

用于 VOCs 气体探测的制冷型红外探测器

段 煜，毛剑宏，熊 雄，胡明灯

(浙江珏芯微电子有限公司，浙江 丽水 323000)

摘要：随着红外技术的发展，制冷红外探测器在气体探测领域发挥出重要作用。介绍了国内外关于制冷红外气体探测器的研究情况，并详细阐述了近期浙江珏芯微电子有限公司在挥发性有机物（volatile organic compounds, VOCs）气体探测器方向上的研究进展。通过窄带低温滤光片设计、杂散辐射抑制及探测器组件工艺等方面的关键技术研究，实现了制冷红外气体探测器的制备，在此基础上对探测器进行了系统性的性能评价与分析，展示了实际成像效果。

关键词：制冷红外探测器；气体探测；挥发性有机物

中图分类号：TN215 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2024)10-1178-08

Cooled Infrared Detector for VOCs Gas Detection

DUAN Yu, MAO Jianhong, XIONG Xiong, HU Mingdeng

(Zhejiang Juexin Microelectronics Co. Ltd., Lishui 323000, China)

Abstract: With the development of infrared technology, cooled infrared detectors are playing an increasingly important role in gas detection. This paper introduces research on infrared gas detectors, domestically and abroad, and expounds on the recent research progress of Zhejiang Juexin Microelectronics Co., Ltd. on VOC gas detectors. The detectors were manufactured using a narrow bandpass filter design, stray radiation suppression, and detector assembly process technology. Moreover, a systematic performance evaluation and analysis of the detector were performed, and the actual imaging was displayed.

Key words: cooled infrared detector, gas detection, VOCs

0 引言

近年来挥发性有机物（volatile organic compounds, VOCs）受到越来越多的关注，它不仅是 O₃ 和 PM2.5 的重要前体物，也是潜在的危险爆炸源。鉴于其对社会与环境的危害性，国家生态环境部陆续印发了《重点行业挥发性有机物综合治理方案》和《挥发性有机物无组织排放控制标准》^[1-2]等文件，指导各地加大 VOCs 治理力度。

红外热成像技术是一种非常有效的探测 VOCs 气体的方法，由于其具有探测距离远、探测光谱宽以及探测气体种类多的优势，在发达国家已被广泛应用于石油化工、电力、钢铁制造及环境监管等领域。其主要原理是通过检测气体热辐射产生的红外特征信号，将该信号转换成肉眼可识别的图像^[3]，通过滤光片的作用，实现特定气体的识别。然而由于红外技术的军

事敏感性，红外热成像系统的核心部件——制冷红外探测器面临西方国家技术与器件的双重封锁。

目前国内已有一些单位发表了有关 VOCs 气体探测的报道^[4-6]，但关于基础核心器件制冷红外气体探测器研究的报道暂未见得。本文介绍了国内外制冷红外气体探测器研究情况，并详细阐述了浙江珏芯微电子有限公司（以下简称“珏芯微电子”）在 VOCs 气体探测器方面的研究进展，对其研制过程中的关键技术进行了探讨。在此基础上对探测器应用效果进行展示，并对未来 VOCs 制冷红外气体探测器的发展提出了展望。

1 国内外研究情况

国外红外技术研究起步较早，自 20 世纪 90 年代起就开展了有关气体红外探测的研究工作，其中美国、法国、瑞典和以色列等国家的制冷红外气体探测

收稿日期：2023-01-16；修订日期：2023-02-03。

作者简介：段煜（1995-），男，硕士，工程师，主要从事红外探测器封装技术研究。E-mail：ddying210@163.com。

通信作者：熊雄（1986-），男，高级工程师，主要从事红外探测器封装技术研究。E-mail：xiongxiong0423@163.com。

器研制水平处于世界领先地位。美国 FLIR 采用制冷型锑化铟探测器作为 ThermaCAM GASFindIR 系列气体成像仪的核心器件, 用于探测烷类气体, 通过加装 $3.2\sim3.4\text{ }\mu\text{m}$ 窄带滤光片来提升气体探测灵敏度, 限制杂散背景辐射^[7]。图 1 为 FLIR 开发的安全性光学气体成像仪 (optical gas imaging, OGI) GFx320, 该产品像元间距为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 噪声等效温差 (noise equivalent temperature difference, NETD) $<15\text{ mK}$, 能够实现甲烷、丙烷、丁烷及数百种碳氢化合物及 VOCs 的可视化, 维持危险场所的安全性^[8-9]。



图 1 美国 FLIR 开发的 GFx320 光学气体成像仪^[9]

