampell D, Acharya S, Kordus L and O'connor P. 2018. IMpixel 65 nm BSI 320 MHz demodulated TOF image sensor with 3 μm global shutter pixels and analog binning//Proceedings of 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, USA: IEEE: 94-96 [DOI: 10.1109/isscc.2018.8310200]
- Beekman D W and van Anda J. 2001. Polarization sensitive QWIP thermal imager. *Infrared Physics and Technology*, 42(3/5): 323-328 [DOI: 10.1016/S1350-4495(01)00090-1]
- Bello D S S, De Bock M, Boulenc P, Vandebriel R, Wu L K, Van Olmen J, Malandrucolo V, Craninckx J, Haspelslagh L, Guerrieri S, Rosmeulen M and Borremans J. 2017. A 7-band CCD-in-CMOS multispectral TDI imager//International Image Sensor Workshop. Hiroshima, Japan: [s.n.]: 129-132
- Blank R, Beletic J W, Cooper D, Farris M, Hall D N B, Hodapp K, Luppino G, Piquette E and Xu M. 2012. Development and production of the H4RG-15 focal plane array//Proceedings of SPIE 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V. Amsterdam, the Netherlands: SPIE: #84530 [DOI: 10.1117/12.926750]
- Boukhayma A, Caizzone A and Enz C. 2020. A CMOS image sensor pixel combining deep sub-electron noise with wide dynamic range. *IEEE Electron Device Letters*, 41(6): 880-883 [DOI: 10.1109/LED.2020.2988378]
- Brandli C, Berner R, Yang M H, Liu S C and Delbruck T. 2014. A 240 \times 180 130 dB 3 μs latency global shutter spatiotemporal vision sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 49(10): 2333-2341 [DOI: 10.1109/jssc.2014.2342715]
- Breiter R, Ihle T, Wendler J, Lutz H, Rutzinger S, Schallenberg T, Hofmann K and Ziegler J. 2010. MCT IR detection modules with 15 μm pitch for high-reliability applications//Proceedings of SPIE 7660, Infrared Technology and Applications XXXVI. Orlando, USA: SPIE: #766039 [DOI: 10.1117/12.852313]
- Burgett G. 2018. The latest high-speed Phantom camera takes slow-mo to the next level [EB/OL]. [2023-01-17]. <https://www.digitaltrends.com/photography/vision-research-phantom-v2640>
- Chen J, Xi Z L, Qin Q, Deng G R, Luo Y and Zhao P. 2023. Advance in high operating temperature HgCdTe infrared detector. *Infrared and Laser Engineering*, 52(1): #20220462 (陈军, 习中立, 秦强, 邓功荣, 罗云, 赵鹏. 2023. 碲镉汞高温红外探测器组件进展. *红外与激光工程*, 52(1): #20220462) [DOI: 10.3788/IRLA20220462]
- Chen S S and Guo M H. 2019. Live demonstration: celeX-V: a 1 M pixel multi-mode event-based sensor//Proceedings of 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Long Beach, USA: IEEE: 1682-1683 [DOI: 10.1109/CVPRW.2019.00214]
- Chen Y, Xu Y, Chae Y, Mierop A, Wang X Y and Theuwissen A. 2012. A 0.7e⁻rms-temporal-readout-noise CMOS image sensor for low-light-level imaging//Proceedings of 2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, USA: IEEE: 384-386 [DOI: 10.1109/ISSCC.2012.6177059]
- Chen Y F, Tan C W, Wang Z, Miao J S, Ge X, Zhao T G, Liao K C, Ge H N, Wang Y, Wang F, Zhou Y, Wang P, Zhou X H, Shan C X, Peng H L and Hu W D. 2022. Momentum-matching and band-alignment van der Waals heterostructures for high-efficiency infrared photodetection. *Science Advances*, 8(30): #1781 [DOI: 10.1126/sciadv.abq1781]
- Cheng Q, Paradis S, Bui T and Almasri M. 2011. Design of dual-band uncooled infrared microbolometer. *IEEE Sensors Journal*, 11(1): 167-175 [DOI: 10.1109/jsen.2010.2056364]
- Cheriyana S, de la Torre J A S, Calvo J A V, Kurvits J, Nottingham J and McClure J. 2022. COSMOS large format 64 M pixel CMOS camera for ground-based astronomy//Proceedings of SPIE 12191, X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X. Montréal, Canada: SPIE: #1219101 [DOI: 10.1117/12.2634291]
- Chuh T, Loose M, Gulbransen D J, Anglin S W, Beletic J, Piquette E C and Garnett J D. 2006. Astronomy FPA advancements at Rockwell Scientific//Proceedings of SPIE 6265, Space Telescopes and Instrumentation I: Optical, Infrared, and Millimeter. Orlando, USA: SPIE: #62652 [DOI: 10.1117/12.671813]
- Dehngani A, Wu D H, McClintock R, Li J K and Razeghi M. 2020. Planar nBn type-II superlattice mid-wavelength infrared photodetectors using zinc ion-implantation. *Applied Physics Letters*, 116(22): #221103 [DOI: 10.1063/5.0010273]
- Dorland B N, Dudik R P, Veillette D, Swindle R, Waczynski A and Kan E. 2009. Initial laboratory and sky testing results for the second generation H4RG-10 4 k \times 4 k, 10 micron visible CMOS-Hybrid detector//Proceedings of SPIE 7439, Astronomical and Space Optical Systems. San Diego, USA: SPIE: #74390 [DOI: 10.1117/12.827037]
- Feautrier P, Gach J L, Balard P, Guillaume C, Downing M, Hubin N, Stadler E, Magnard Y, Skegg M, Robbins M, Denney S, Suske

