

文章编号: 1672-8785(2025)09-0008-06

一种具有大电荷处理能力的高工作温度 碲镉汞长波红外探测器

邢艳蕾 宋淑芳

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 随着红外探测器应用领域的逐渐扩展, 对器件的重量、体积、热耗、场景应用范围等方面提出了更高的要求。介绍了一种具有大电荷处理能力的高工作温度碲镉汞长波红外探测器。基于电容积分复用功能, 在 $15\ \mu\text{m}$ 像元尺寸下, 其电荷处理能力达到 $27.2\ \text{Me}^-$ 。同时分析了不同工作温度下的器件性能。结果表明, 在 77 K 下器件具有极高性能, 有效像元率为 99.5%, 后截止波长为 $8.6\ \mu\text{m}$, 噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 22 mK, 峰值量子效率为 65%。随着工作温度提高到 110 K, 有效像元率为 98.5%, 后截止波长为 $8.1\ \mu\text{m}$, NETD 为 28 mK, 峰值量子效率为 40%, 实现了 p-on-n 型碲镉汞长波红外探测器的一个较好的制备水平。该研究对未来高工作温度器件的制备具有一定的指导意义。

关键词: 高工作温度; 大电荷处理能力; 碲镉汞; 量子效率

中图分类号: TN36 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.09.002

A High-Operating Temperature HgCdTe Long-Wave Infrared Detector with Large Charge Handling Capability

XING Yan-lei, SONG Shu-fang

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: As the application of infrared detectors expands, higher requirements are placed on device weight, volume, heat dissipation, and application scenarios. This paper describes a high-operating temperature HgCdTe long-wave infrared detector with large charge handling capacity. Based on capacitance integration multiplexing, the device achieves a charge handling capacity of $27.2\ \text{Me}^-$ at a $15\ \mu\text{m}$ pixel size. The device performance at different operating temperatures is also analyzed. Results show that at 77 K, the device exhibits exceptional performance, with an effective pixel rate of 99.5%, a rear cutoff wavelength of $8.6\ \mu\text{m}$, a noise equivalent temperature difference (NETD) of 22 mK, and a peak quantum efficiency of 65%. As the operating temperature increases to 110 K, the effective pixel rate reaches 98.5%, with a rear cutoff wavelength of $8.1\ \mu\text{m}$, a NETD of 28 mK, and a peak quantum efficiency of 40%, achieving a state-of-the-art p-on-n type HgCdTe long-wave infrared detector. This research provides guidance for the fabrication of future high operat-

收稿日期: 2024-12-08

作者简介: 邢艳蕾(1992-), 女, 河北衡水人, 硕士, 主要研究方向为红外探测器测试与评价。

E-mail: 18810759842@163.com

ing temperature devices.

Key words: high operating temperature; large charge handling capacity; HgCdTe; quantum efficiency

0 引言

传统的红外探测器通常需要在低温下工作, 比如液氮温度(77 K)左右。而高工作温度的碲镉汞探测器可以在更高的温度下工作, 减少了对复杂制冷装置的依赖。这样可以减小系统的体积、重量和功耗, 提高探测器的适用性和便携性。在较高的工作温度下, 探测器受温度变化的影响相对较小, 系统的热稳定性得到了增强。这可以减少因温度波动引起的探测器性能下降的情况, 提高探测器在复杂环境中的可靠性, 从而更好地适应实际应用场景中的温度变化。

大电荷处理能力意味着探测器能够有效地收集和处理更多的光生载流子。当红外辐射照射到碲镉汞探测器上时, 会产生光生载流子。探测器的电荷处理能力强, 则可更好地收集这些载流子, 提高探测器的灵敏度, 从而探测到更微弱的红外信号。在一些应用场景中, 比如近距离观测高温目标或者在强光环境下进行探测时, 探测器可能会接收到较强的红外信号。大电荷处理能力可以防止探测器在接收强光信号时出现饱和现象, 保证探测器能够正常工作并且准确地记录信号强度, 避免信号失真。本文介绍的基于 p-on-n 技术路线的碲镉汞长波红外探测器可以兼具高工作温度与大动态范围。下面从电路设计以及不同工作温度下器件的响应信号、有效像元率、NETD 等方面进行分析。

1 大电荷处理能力读出电路设计

电路的积分电容位于像元内, 因此电容的大小受限于像元尺寸。随着探测器阵列规模的不断扩大, 像元面积却不断减小, 这是未来红外探测器的主流趋势。因此, 在有限的像元尺寸上进一步拓展电荷处理能力、提高器件的信噪比是一个迫切需要研究的方向。

用于大动态范围的常见设计方案是采用多次曝光、数字像元、共享积分电容、高灵敏度和非线性响应等方法。针对模拟电路最常见的设计方案是共享积分电容^[1], 可以分为空域共享和时域共享。其中, 空域共享方案是将 $M \times N$ 个像元合并成 $(M/2) \times (N/2)$ 个像元, 降低了探测器的分辨率; 而时域共享方案则不会出现该问题, 但会相应地导致帧频降低。对于长波红外器件, 积分时间在帧周期中的占比极小, 因此基本不会对帧频带来很大的影响。