Fig.1 GFx320 developed by FLIR(USA)^[9]

法国 Sofradir 公司在 2016 年先后推出了两款中波宽波段碲镉汞制冷红外探测器用于工业气体探测, 阵列规模分别为 640×512 和 320×256 。前者像元尺寸为 $15\text{ }\mu\text{m}$, 光谱响应范围在 $1.5\sim5\text{ }\mu\text{m}$ 之间, NETD $\leqslant 18\text{ mK}$; 后者像元尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 光谱响应范围为 $2.7\sim10\text{ }\mu\text{m}$, NETD 为 27 mK , 最大帧频提高到了 320 fps ^[5]。图 2 为法国 Sofradir 开发的 SCORPIO BBMW 探测器, 其宽光谱带可以满足机器视觉高光谱应用和气体检测应用的需求^[10]。



图 2 法国 Sofradir 开发的 SCORPIO BBMW 气体探测器^[10]

Fig.2 SCORPIO BBMW developed by Sofradir(FRA)^[10]

瑞典 IR Nova 公司在 II 类超晶格红外焦平面探测器技术方面处于世界领先地位, 其研制的制冷红外探测器能满足多种 VOCs 气体探测需求。图 3 为 IR Nova 公司所推出的 Freja330 系列探测器, 该探测器针对较小的光谱范围进行了优化, 适用于探测光谱吸收范围为 $3.3\text{ }\mu\text{m}$ 的任何 VOCs 气体, 该产品阵列规模为 320×256 , 像元尺寸为 $30\text{ }\mu\text{m}$, 有效像元率为 99.9%, 质量约 550 g ^[11]。

以色列 Opgal 公司研制的 EyeCGas2.0 光学气体成

像仪, 号称是全世界最灵敏的产品, 该产品可以快速识别 400 多种碳氢化合物和 VOCs 气体逸散性排放^[8]。图 4 为 EyeCGas2.0 光学气体成像仪实物图^[12]。EyeCGas2.0 的 NETD $<10\text{ mK}$, 配备了多光谱滤光片, 通过 $3.2\sim3.4\text{ }\mu\text{m}$ 波段来探测 VOCs 气体, 通过 $3.3\sim3.5\text{ }\mu\text{m}$ 波段来探测质量更重的烷烃类气体, 通过 $4.2\sim4.4\text{ }\mu\text{m}$ 波段来探测 CO_2 。该产品专为石油和天然气行业的恶劣环境而设计, 具有优秀安全性能。



图 3 瑞典 IR Nova 开发的 Freja330 气体探测器^[11]

Fig.3 Freja330 developed by IR Nova(SWE)^[11]



图 4 以色列 Opgal 开发的 EyeCGas2.0 光学气体成像仪^[12]

Fig.4 EyeCGas2.0 developed by Opgal(ISR)^[12]

国内关于气体探测的报道主要集中于红外系统及探测方法, 与制冷红外气体探测器研究相关的报道暂未见到。北京理工大学采用国产制冷中波碲镉汞制冷红外探测器加窄带滤光片的方法, 搭建了石油和天然气红外成像演示系统^[13]。北京富吉瑞公司利用瑞典 IRnova 公司的 320ER-330, 研制出 FG100 型红外气体成像仪, 用于检测吸收谱为 $3.2\sim3.5\text{ }\mu\text{m}$ 的烷类气体^[5]。浙江红相采用法国 Sofradir 公司的制冷红外探测器, 研制出热灵敏度高达 $0.06\text{ }^\circ\text{C}$ 的 HX-8800 型红外气体热像仪^[4]。

综合来看, 近年来各大国际知名厂商陆续推出新款产品来满足 VOCs 气体的探测需求, 红外气体探测器在技术端处于高速发展的阶段。不仅如此, 国外在应用端更加成熟, 尤其是工业、环保等领域对制冷红外气体探测器产品的普及度和接受度较高。由于相关技术起步较晚, 目前国内在制冷红外气体探测领域尚处于追赶阶段, 虽然整体与西方国家还存在一定差距, 但近年来已显露出一些可喜的研究成果。在应用端, 由于国内制冷红外探测器产能不足, 大多数产品

都流入了需求更为紧迫的军用市场，在气体探测等民用领域还有较大市场需要开拓，需要一段时期经历民用领域的检验和认可。

2 制冷型红外气体探测器关键技术研究

VOCs 制冷型红外气体探测器的研制是一项系统性工程，本章以理论设计和工程实践经验为基础，从窄带低温滤光片设计、杂散辐射抑制及探测器组件工艺技术等 3 方面重点介绍了制冷红外气体探测器关键技术。