- W, Jorden P, Wheeler P, Pool P, Bell R, Burt D, Davies I, Reyes J, Meyer M, Baade D, Kasper M, Arsenault R, Fusco T and Diaz-Garcia J J. 2010. Characterization of OCam and CCD220: the fastest and most sensitive camera to date for AO wavefront sensing//Proceedings of SPIE 7736, Adaptive Optics Systems II. San Diego, USA: SPIE: #77360 [DOI: 10.1117/12.856401]
- Feutrier P, Gach J L, Owton D, Hicks M, Baker I, Barnes K and Bou-tolleau D. 2022. Sub-electron noise infrared camera development using Leonardo large format 2 K × 2 K SWIR LmAPD array//Proceedings of SPIE 12191, X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X. Montréal, Canada: SPIE: #121911 [DOI: 10.1117/12.2630858]
- Figer D F, Gallagher J, Buntic L, Getty J and Lauxtermann S. 2022. The SATIN infrared detector development program and the road to HELLSTAR//Proceedings of SPIE 12191, X-Ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy X. Montréal, Canada: SPIE: #121910 [DOI: 10.1117/12.2627511]
- Finatou T, Niwa A, Matolin D, Tsuchimoto K, Mascheroni A, Reynaud E, Mostafalu P, Brady F, Chotard L, Legoff F, Takahashi H, Wakabayashi H, Oike Y and Posch C. 2020. 5.10 a 1 280 × 720 back-illuminated stacked temporal contrast event-based vision sensor with 4.86 μm pixels, 1.066 GEPS readout, programmable event-rate controller and compressive data-formatting pipeline//Proceedings of 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference-ISSCC. San Francisco, USA: IEEE: 112-114 [DOI: 10.1109/isscc19947.2020.9063149]
- Gach J L, Carignan C, Hernandez O, Jorden P R, Jordan D, Balard P, Vallée P, Amram P, Marcelin M and Epinat B. 2014. Development of a 4 k × 4 k frame transfer electron multiplying CCD for scientific applications//Proceedings of SPIE 9154, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VI. Montréal, Canada: SPIE: #91540 [DOI: 10.1117/12.2057021]
- Gershon G, Albo A, Eylon M, Cohen O, Calahorra Z, Brumer M, Nitzani M, Avnon E, Aghion Y, Kogan I, Ilan E and Shkedy L. 2013. 3 mega-pixel InSb detector with 10 μm pitch//Proceedings of SPIE 8704, Infrared Technology and Applications XXXIX. Baltimore, USA: SPIE: #870438 [DOI: 10.1117/12.2015583]
- Glzman A, Harush E, Jacobsohn E, Klin O, Klipstein P, Markovitz T, Nahum V, Saguy E, Oiknine-Schlesinger J, Shtrichman I, Yassen M, Yofis B and Weiss E. 2006. High performance InAlSb MWIR detectors operating at 100 K and beyond//Proceedings of SPIE 6206, Infrared Technology and Applications XXXII. Orlando, USA: SPIE: #62060 [DOI: 10.1117/12.667783]
- Gong X D, Li H F, Yang C W, Yuan S Z, Feng Y Q, Huang Y J, Hu X and Li L H. 2022. Study on large-area array SW HgCdTe infrared focal plane device. *Infrared and Laser Engineering*, 51 (9) : #20220079 (龚晓丹, 李红福, 杨超伟, 袁绶章, 封远庆, 黄元晋, 胡旭, 李立华. 2022. 大面阵短波碲镉汞红外焦平面器件研究. *红外与激光工程*, 51 (9) : #20220079) [DOI: 10.3788/IRLA20220079]
- Green A, Bains S, Hipwood L, Lee M, Owton D and McEwen K. 2022. Further developments of 12 μm pixel dual waveband MWIR-LWIR infrared detectors using MOVPE grown MCT//Proceedings of SPIE 12107, Infrared Technology and Applications XLVIII. Orlando, USA: SPIE: #121070 [DOI: 10.1117/12.2618765]
- Gunapala S, Ting D, Rafol S, Soibel A, Khoshakhlagh A, Keo S, Pepper B, Fisher A, Hill C, Wenger T, Pagano T, Choi K K, Lucey P, Wright R, Nunes M, Flynn L, Babu S and Ghuman P. 2021. T2SL focal planes for compact remote sensing instruments//Proceedings of SPIE 11723, Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications VIII. USA: SPIE: #1172302 [DOI: 10.1117/12.2595798]
- Hall D N B, Atkinson D, Blank R, Farris M, Goebel S B, Hodapp K W, Jacobson S M, Loose M and Zandian M. 2016. Performance of the first science grade λc = 2.5 μm HAWAII 4RG-15 array in the laboratory and at the telescope//Proceedings of SPIE 9915, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII. Edinburgh, UK: SPIE: #99150 [DOI: 10.1117/12.2234369]
- Hao F, Zhao S, Yang H Y and Hu Y L. 2022. Research progress of long wave p-on-n HgCdTe infrared focal plane devices. *Infrared*, 43(4): 1-8 (郝斐, 赵硕, 杨海燕, 胡易林. 2022. 长波 p-on-n 碲镉汞红外焦平面器件研究进展. *红外*, 43(4): 1-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.04.001]
- Helbert J, Maturilli A, Walter I, Säuberlich T, Pertenais M, Knollenberg J, Peter G and Grott M. 2022. TMAP: designing a thermal infrared multi-spectral imager for an Io mission//Proceedings of SPIE 12233, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXX. San Diego, USA: SPIE: #1223301 [DOI: 10.1117/12.2634262]
- Hong T, Chamlagain B, Lin W Z, Chuang H J, Pan M H, Zhou Z X and Xu Y Q. 2014. Polarized photocurrent response in black phosphorus field-effect transistors. *Nanoscale*, 6 (15) : 8978-8983 [DOI: 10.1039/C4NR02164A]
- Hwang A, Park M, Park Y, Shim Y, Youn S, Lee C H, Jeong H B, Jeong H Y, Chang J W N, Lee K, Yoo G and Heo J. 2021. Visible and infrared dual-band imaging via Ge/MoS₂ van der Waals heterostructure. *Science Advances*, 7 (51) : #2521 [DOI: 10.1126/sciadv.abj2521]
- Jhabvala M D, Choi K K, Gunapala S, Razeghi M and Sundaram M. 2020. QWIPs, SLS, landsat and the international space station//Proceedings of SPIE 11288, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVII. San Francisco, USA: SPIE: #1128802 [DOI: 10.1117/12.2539147]
- Jiang D W, Xu Y Q, Wang G W and Niu Z C. 2020. Research progress in antimonide-based type-II superlattice multi-color infrared detectors. *Journal of Synthetic Crystals*, 49(12) : 2211-2220 (蒋洞微, 徐应强, 王国伟, 牛智川. 2020. 基于碲化物二类超晶格的多色红外探测器研究进展. *人工晶体学报*, 49(12) : 2211-2220) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-985X.2020.12.001]