2.1 窄带低温滤光片设计

滤光片设计是探测器组件总体设计的重要环节，可直接影响到探测灵敏度和成像质量等关键指标，行业内通常选择窄带滤光片进行滤波。相比于其他滤波手段，采用窄带滤光片具有结构简单、易于操作的优势。尽管窄带滤光片减少了气体探测器焦平面接收到的总辐射量，降低了系统信噪比，但却大幅提升了目标气体辐射量占焦平面接收总辐射量的百分比，使系统具有更高的总体灵敏度^[6]。此外，制冷红外探测器的典型工作温度在 80 K 左右，在设计时需要考虑滤光片在常温（300K）和低温（80K）下的光学特性差异。

窄带滤光片的截止波段根据目标气体的光谱特性而定。绝大多数物质都有其独特的特征吸收光谱，

光谱特性由物质自身分子、原子及电子的运动状态决定。图 5 为 CH₄ 和 C₂H₆ 气体的特征吸收光谱图（数据来自 HITRAN 数据库^[14]），从图中可看出 CH₄ 和 C₂H₆ 气体分别在 3018.9 cm⁻¹ 波数和 3070.9 cm⁻¹ 波数有很强的红外特征吸收峰，其所对应波长分别为 3.3 μm 和 3.2 μm。事实上，大多数 VOCs 气体，如烷烃、烯烃和炔烃等在 3.2~3.5 μm 波段间均存在吸收峰。因此滤光片的设计需保证其低温时在 3.2~3.5 μm 波段间具有较高的光学透过率。

已有大量研究表明低温下滤光片光谱的截止波长会发生漂移，漂移量与膜层厚度的变化量正相关，漂移的主要原因是膜层的光学常数和厚度在低温下发生变化^[15]。若低温下膜层的光学厚度减少，光谱普遍向短波方向漂移；对于部分特殊红外薄膜材料来说，温度降低时光学厚度反而增加，光谱朝长波方向漂移。

为验证设计与工程实践的综合效果，以环芯微电子研制的 JQ04 型制冷红外气体探测器为例进行相对响应光谱测试。测试设备采用傅里叶变换红外光谱仪，测试波长范围选择 3.00~3.60 μm，扫描间隔为 0.05 μm。表 1 为 JQ04 型制冷红外气体探测器相对光谱响应测试数据表。图 6 为依据表 1 数据所绘制的相对光谱响应测量曲线。从测试结果来看，透过波段满足设计要求，产品符合探测 VOCs 气体的应用需求。

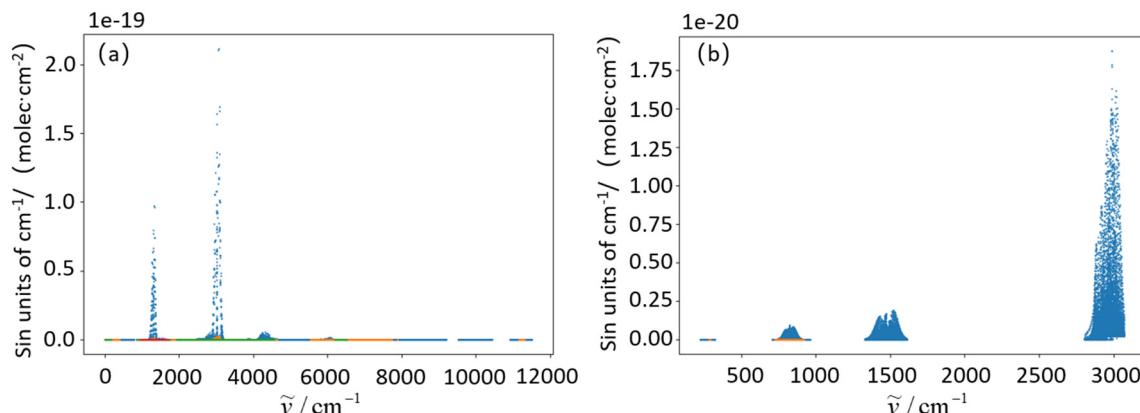


图 5 CH₄(a) 和 C₂H₆(b) 气体的特征吸收光谱^[14]

Fig.5 Characteristic absorptive spectra of CH₄(a) and C₂H₆(b)^[14]