- Jiang Z, Sun Y Y, Guo C Y, Lv Y X, Hao H Y, Jiang D W, Wang G W, Xu Y Q and Niu Z C. 2019. High quantum efficiency long-/long-wave dual-color type-II InAs/GaSb infrared detector. *Chinese Physics B*, 28(3): #038504 [DOI: 10.1088/1674-1056/28/3/038504]
- Katayama H, Hirose M, Sato S, Shinozaki K, Kimura T, Balasekaran S, Inada H, Iguchi Y and Kimata M. 2021. Development status of T2SL infrared detector in JAXA//Proceedings of SPIE 11741, *Infrared Technology and Applications XLVII*. Florida, USA: SPIE: #117410 [DOI: 10.1117/12.2591334]
- Kawahito S, Suh S, Shirei T, Itoh S and Aoyama S. 2009. Noise reduction effects of column-parallel correlated multiple sampling and source-follower driving current switching for CMOS image sensors//Proceedings of 2009 International Image Sensor Workshop. Bergen, Norway: [s.n.]
- Kawai N and Kawahito S. 2002. A low-noise oversampling signal detection technique for CMOS image sensors//Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.00CH37276). Anchorage, USA: IEEE: 265-268 [DOI: 10.1109/IMTC.2002.1006851]
- Keel M S, Kim D, Kim Y, Bae M, Ki M, Chung B, Son S, Lee H, Jo H, Shin S C, Hong S, An J, Kwon Y, Seo S, Cho S, Kim Y, Jin Y G, Oh Y, Kim Y, Ahn J, Koh K and Park Y. 2021a. 7.1 a 4-tap 3.5 μm 1.2 mpixel indirect time-of-flight CMOS image sensor with peak current mitigation and multi-user interference cancellation//Proceedings of 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, USA: IEEE: 106-108 [DOI: 10.1109/isscc42613.2021.9365854]
- Keel M S, Kim D, Kim Y, Bae M, Ki M, Chung B, Son S, Lee H, Shin S C, Kye M, An J, Kwon Y, Seo S, Cho S, Kim Y, Jin Y G, Oh Y, Kim Y, Ahn J and Lee J. 2021b. A 1.2-mpixel indirect time-of-flight image sensor with 4-Tap 3.5- μm pixels for peak current mitigation and multi-user interference cancellation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 56(11): 3209-3219 [DOI: 10.1109/JSSC.2021.3112405]
- Kim D, Lee S, Park D, Piao C, Park J, Ahn Y, Cho K, Shin J, Song S M, Kim S J, Chun J H and Choi J. 2020. 5.4 a dynamic pseudo 4-tap CMOS time-of-flight image sensor with motion artifact suppression and background light cancelling over 120 klux//Proceedings of 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, USA: IEEE: 100-102 [DOI: 10.1109/isscc19947.2020.9063101]
- Klipstein P, Klin O, Grossman S, Snapi N, Lukomsky I, Yassen M, Aronov D, Berkowitz E, Glozman A, Magen O, Shtrichman I, Frenkel R and Weiss E. 2012. High operating temperature XBn-InAsSb barode detectors//Proceedings of SPIE 8268, *Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX*. San Francisco, USA: SPIE: #82680 [DOI: 10.1117/12.910174]
- Klipstein P C, Armon E, Avnon E, Benny Y, Brumer M, Cohen Y, Fraenkel N, Gliksman S, Glozman A, Hadari N, Hirsch I, Katz M, Klin O, Langof L, Lukomsky I, Marderfeld I, Nahor H, Nit-zani M, Rakhmievich D, Schusterman S, Shafir I, Shtrichman I, Shkedy L, Sicron N, Snapi N and Yaron N. 2022. HOT MWIR technology at SCD//Proceedings of SPIE 12107, *Infrared Technology and Applications XLVIII*. Orlando, USA: SPIE: #121070 [DOI: 10.1117/12.2615622]
- Ko S Y, Lee B W, Kim H J, Na S I, Kim J B, Bidenko P, Kim S and Kim Y H. 2022. Comparison of InGaAs and type-II superlattice based extended SWIR detectors//Proceedings of SPIE 12107, *Infrared Technology and Applications XLVIII*. Orlando, USA: SPIE: #1210703 [DOI: 10.1117/12.2607834]
- Kong J C, Li Y H, Yang C Z, Yang J, Qin G, Chen W Y, Chen X X, Ren Y, Wang S L, Hu X, Wang X Q, Li X J and Zhao J. 2020. Progress in MBE Growth of HgCdTe at Kunming Institute of Physics. *Journal of Synthetic Crystals*, 49(12): 2221-2229 (孔金丞, 李艳辉, 杨春章, 杨晋, 覃钢, 陈卫业, 陈道玄, 任洋, 王善力, 胡旭, 王向前, 李雄军, 赵俊. 2020. 分子束外延碲镉汞薄膜技术进展. *人工晶体学报*, 49(12): 2221-2229 [DOI: 10.3969/j.issn.1000-985X.2020.12.002]
- Kumagai O, Ohmachi J, Matsumura M, Yagi S, Tayu K, Amagawa K, Matsukawa T, Ozawa O, Hirono D, Shinozuka Y, Homma R, Mahara K, Ohyama T, Morita Y, Shimada S, Ueno T, Matsumoto A, Otake Y, Wakano T and Izawa T. 2021. 7.3 a 189 \times 600 back-illuminated stacked SPAD direct time-of-flight depth sensor for automotive LiDAR systems//Proceeding of 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference. San Francisco, USA: IEEE: 110-112 [DOI: 10.1109/isscc42613.2021.9365961]
- Kwan D, Kesaria M, Anyebe E A and Huffaker D. 2021. Recent trends in 8-14 μm type-II superlattice infrared detectors. *Infrared Physics and Technology*, 116: #103756 [DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103756]
- Li C, Longinotti L, Corradi F and Delbruck T. 2019. A 132 by 104 10 μm -pixel 250 μw 1kefps dynamic vision sensor with pixel-parallel noise and spatial redundancy suppression. 2019 Symposium on VLSI Circuits.[s.l.]: [s.n.]: C216-C217 [DOI: 10.23919/vlsic.2019.8778050]
- Li D S. 2014. The Design of Pixel Circuits in Time-based AER Asynchronous Vision Sensor. Tianjin: Tianjin University (李东盛. 2014. 基于时间域的AER异步图像传感器像素电路设计. 天津: 天津大学)
- Li J W. 2020. Research on Key Technology of ToF Image Sensor Based on Continuous Wave. Tianjin: Tianjin University (李嘉文. 2020. 基于连续波的ToF图像传感器的关键技术研究. 天津: 天津大学) [DOI: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2020.000900]
- Li L, Gong P, Sheng D, Wang S and Zhai T. 2018. Highly in-plane anisotropic 2D GeAs₂ for polarization-sensitive photodetection. *Advanced Materials*, 30(50): #1804541
- Li X, Gong H M, Shao X M, Li T, Huang S L, Ma Y J, Yang B, Zhu X L, Gu Y and Fang J X. 2022. Recent advances in short wave-