表 1 制冷红外气体探测器相对光谱响应测试数据

Table 1 Test data of relative spectral response of cooled infrared gas detector

Wave-length/μm	Relative spectral response								
3.00	0.000	3.15	0.897	3.30	0.987	3.45	0.975	3.60	0.021
3.05	0.016	3.20	0.988	3.35	0.959	3.50	0.699	/	/
3.10	0.217	3.25	0.981	3.40	1.000	3.55	0.083	/	/

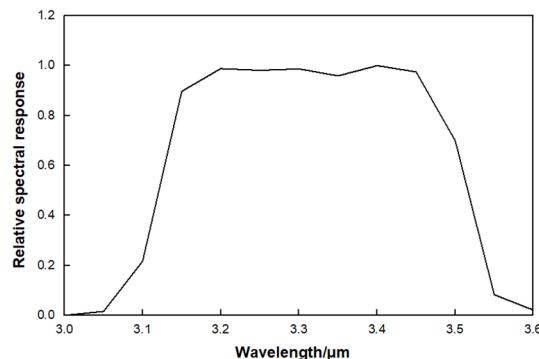


图 6 相对光谱响应测量曲线

Fig.6 Curve of relative spectral response

2.2 杂散辐射抑制

制冷红外探测器工作时, 外界红外辐射信号透过红外窗口、滤光片等滤波系统后抵达红外焦平面, 经过一系列转化后最终将红外信号转化为肉眼可见的图像。抵达红外焦平面的红外信号除了背景和目标气体的辐射以外(有效辐射), 还有一部分不可忽视的杂散辐射。杂散辐射主要是由探测视场外的光源发出且通过散射或衍射达到焦平面的辐射, 除此之外就是探测器组件本身的红外辐射直接或通过散射到达焦平面^[16]。有效辐射和杂散辐射的示意图如图 7 所示^[17]。杂散辐射对探测器的成像效果会产生不利影响, 使信噪比降低, 像面对比度变差。因此有必要通过一系列设计手段对杂散辐射进行抑制, 提升气体探测效果。

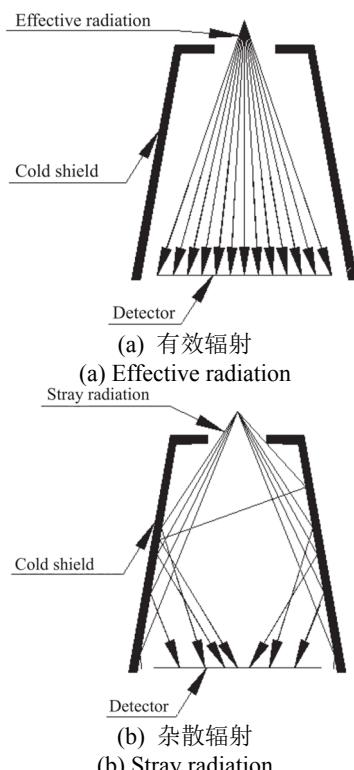


图 7 到达探测器焦平面的红外辐射示意图^[17]

Fig.7 Schematic diagram of infrared radiation reaching the focal plane

R. P. Breault 和 Yan Zhang 等人研究了杂散光辐射能量传输过程^[18-19]。图 8 为辐射能量在两个表面的传输示意图, dA_s 和 dA_c 为两个表面, 中心距为 R_{sc} , 法线与中心连线的夹角分别为 ϕ_s 和 θ_c 。 dA_c 表面接收到的由 dA_s 表面发出的辐射通量 $d\Phi_c$ 满足公式:

$$d\Phi_c = L_s(\phi_0, \theta_0) \cdot \cos(\phi_s) \cdot dA_s \cdot d\Omega_s \cdot 2.44\lambda f \quad (1)$$

式中: $d\Phi_c$ 为传输到接受表面的单位辐射通量; $L_s(\phi_0, \theta_0)$ 为 dA_s 面的辐射亮度; $d\Omega_s$ 为几何构成因子, 是从辐射源到探测器的投影立体角, 只决定于系统几何结构^[20]。

经换算后, 式(1)可转化为:

$$d\Phi_c = BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_0, \theta_0) \cdot d\Phi_s(\phi_i, \theta_i) \cdot GCF \cdot \pi \quad (2)$$

式中: $d\Phi_c$ 为接受表面的单位辐射通量; $BRDF(\phi_i, \theta_i, \phi_0, \theta_0)$ 是双向反射分布函数, 主要用于描述物体表面漫反射特性, 与入射能量无关; $d\Phi_s(\phi_i, \theta_i)$ 为源面出射的辐射通量; GCF 为形状系数, 表示辐射源和目标对象的几何关系, 即目标物体所接受的辐射与辐射源面积所发出的辐射的比值, 与被辐射物体的面积成反比, 与孔径和中心遮拦的结构有关。

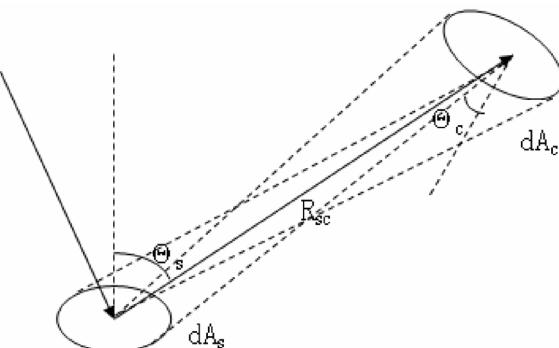


图 8 辐射能量在两个表面的传输示意图

Fig.8 Schematic diagram of radiant energy transmission between two surfaces

由式(2)可知探测器焦平面接收到的辐射通量与表面 $BRDF$ 、源面辐射通量 $d\Phi_s(\phi_i, \theta_i)$ 和几何构成因子 GCF 等 3 个因子正相关。表面 $BRDF$ 由材料性质决定, 源面辐射通量 $d\Phi_s(\phi_i, \theta_i)$ 由外部探测环境决定, 几何构成因子 GCF 由光学系统结构决定。因此抑制杂散辐射可从以下 3 个方面入手^[20]: 一是通过镀金处理等措施降低一级杂散光源的表面发射率, 从而降低表面的辐射能量; 二是对被杂散光源辐射的表面进行特殊物化处理(黑化处理), 提高材料表面的吸收率并降低发射率; 三是通过对冷屏进行挡光环、遮光罩等结构设计, 实现对杂散辐射的遮挡作用。

此外, 为保证探测器成像效果, 其 F 数设计也是研制过程的重要环节。由于窄带滤光片的选择作用,

焦平面接收到的总辐射量大幅降低,为确保探测器具有足够的灵敏度,冷屏的相对孔径应尽可能大,且F数尽可能小。根据产品实际应用情况,一般常用的F数有F1.2和F1.5。

2.3 探测器组件工艺技术

由于窄禁带半导体材料碲镉汞(HgCdTe, MCT)具有量子效率高、响应波长随组分变化连续可调、不同组分晶格常数变化不大等优点,被广泛应用于第三代红外焦平面器件。珏芯微电子以MCT作为红外敏感材料,开发了全流程的VOCs制冷红外气体探测器组件工艺技术。

根据整体技术路线,红外气体探测器工艺技术可分为材料、器件、杜瓦封装和制冷机四大模块,图9为红外气体探测器整体工艺流程图。探测器组件工艺技术开发是一项复杂的系统性工程,涉及300多项串行工艺,关键技术包括材料制备与外延生长技术、芯片器件工艺技术、金属杜瓦低温封装技术和斯特林制冷机技术。

材料制备与外延生长方面,首先采用垂直布里奇曼(vertical Bridgman, VB)法制备碲锌镉(CdZnTe, CZT)单晶棒,经材料加工、测试等工序后,获得符合外延生长要求的CZT晶片。然后利用改良的液相外延技术(liquid phase epitaxy, LPE)实现低缺陷密度MCT外延材料制备。

芯片器件工艺方面采用基于n-on-p平面结器件的工艺,在高质量MCT薄膜材料上经过表面处理、表面钝化、光刻、离子注入、刻蚀等一系列工艺后制成光敏元阵列。随后通过铟柱倒装焊(flip chip)方式将元阵列与读出电路互连,形成探测器芯片。