- length infrared InGaAs focal plane arrays. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 41(1): 129-138 (李雪, 龚海梅, 邵秀梅, 李淘, 黄松垒, 马英杰, 杨波, 朱宪亮, 顾溢, 方家熊. 2022. 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展. *红外与毫米波学报*, 41(1): 129-138) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2022.01.009]
- Li Y L, Gao D, Li Z, Wang D, Wang C, Tan Z and Sun H. 2022. Status and development trends of large-area HgCdTe. *Laser and Infrared*, 52(8): 1204-1210 (李燕兰, 高达, 李震, 王丹, 王丛, 谭振, 孙浩. 2022. 大尺寸碲镉汞材料研究现状与趋势. *激光与红外*, 52(8): 1204-1210)
- Lichtsteiner P, Posch C and Delbruck T. 2008. A 128×128 120 dB 15 μ s latency asynchronous temporal contrast vision sensor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 43(2): 566-576 [DOI: 10.1109/JSSC.2007.914337]
- Liu F C, Zheng S J, He X X, Chaturvedi A, He J F, Chow W L, Mion T R, Wang X L, Zhou J D, Fu Q D, Fan H J, Tay B K, Song L, He R H, Kloc C, Ajayan P M and Liu Z. 2016. Photoresponse: highly sensitive detection of polarized light using anisotropic 2D ReS_2 (Adv. Funct. Mater. 8/2016). *Advanced Functional Materials*, 26(8): 1146-1146 [DOI: 10.1002/adfm.201670048]
- Liu W, Niu Y F, Xiao L L and Wang Y B. 2021. Development of infrared focal plane array and spaceborne infrared imaging system. *Infrared*, 42(11): 15-24 (刘炜, 牛誉霏, 肖龙, 王煜博. 2021. 红外焦平面阵列及星载红外成像系统的发展. *红外*, 42(11): 15-24) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.11.003]
- Long M S, Liu E F, Wang P, Gao A Y, Xia H, Luo W, Wang B G, Zeng J W, Fu Y J, Xu K, Zhou W, Lv Y Y, Yao S H, Lu M H, Chen Y F, Ni Z H, You Y M, Zhang X A, Qin S Q, Shi Y, Hu W D, Xing D Y and Miao F. 2016. Broadband photovoltaic detectors based on an atomically thin heterostructure. *Nano Letters*, 16(4): 2254-2259 [DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04538]
- Lu H H. 2016. The Pixel Design of Silicon Image Sensor by Imitation of Retinal Cells. Shenzhen: Shenzhen University (陆河辉. 2016. 仿视网膜细胞的硅图像传感器像素设计. 深圳: 深圳大学)
- Luo Y N, Zhang S, Tang X and Chen M L. 2022. Resonant cavity-enhanced colloidal quantum-dot dual-band infrared photodetectors. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(21): 8218-8225 [DOI: 10.1039/d2tc01122k]
- Lutz H, Breiter R, Eich D, Figgemeier H and Hanna S. 2019. Improved high performance MCT MWIR and LWIR modules//*Proceedings of SPIE 11002, Infrared Technology and Applications XLV*. Baltimore, USA: SPIE: #1100216 [DOI: 10.1117/12.2519811]
- Lutz H, Breiter R, Eich D, Figgemeier H and Hanna S. 2022. Towards high operating temperature and small pixel pitch MCT LWIR modules//*Proceedings of SPIE 12107, Infrared Technology and Applications XLVIII*. Orlando, USA: SPIE: #121070 [DOI: 10.1117/12.2618780]
- Ma J J, Zhang D X, Omar A and Elgendy S M. 2021. A 0.19e- rms read noise 16.7 M pixel stacked quanta image sensor with 1.1 μ m pitch backside illuminated pixels. *IEEE Electron Devices Letters*, 42(6): #3072842 [DOI: 10.1109/LED.2021.3072842]