金属杜瓦低温封装方面主要包含焊接、键合和真空处理等工艺:利用焊接的方式制备金属杜瓦,通过引线键合实现芯片信号的传递,配合超高真空处理等手段实现芯片的封装。

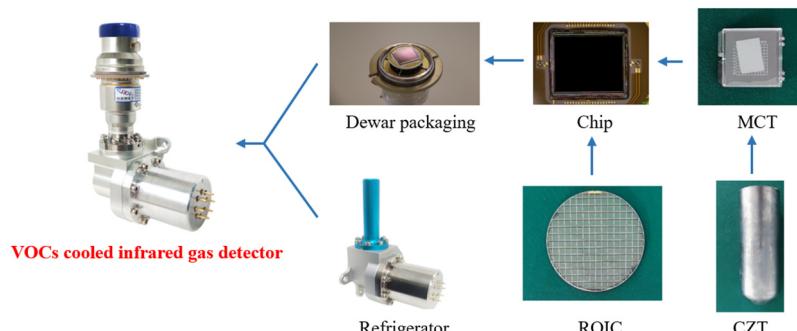


图9 制冷红外气体探测器组件工艺流程

Fig.9 Process flow diagram of cooled infrared gas detector assembly

VOCs制冷红外气体探测器的制冷机采用整体式斯特林制冷机,主要结构包括直流无刷电机、传动机构、压缩机和膨胀机等。制冷机采用防爆设计,以12V低压驱动。

3 性能评价与分析

珏芯微电子已自主研制出多种规格的VOCs制冷红外气体探测器组件,可在不改变封装结构的前提下兼容 320×256 和 640×512 规格的红外焦平面,该系列产品的优点在于定制化和轻量化:F数和响应波段均可根据实际应用而定制,探测器组件总质量 $\leq 350\text{ g}$ 。整体来看,其在无人机载和手持式气体热像仪方面具有一定优势。表2为JQ04型探测器主要性能指标与国际知名厂商产品的对照情况^[8,11-12]。

为评价实际性能,本文以JQ04型红外气体探测器为例,在专用测试平台上,通过输出接口,利用相关软件实现了对其性能和相关参数的测试。其关键技术参数达到:①有效像元率:99.968%;②NETD:6.28mK@F1.2;③响应率不均匀性:4.06%;④制冷时间:277s@20°C;⑤稳定功耗:4.0W@20°C。

为评估红外气体探测器的环境适应性,本文从热学、热力学、力学等方面进行系统性环境试验,试验内容包括:低温工作、高温工作、低温贮存、高温贮存、温度冲击试验、振动试验和冲击试验,表3为红外气体探测器环境适应性试验参数。随机选择6支JQ04型探测器作为试验样品,环境试验完成后,对盲元率、NETD、响应率非均匀性等核心参数进行复测,性能均未发生明显退化。

除常规环境适应性外,探测器组件的长期可靠性也是其性能评价的重要环节。本文参考熊雄^[21]等人的试验方法,以6支气体红外探测器作为一组,开展开关机试验和加速寿命试验。开关机试验的目的是评估探测器芯片在常温-低温-常温的不间断温度循环中对

表 2 各厂商制冷红外气体探测器对照情况

Table 2 Comparison of different cooled infrared gas detectors

Specification	FLIR GF×320(OGI)	Opgal EyeCGas 2.0(OGI)	IRnova Freja330(Detector)	Juexin JQ04(Detector)
Detector type	InSb	InSb	T2SL	MCT
IR resolution	320×240	320×240	320×256	320×256
Detector pitch/ μm	30	/	30	30
NETD/mK	<10	<10	<10	<10
Spectral range/ μm	3.2 to 3.4	3 to 4.4	3.2 to 3.4	3.2 to 3.4
F-number	1.5	1.1	2	1.2
Voltage/V	12	12	12	12
Size/mm	305×169×161	230×130×110	142×71×57	118×72.3×51
Weight	/	2.6 kg	550 g	<350 g

表 3 红外气体探测器环境适应性试验参数

Table 3 Environmental adaptability test parameters of infrared gas detectors

Number	Environmental adaptability	Test conditions
1	Operating temperature	-40°C ~ +70°C
2	Storage temperature	-55°C ~ +70°C
3	Thermal shocks	a) Max temperature: +70°C, Min temperature: -55°C; b) Holding time: 1 h; c) Conversion time: ≤5 min; d) Cycles: 5 times
4	Vibrations	10~80 Hz, 0.02 g ² /Hz 80~350 Hz, 0.04 g ² /Hz 350~500 Hz, 0.04 g ² /Hz~0.02 g ² /Hz 15 min per axis
5	Mechanical shocks	1/2 sine 40 g 18 ms, 3 shocks per axis per direction 1/2 sine 50 g 11 ms, 3 shocks per axis per direction

热应力的耐受能力和制冷机在启动-断电-启动循环过程的工作稳定性。加速寿命试验包括两个部分，分别为杜瓦组件真空加速寿命试验和制冷机加速寿命试验，目的是全面评估探测器组件的寿命情况。现有试验结果为：探测器组件经 2000 次开关机试验后，芯片和制冷机性能均未发生显著衰退；杜瓦组件经累计 4000 h@80°C 加速寿命试验后，样品热负载变化率均在 10% 以内，外推出产品真空贮存寿命超过 29 年（20°C）^[22]；制冷机经开环全速运行（4000 转/min）1300 h 后仍正常运转，推断制冷机常温下闭环运行 MTTF>10000 h。

4 制冷红外气体探测器的应用

随着国产化红外器件的发展和红外系统集成技术的突破，VOCs 制冷红外气体探测器逐渐显露出在

石油天然气、石油化工、钢铁制造等典型工业领域和污染性气体监管等环保领域的应用优势。

在石油天然气领域，VOCs 气体泄漏可能发生在勘探、开采及运输的各个环节，可帮助使用人员及时、直观地发现气体泄漏情况并减少排放。在化工领域，红外气体探测器可使作业人员在数百米外定位泄漏点，为安全生产保驾护航。在能源生产领域，进行化石燃料发电，化工、生物燃料生产过程中，会产生大量甲烷副产物。借助 VOCs 制冷红外气体探测器准确识别碳氢化合物的特性，可有效降低相关气体引起的风险。

为直观体现红外气体探测器实际应用效果，图 10 给出了 JQ04 型探测器的实拍成像图。图中椭圆区域内的气体清晰可见，“可视化”效果良好，且能够明显分辨气体轮廓及其扩散趋势。后期结合红外图像系

统算法处理可进一步优化画面效果。



图 10 探测器成像效果

Fig.10 Imaging effect of detector

5 结论

经过长期以来的工业化发展，我国在安全生产、环境保护等方面的意识逐渐增强。伴随着红外技术和市场的发展，制冷红外探测器在民用气体探测方向上得到了广泛应用，为重工业、环保领域带来了巨大的便利。介绍了国内外红外气体探测器的研究情况并从探测器的关键技术、性能评价与分析、应用等方面阐述了环芯微电子在红外气体探测器方向上的研制现状。获得了以下结论：

①经窄带低温滤光片设计，JQ04型制冷红外气体探测器可将到达红外焦平面的辐射波段控制在 $3.2\sim3.5\mu\text{m}$ 之间，从而实现对 VOCs 气体的准确探测。

②冷屏的结构设计是抑制杂散辐射的重要环节，为达到理想效果，需综合考虑提高冷屏表面吸收率、降低发射率，遮挡杂散辐射等因素。

③经测试，JQ04型制冷红外气体探测器的性能达到：①有效像元率：99.968%；②NETD：6.28 mK@F1.2；③响应率不均匀性：4.06%；④制冷时间：277 s@20°C；⑤稳定功耗：4.0 W@20°C。产品通过了高低温试验、振动冲击试验等环境适应性试验和开关机试验、加速寿命试验等长期可靠性试验，表现出令人满意的结果。

④红外气体探测器对气体的“可视化”效果良好，能够明显分辨气体轮廓及其扩散趋势。

6 展望

尽管制冷红外气体探测器具有响应速度快、灵敏度高、探测距离远等优势，但成本高、价格昂贵也是该产品现阶段不可避免的问题。重点发展 SWaP³ 概念 (size, weight, power, performance and price) 的红外探测器，综合权衡产品的性能、尺寸、重量、功耗、价格，是本行业当前的重要发展方向。此外，随着信息

化社会人工智能物联网的普及，红外探测器正在由单一的传感器向多维信息融合成像、片上智能化的红外光电探测器发展。新概念的光电探测器技术将极大地颠覆目前的传统光电成像探测器技术领域，未来将在夜视侦察、精准制导等军用领域和污染防控、能源勘察、交通运输、物联网、移动装备、自动驾驶、智能制造等工业、民用领域具有广阔的应用前景^[23]。