- Martyniuk P and Rogalski A. 2022. Van der Waals two-color infrared detection. *Light: Science and Applications*, 11(1): #27 [DOI: 10.1038/s41377-022-00721-y]
- Miyauchi K, Mori K, Otaka T, Isozaki T, Yasuda N, Tsai A, Sawai Y, Owada H, Takayanagi I and Nakamura J. 2020. A stacked back side-illuminated voltage domain global shutter CMOS image sensor with a 4.0 μ m multiple gain readout pixel. *Sensors*, 20(2): #486 [DOI: 10.3390/s20020486]
- Mudge J and Virgen M. 2011. Near-infrared simultaneous stokes imaging polarimeter: integration, field acquisitions, and instrument error estimation//*Proceedings of SPIE 8160, Polarization Science and Remote Sensing V*. San Diego, USA: SPIE: #81600 [DOI: 10.1117/12.892645]
- Münzberg M, Breiter R, Cabanski W, Hofmann K, Lutz H, Wendler J, Ziegler J, Rehm R and Walther M. 2007. Dual color IR detection modules, trends and applications//*Proceedings of SPIE 6542, Infrared Technology and Applications XXXIII*. Orlando, USA: SPIE: #654207 [DOI: 10.1117/12.718798]
- Murata M, Kuroda R, Fujihara Y, Otsuka Y, Shibata H, Shibaguchi T, Kamata Y, Miura N, Kuriyama N and Sugawa S. 2020. A high near-infrared sensitivity over 70-dB SNR CMOS image sensor with lateral overflow integration trench capacitor. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 67(4): 1653-1659 [DOI: 10.1109/TED.2020.2975602]
- Nedelcu A, Bonvalot C, Taalat R, Fantini J, Colin T, Muller P, Huet O, Dua L, Laurent T, Blin C, Le Priol A, Coussement J, Bettiati M and Garabédian P. 2018. III-V detector technologies at Sofradir: dealing with image quality. *Infrared Physics and Technology*, 94: 273-279 [DOI: 10.1016/j.infrared.2018.09.027]
- Nguyen J, Soibel A, Ting D Z Y, Hill C J, Lee M C and Gunapala S D. 2010. Low dark current long-wave infrared InAs/GaSb superlattice detectors. *Applied Physics Letters*, 97(5): #051108 [DOI: 10.1063/1.3476342]
- Nie K M, Xu J T and Gao Z Y. 2016. A 128-stage CMOS TDI image sensor with on-chip digital accumulator. *IEEE Sensors Journal*, 16(5): 1319-1324 [DOI: 10.1109/JSEN.2015.2499743]
- Okino T, Yamada S, Sakata Y, Kasuga S, Takemoto M, Nose Y, Koshida H, Tamaru M, Sugiura Y, Saito S, Koyama S, Mori M, Hirose Y, Sawada M, Odagawa A and Tanaka T. 2020. 5.2 a 1 200 \times 900 6 μ m 450 fps geiger-mode vertical avalanche photodiodes CMOS image sensor for a 250 m time-of-flight ranging system using direct-indirect-mixed frame synthesis with configurable-depth-resolution down to 10 cm//*Proceedings of 2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference*. San Francisco, USA: IEEE: 96-98 [DOI: 10.1109/isscc19947.2020.9063045]
- Onaka T, Matsuhara H, Wada T, Fujishiro N, Fujiwara H, Ishigaki M, Ishihara D, Ita Y, Kataza H, Kim W, Matsumoto T,