参考文献：

- [1] 生态环境部. 生态环境部关于印发《重点行业挥发性有机物综合整治方案》的通知[EB/OL]. [2019-6-26][2023-1-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5442284.htm. Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China. Comprehensive Management Plan for Volatile Organic Compounds in Key Industries[EB/OL]. [2019-6-26] [2023-1-15]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5442284.htm.
- [2] 生态环境部. 挥发性有机物无组织排放控制标准: GB37822-2019[S]. [2019-07-27]. 上海: 华东理工大学. Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China. The discharge standard and measurement methods of pollutants from paint manufacturing: GB37822-2019[S]. [2019-07-27]. Shanghai: East China University Of Science And Technology.
- [3] 刘秀, 王岭雪, 金伟其, 等. 危险气体泄露的光学遥测技术及其进展[J]. 红外技术, 2009, 31(10): 563-567.
LIU Xiu, WANG Lingxue, JIN Weiqi, et al. The development of optical remote measurement for hazardous gas leakage[J]. Infrared Technology, 2009, 31(10): 563-567.
- [4] 俞新发, 闫荣鑫, 钟亮, 等. 航天器红外成像检漏方法研究[J]. 航天器环境工程, 2012, 29(2): 220-226.
YU Xinfu, YAN Rongxin, ZHONG Liang, et al. Research on infrared imaging leak detection method of spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2012, 29(2): 220-226.
- [5] 张旭, 金伟其, 李力, 等. 天然气泄露被动式红外成像检测技术及系统性能评价研究进展[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(S2): 53-65.
ZHANG Xu, JIN Weiqi, LI Li, et al. Research progress on passive infrared imaging detection technology and system performance evaluation of natural gas leakage[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(S2): 53-65.
- [6] 熊仕富. 红外热成像甲烷气体探测与识别系统关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
XIONG Shifu. Studies on Key Technology of Infrared Thermal Imaging Detection and Identification System for Methane Gas[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
- [7] Furry D, Richards A, Lucier R, et al. Detection of volatile organic compounds (VOC's) with a spectrally filtered cooled mid-wave infrared

- camera[C]//*Infra Mation 2005 Proceedings*, 2005: ITC 108A 2005-06-01.
- [8] Teledyne Flir. FLIR GFx320-本质安全型防爆红外热像仪[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.flir.cn/discover/instruments/gas-detection/flir-gfx320/>.
- Teledyne Flir. FLIR GFx320- Essentially Safe (ES) Infrared Thermal Camera [EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.flir.cn/discover/instruments/gas-detection/flir-gfx320/>.
- [9] Teledyne Flir. FLIR GFx320[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.flir.cn/support/products/gfx320/>.
- [10] Lynred. SCORPIO BB MW[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.lynred.com/products/scorpio-bb-mw/>.
- [11] IRnova. T2SL Freja 330[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.irnova.se/products/freja-330/>.
- [12] Opgal. EYECGAS Multi Methane, Voc & CO₂[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.opgal.com/products/eyecgas/>.
- [13] 唐璟, 罗秀丽, 刘绍华, 等. 石油和天然气红外成像检漏[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 62-66.
TANG Jing, LUO Xiuli, LIU Shaohua, et al. Infrared imaging detection of oil and natural gas leakage[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1): 62-66.
- [14] HITRAN. Absorption cross section search[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.hitran.org/data-index/>.
- [15] 田亚, 张磊, 林国画, 等. 红外带通滤光片 77 K 光谱漂移特性实验研究[J]. 红外, 2020, 41(5):19-23.
TIAN Ya, ZHANG Lei, LIN Guohua, et al. Experiment research on spectrum drift characteristic at 77 K of infrared band-pass filters[J]. *Infrared*, 2020, 41(5): 19-23.
- [16] 付志凯, 魏威, 张磊, 等. 不同冷屏黑化工艺对红外探测器性能的影响[J]. 红外, 2019, 40(11): 17-22.
- FU Zhikai, WEI Wei, ZHANG Lei, et al. Influences of different blackening process of cold shield on the performance of infrared detectors[J]. *Infrared*, 2019, 40(11): 17-22.
- [17] 尹爽, 徐世春, 高玲, 等. 冷屏结构与冷屏效率[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 20200223.
YIN Shuang, XU Shichun, GAO Ling, et al. Structure and efficiency of cold shield[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200223.
- [18] Robert P B. Problems and techniques in stray radiation suppression[J]. *SPIE*, 1977, 107: 2-23.
- [19] ZHANG Yan, LIU Dafu, HE Xiangrong, et al. Stray light in infrared detector[C] *Pro. of SPIE*, 2009, 7383: 331-339.
- [20] 汪洋. 红外探测器组件杂散光分析及抑制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
WANG Yang. Study on suppression and analysis of stray light in infrared detector assembly[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2016.
- [21] 熊雄, 段煜, 胡明灯, 等. 640×512 小型化红外探测器杜瓦组件可靠性研究[J]. 红外技术, 2022, 44(1): 89-95.
XIONG Xiong, DUAN Yu, HU Mingdeng, et al. Reliability research for 640×512 miniaturized IR detector dewar assembly[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(1):89-95.
- [22] Philippe C. Sofradir MCT technology for space applications[C]//*Pro .of SPIE*, 2009, 7330: 1-12.
- [23] 叶振华, 李辉豪, 王进东, 等. 红外光电探测器的前沿热点与变革[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(1): 15-39.
YE Zhenhua, LI Huihao, WANG Jindong, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, 41(1): 15-39