- Murakami H, Ohyama Y, Oyabu S, Sakon I, Tanabé T, Takagi T, Uemizu K, Ueno M, Usui F, Watarai H, Cohen M, Enya K, Ootsubo T, Pearson C P, Takeyama N, Yamamuro T and Ikeda Y. 2007. The infrared camera (IRC) for AKARI-design and imaging performance. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 59(sp2): S401-S410 [DOI: 10.1093/pasj/59.sp2.S401]
- Ota Y, Morimoto K, Sasago T, Shinohara M, Kuroda Y, Endo W, Maehashi Y, Maekawa S, Tsuchiya H, Abdelhafar A, Hikosaka S, Motoyama M, Tojima K, Uehira K, Iwata J, Inui F, Matsuno Y, Sakurai K and Ichikawa T. 2022. A 0.37 W 143 dB-dynamic-range 1 M pixel backside-illuminated charge-focusing SPAD image sensor with pixel-wise exposure control and adaptive clocked recharging// *Proceedings of 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference*. San Francisco, USA: IEEE: 94-96 [DOI: 10.1109/isscc42614.2022.9731644]
- Park S, Kim B, Cho J, Chun J H, Choi J and Kim S J. 2022. An 80 × 60 flash LiDAR sensor with in-pixel histogramming TDC based on quaternary search and time-gated δ -intensity phase detection for 45 m detectable range and background light cancellation// *Proceedings of 2022 IEEE International Solid-State Circuits Conference*. San Francisco, USA: IEEE: 98-100 [DOI: 10.1109/isscc42614.2022.9731112]
- Payne A, Daniel A, Mehta A, Thompson B, Bamji C S, Snow D, Oshima H, Prather L, Fenton M, Kordus L, O'connor P, McCauley R, Nayak S, Acharya S, Mehta S, Elkhatib T, Meyer T, O'dwyer T, Perry T, Chan V H, Wong V, Mogallapu V, Qian W and Xu Z P. 2014. 7.6 a 512 × 424 CMOS 3D time-of-flight image sensor with multi-frequency photo-demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC// *Proceedings of 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*. San Francisco, USA: IEEE: 134-135 [DOI: 10.1109/isscc.2014.6757370]
- Perera A, Ariyawansa G, Apalkov V, Matsik S, Su X, Chakrabarti S and Bhattacharya P. 2007. Wavelength and polarization selective multi-band tunnelling quantum dot detectors. *Opto-Electronics Review*, 15(4): 223-228 [DOI: 10.2478/s11772-007-0024-6]
- Perez J P, Durlin Q and Christol P. 2019. Ga-free InAs/InAsSb type-II superlattice (T2SL) photodetector for high operating temperature in the midwave infrared spectral domain// *Proceedings of SPIE 11180, International Conference on Space Optics*. Chania, Greece: SPIE: #111806 [DOI: 10.1117/12.2536149]
- Perez J P, Evirgen A, Abautret J, Christol P, Cordat A and Nedelcu A. 2015. MWIR InSb detector with nBn architecture for high operating temperature// *Proceedings of SPIE 9370, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XII*. San Francisco, USA: SPIE: #93700 [DOI: 10.1117/12.2076141]
- Pezzaniti J L and Chenault D B. 2005. A division of aperture MWIR imaging polarimeter// *Proceedings of SPIE 5888, Polarization Science and Remote Sensing II*. San Francisco, USA: SPIE: #58880 [DOI: 10.1117/12.623543]
- Posch C, Matolin D and Wohlgenannt R. 2011. A QVGA 143 dB dynamic range frame-free PWM image sensor with lossless pixel-level video compression and time-domain CDS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 46(1): 259-275 [DOI: 10.1109/jssc.2010.2085952]
- Qi J J, Feng X Y, Chen Y G, Ning T, Liu S G, Sun H and Kang J. 2022. Development of long-wavelength 1 280 × 1 024 HgCdTe detectors with 10 μ m pitch. *Infrared*, 43(2): 1-6 (祁娇娇, 冯晓宇, 陈彦冠, 宁捷, 刘世光, 孙浩, 康健. 2022. 10 μ m 间距长波 1 280 × 1 024 碲镉汞探测器研制进展. *红外*, 43(2): 1-6) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.02.001]
- Rao P, Zhang L, Zhao Y F, Lu F X, Xu J J and Wang F F. 2019. Research on high sensitivity type-II superlattice long wavelength infrared detection system. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 38(3): 338-344 (饶鹏, 张磊, 赵云峰, 陆福星, 许佳佳, 王芳芳. 2019. 高灵敏度 II 类超晶格长波红外探测系统研究. *红外与毫米波学报*, 38(3): 338-344)
- Rehm R, Walther M, Rutz F, Schmitz J, Wörl A, Masur J M, Scheibner R, Wendler J and Ziegler J. 2011. Dual-color InAs/GaSb superlattice focal-plane array technology. *Journal of Electronic Materials*, 40(8): 1738-1743 [DOI: 10.1007/s11664-011-1674-1]
- Reisinger A, Dennis R, Patnaude K, Burrows D, Bundas J, Beech K, Faska R and Sundaram M. 2013. Broadband QWIP FPAs for hyperspectral applications. *Infrared Physics and Technology*, 59: 112-117 [DOI: 10.1016/j.infrared.2012.12.024]
- Sakakibara M, Kawahito S, Handoko D, Nakamura N, Satoh H, Higashi M, Mabuchi K and Sumi H. 2005. A high-sensitivity CMOS image sensor with gain-adaptive column amplifiers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 40(5): 1147-1156 [DOI: 10.1109/JSSC.2005.845969]
- Sakano Y, Sakai S, Tashiro Y, Kato Y, Akiyama K, Honda K, Sato M, Sakakibara M, Taura T, Azami K, Hirano T, Oike Y, Sogo Y, Ezaki T, Narabu T, Hirayama T and Sugawa S. 2017. 224-ke saturation signal global shutter CMOS image sensor with in-pixel pinned storage and lateral overflow integration capacitor// *2017 Symposium on VLSI Circuits*. Kyoto, Japan: IEEE: 250-251 [DOI: 10.23919/VLSIC.2017.8008498]
- Sampath P, Chapinal G, Singh G, Odharia M, Innocent M, Geurts T, Oberoi A, Mauritzson R, Parks C, McCarten J, Tivarus C, Doan H, Chouhan N, Gopalakrishna S, Pates D, Butinar I and Benjaram R. 2021. A 12 Mpixel 1.3' optical format CMOS HDR image sensor achieving single-exposure flicker-free 90 dB dynamic range in GS shutter mode and over 110 dB dynamic range in 2-exposure ERS mode// *Proceedings of the Program International Image Sensor Workshop*. [s.l.]: [s.n.]
- Semkin V, Mylnikov D, Titova E, Zhukov S and Svintsov D. 2022. Gate-controlled polarization-resolving mid-infrared detection at metal-graphene junctions. *Applied Physics Letters*, 120(19):

- #191107 [DOI: 10.1063/5.0088724]
- Seo M W, Sawamoto T, Akahori T, Liu Z, Iida T, Takasawa T, Kosugi T, Watanabe T, Isobe K and Kawahito S. 2012. A low-noise high-dynamic-range 17-b 1.3-megapixel 30-fps CMOS image sensor with column-parallel two-stage folding-integration/cyclic ADC. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 59(12): 3396-3400 [DOI: 10.1109/ted.2012.2215871]
- Shang L T, Wang J, Xing W R, Liu M, Shen C, Zhou P and Zhao J Z. 2021. Advances in type II superlattice infrared detector technology at home and abroad. *Laser and Infrared*, 51(6): 683-694 (尚林涛, 王静, 邢伟荣, 刘铭, 申晨, 周朋, 赵建忠. 2021. II类超晶格红外探测器技术国内外进展. *激光与红外*, 51(6): 683-694) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.001]
- She L F, Jiang J K, Chen W Q, Cui S N, Jiang D W, Wang G W, Xu Y Q, Hao H Y, Wu D H, Ding Y and Niu Z C. 2022. Mid-wave infrared p⁺-B-n InAs/InAsSb type-II superlattice photodetector with an AlAsSb/InAsSb superlattice barrier. *Infrared Physics and Technology*, 121: #104015 [DOI: 10.1016/j.infrared.2021.104015]
- Shi M L and Ling L. 2017. Status and development trends of the HgCdTe large infrared focal array technology, *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 38(6): 151-155 (史漫丽, 凌龙. 2017. 大面阵碲镉汞红外焦平面阵列发展现状及趋势. *兵器装备工程学报*, 38(6): 151-155) [DOI: 10.11809/scbgxb2017.06.033]
- Shoushun C and Bermak A. 2007. Arbitrated time-to-first spike CMOS image sensor with on-chip histogram equalization. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 15(3): 346-357 [DOI: 10.1109/TVLSI.2007.893624]
- Smith E P G, Gallagher A M, Venzor G M, Peterson J M, Reddy M, Lofgreen D D, Patten E A and Radford W A. 2010. Large format HgCdTe focal plane arrays for dual-band long-wavelength infrared detection//*Proceedings of Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices*. Canberra, Australia; IEEE: 15-16 [DOI: 10.1109/commad.2010.5699712]
- Son B, Suh Y, Kim S, Jung H, Kim J S, Shin C, Park K, Lee K, Park J, Woo J, Roh Y, Lee H, Wang Y B, Ovsiannikov I and Ryu H. 2017. 4.1 a 640 × 480 dynamic vision sensor with a 9 μm pixel and 300 Meps address-event representation//*Proceedings of 2017 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. San Francisco, USA; IEEE: 66-67 [DOI: 10.1109/isscc.2017.7870263]
- Starr B, Mears L, Fulk C, Getty J, Beuville E, Boe R, Tracy C, Corrales E, Kilcoyne S, Vampola J, Drab J, Peralta R and Doyle C. 2016. RVS large format arrays for astronomy//*Proceedings of SPIE 9915, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII*. Edinburgh, UK; SPIE: #99152 [DOI: 10.1117/12.2233033]
- Stefanov K D, Dunford A and Holland A D. 2018. Electron multiplying low-voltage CCD with increased gain. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 65(7): 2990-2996 [DOI: 10.1109/TED.2018.2839023]
- Sugawa S, Akahane N, Adachi S, Mori K, Ishiuchi T and Mizobuchi K. 2005. A 100 dB dynamic range CMOS image sensor using a lateral overflow integration capacitor//*Proceedings of 2005 IEEE International Digest of Technical Papers. Solid-State Circuits Conference*. San Francisco, USA; IEEE: 352-603 [DOI: 10.1109/ISSCC.2005.1494014]
- Suh Y, Choi S, Ito M, Kim J, Lee Y, Seo J, Jung H, Yeo D H, Namgung S, Bong J, Yoo S, Shin S H, Kwon D, Kang P, Kim S, Na H, Hwang K, Shin C, Kim J S, Park P K J, Kim J, Ryu H and Park Y. 2020. A 1 280 × 960 dynamic vision sensor with a 4.95-μm pixel pitch and motion artifact minimization//*2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Seville, Spain; IEEE: 1-5 [DOI: 10.1109/ISCAS45731.2020.9180436]
- Tan B S, Zhang C J, Zhou W H, Yang X J, Wang G W, Li Y T, Ding Y Y, Zhang Z, Lei H W, Liu W H, Du Y, Zhang L F, Liu B, Wang L B and Huang L. 2018. The 640 × 512 LWIR type-II superlattice detectors operating at 110 K. *Infrared Physics and Technology*, 89: 168-173 [DOI: 10.1016/j.infrared.2018.01.007]
- Wang X T, Li Y T, Huang L, Jiang X W, Jiang L, Dong H L, Wei Z M, Li J B and Hu W P. 2017. Short-wave near-infrared linear dichroism of two-dimensional germanium selenide. *Journal of the American Chemical Society*, 139(42): 14976-14982 [DOI: 10.1021/jacs.7b06314]
- Wang Y, Gu Y, Cui A L, Li Q, He T, Zhang K, Wang Z, Li Z P, Zhang Z H, Wu P S, Xie R Z, Wang F, Wang P, Shan C X, Li H, Ye Z H, Zhou P and Hu W D. 2022. Fast uncooled mid-wavelength infrared photodetectors with heterostructures of van der waals on epitaxial HgCdTe. *Advanced Materials*, 34(6): #2107772 [DOI: 10.1002/adma.202107772]
- Wang Y L. 2018. Wide Dynamic Pseudo-Color ICMOS Imaging Technology Research. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology (王逸伦. 2018. 宽动态伪彩色 ICMOS 成像技术研究. 南京: 南京理工大学)
- Wu D, Guo J W, Du J, Xia C X, Zeng L H, Tian Y Z, Shi Z F, Tian Y T, Li X J, Tsang Y H and Jie J S. 2019. Highly polarization-sensitive, broadband, self-powered photodetector based on graphene/PdSe₂/germanium heterojunction. *ACS Nano*, 13(9): 9907-9917 [DOI: 10.1021/acsnano.9b03994]
- Xie B M, Zhang K, Li J W, Li L, Song Y, Cui N, Bai Y Q and Huang F. 2022. High-sensitivity visible-blind near-infrared narrowband organic photodetectors realized by controlling trap distribution. *Acta Polymerica Sinica*, 53(4): 414-423 (解博名, 张凯, 李静雯, 李力, 宋煜, 崔楠, 白原青, 黄飞. 2022. 通过控制陷阱分布实现高灵敏度窄带近红外响应有机光探测器. *高分子学报*, 53(4): 414-423) [DOI: 10.11777/j.issn1000-3304.2021.21339]
- Xing Y L, Liu J W, Wang J W and Li Z H. 2020. Study on the performance of SW/MW double-color MCT detector. *Infrared*, 41(8): 9-14 (邢艳蕾, 刘建伟, 王经纬, 李忠贺. 2020. 短/中波双色碲镉汞红外探测器性能分析研究. *红外*, 41(8): 9-14) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.08.002]

- Xu J J, Chen J X, Zhou Y, Xu Q Q, Wang F F, Xu Z C, Bai Z Z, Jin C and Chen H L. 2014. 320×256 long wavelength infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 33(6): 598-601 (许佳佳, 陈建新, 周易, 徐庆庆, 王芳芳, 徐志成, 白治中, 靳川, 陈洪雷. 2014. 320×256 元 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*, 33(6): 598-601) [DOI: 10.3724/SP.J.1010.2014.00598]
- Xu J T, Zhou J W, Gao Z Y, Gao J and Shi Z F. 2017. A Dynamic Vision Sensor with Enhanced Temporal Sensitivity, China, 107071314A (徐江涛, 邹佳伟, 高志远, 高静, 史再峰. 2017. 一种时域灵敏度增强型的动态视觉传感器. 中国, 107071314A)
- Yang M H, Liu S C and Delbruck T. 2015. A dynamic vision sensor with 1% temporal contrast sensitivity and in-pixel asynchronous delta modulator for event encoding. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 50(9): 2149-2160 [DOI: 10.1109/JSSC.2015.2425886]
- Yin J B, Tan Z J, Hong H, Wu J X, Yuan H T, Liu Y J, Chen C, Tan C W, Yao F R, Li T R, Chen Y L, Liu Z F, Liu K H and Peng H L. 2018. Ultrafast and highly sensitive infrared photodetectors based on two-dimensional oxyselenide crystals. *Nature Communications*, 9(1): #3311 [DOI: 10.1038/s41467-018-05874-2]
- Yu C L, Gong H M, Li X, Huang S L, Yang B, Zhu X L, Shao X M, Li T and Gu Y. 2022. $2\ 560 \times 2\ 048$ short-wave infrared InGaAs focal plane detector (Invited). *Infrared and Laser Engineering*, 51(3): #20210941 (于春蕾, 龚海梅, 李雪, 黄松垒, 杨波, 朱宪亮, 邵秀梅, 李淘, 顾溢. 2022. $2\ 560 \times 2\ 048$ 元短波红外 InGaAs 焦平面探测器(特邀). *红外与激光工程*, 51(3): #20210941) [DOI: 10.3788/IRLA20210941]
- Yu L. 2012. A CMOS Vision Sensor Based on Address Event Representation. Tianjin: Tianjin University (于璐. 2012. 基于 AER 方式的 CMOS 视觉传感器研究. 天津: 天津大学)
- Zandian M, Farris M, McLevige W, Edwall D, Arkun E, Holland E, Gunn J E, Smee S, Hall D N B, Hodapp K W, Shimono A, Tamura N, Carmody M, Auyeung J and Beletic J W. 2016. Performance of science grade HgCdTe H4RG-15 image sensors//Proceedings of SPIE 9915, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII. Edinburgh, UK: SPIE: #99150F [DOI: 10.1117/12.2233664]
- Zhang J Y, Lyu J P and Ni Z H. 2021. Highly sensitive infrared detector based on a two-dimensional heterojunction. *Chinese Optics*, 14(1): 87-99 (张金月, 吕俊鹏, 倪振华. 2021. 二维材料异质结高灵敏度红外探测器. *中国光学*, 14(1): 87-99) [DOI: 10.37188/CO.2020-0139]
- Zhang Y, Mo D F, Fan C, Shi X M, Yu J, Gong H M and Li X. 2023. Research on the supporting structure of the cold platform of the large format infrared detector. *Infrared and Laser Engineering*, 52(2): #20220445 (张阳, 莫德锋, 范崔, 石新民, 俞君, 龚海梅, 李雪. 2023. 超大面阵红外探测器冷平台支撑结构研究. *红外与激光工程*, 52(2): #20220445) [DOI: 10.3788/IRLA20220445]
- Zhang Y T. 2018. Research on Technologies of High Sensitivity and Large Dynamic Range Low Light Level Imaging in Space. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences (张元涛. 2018. 空间高灵敏度大动态范围微光成像技术研究. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所))
- Zhao K, Wei Z M and Xia J B. 2022. Polarization-sensitive photodetectors based on main group layered low-dimensional semiconductors. *Chinese Science Bulletin*, 67(16): 1796-1805 (赵凯, 魏钟鸣, 夏建白. 2022. 主族层状低维半导体的偏振光探测器. *科学通报*, 67(16): 1796-1805) [DOI: 10.1360/TB-2022-0126]
- Zhao K, Yang J H, Zhong M Z, Gao Q, Wang Y, Wang X T, Shen W F, Hu C G, Wang K Y, Shen G Z, Li M, Wang J L, Hu W D and Wei Z M. 2021. Direct polarimetric image sensor and wide spectral response based on quasi-1D Sb₂S₃ nanowire. *Advanced Functional Materials*, 31(6): #2006601 [DOI: 10.1002/adfm.202006601]
- Zhou X H, Li N and Lu W. 2019. Progress in quantum well and quantum cascade infrared photodetectors in SITP. *Chinese Physics B*, 28(2): #027801 [DOI: 10.1088/1674-1056/28/2/027801]
- Zhou Y, Chai X L, Tian Y, Xu Z C, Huang M, Xu J J, Huang A B, Bai Z Z, Chen H L, Ding R J, Chen J X and He L. 2019. Studies on InAs/GaAsSb mid-wavelength interband cascade infrared focal plane arrays. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 38(6): 745-750 (周易, 柴旭良, 田源, 徐志成, 黄敏, 许佳佳, 黄爱波, 白治中, 陈红雷, 丁瑞军, 陈建新, 何力. 2019. InAs/GaAsSb 带间级联中波红外焦平面研究. *红外与毫米波学报*, 38(6): 745-750) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2019.06.011]
- Zizza R C. 2015. Jots to Pixels: Image Formation Options for the Quanta Image Sensor. Hanover, USA: Dartmouth College

作者简介

徐江涛,男,教授,主要研究方向为图像传感芯片、集成电路设计。E-mail: xujiangtao@tju.edu.cn

汶德胜,通信作者,男,研究员,主要研究方向为空间光学载荷技术、光电成像技术、快速信号处理技术。E-mail: ven@opt.ac.cn

王欣洋,男,研究员,主要研究方向为 CMOS 图像传感器。

E-mail: xinyang.wang@gpixel.com

王廷栋,男,高级工程师,主要研究方向为图像传感器。

E-mail: 785573212@qq.com

陈忻,男,副研究员,主要研究方向为红外信息获取与处理。

E-mail: chenxin@mail.sitp.ac.cn

宋宗玺,男,研究员,主要研究方向为低噪声电子学。

E-mail: songxi@opt.ac.cn

雷浩,男,高级工程师,主要研究方向为图像处理、位姿成像感知。E-mail: leihao@opt.ac.cn

刘罡,男,副研究员,主要研究方向为相干成像技术。

E-mail: liugang@opt.ac.cn