本文中介绍的探测器电路在设计时采用了积分电容复用方案。积分复用可以在隔行模式下通过积分电容合并来实现。此时像元电容变为原来的两倍, 电荷处理能力翻倍。复用方式如下: 相邻行两个像元的电容合并, 通过隔行功能将读出电路分为两个子帧(第一个子帧读取面阵的全部奇行数据, 第二个子帧读取面阵的全部偶行数据); 两个子帧数据合并成一帧完整图像并被输出。

如图 1 所示, 在隔行模式下将电容合并控制字置为有效。电容合并控制开关闭合, 实现了两个像元之间的电容合并。此模式下, 两个像元中仅有一个像元的 GPOL、RS 打开, 相当于在一个像元中并联了另一个像元的积分电容。GPOL₋ 为 GPOL 的反向信号。对于不进行积分的行, GPOL 关断, GPOL₋ 打开。将不进行积分的行所对应的探测器电荷泄放到地, 以防其对正在积分的行产生干扰。

基于此设计的电路与原来同类型电路相比, 电荷处理能力得到了很大提高, 在整机应用过程中可以很好地适应从极弱目标到极强目标的变化过程。

2 高工作温度下的探测器性能

2.1 响应信号变化

探测器信号是影响器件信噪比的一个重要

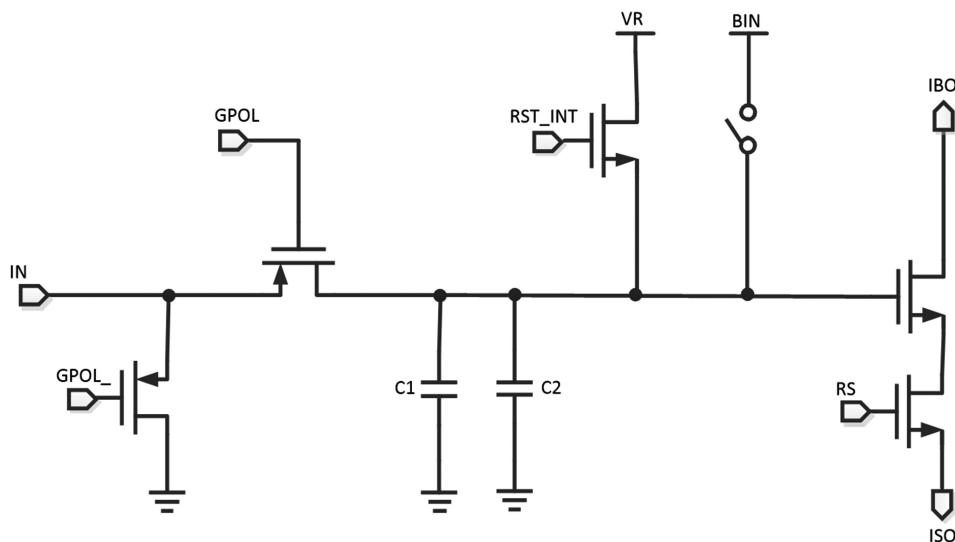


图 1 隔行模式示意图

表 1 探测器后截止波长随工作温度的变化

工作温度/K	Cd 占比	后截止波长/ μm
77	0.211	11.04
90		10.65
100		10.37
110		10.10

表 2 探测器信号随工作温度的变化

工作温度/K	Cd 占比	探测器信号(相对值)
77	0.211	1
90		0.89
100		0.81
110		0.73

因素。根据普朗克公式，在固定波长下，理论辐射产生的光子数 N_1 为

$$N_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \cdot \text{FOV} \cdot A_D \cdot t \quad (1)$$

假设量子效率为 η 且不随温度变化，则探测器产生的信号为

$$U = N_1 \cdot \eta \cdot q / C \quad (2)$$

在不同的工作温度下，探测器的响应、光谱等都会发生一定的变化。由于碲镉汞是一种窄禁带半导体材料，随着工作温度的升高，其本征载流子浓度增加，探测器的截止波长变短。禁带宽度随 x 的变化关系为

$$E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T_w + 0.35x^4 \quad (3)$$

式中， x 为 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 中 Cd 的比例； T_w 为材料的工作温度。可以看出，禁带宽度与温度以及 Cd 的占比有关。

探测器的后截止波长与禁带宽度成反比：

$$\lambda_c = \frac{1.24}{E_g} \quad (4)$$

由式(4)可知，对于某一固定温度下的器件，随着温度的升高，禁带宽度会变大，该温度下的后截止波长会相应地变短。

假设 Cd 的组分为 0.211，碲镉汞探测器在不同工作温度下的后截止波长变化如表 1 所示。结合式(1)~式(4)可知，探测器产生的光子数与工作温度及响应波段有关。假设 Cd 的组分为 0.211，在相同的积分时间下，理论上

产生的相对信号与实际信号的关系如表 2 所示。可以看出, 随着探测器工作温度的升高, 理论上信号值在降低^[2], 因此探测器的信噪比下降。

2.2 量子效率变化

量子效率是指输出相对于输入的转换能力。量子效率越高, 代表该器件的转换能力越强。红外器件吸收外界的光信号, 然后将其转换成电信号并进行输出, 转换的效率就是量子效率。由上述内容可知, 工作温度变化导致器件光电转换后的信号发生改变; 进一步地, 必将引起量子效率变化。

像元在峰值处的平均量子效率可表示为^[3-6]

$$\eta_{\lambda_p} = \frac{\overline{R_{\lambda_p}^*} \cdot h \cdot c}{\lambda_p \cdot q} \quad (5)$$

在归一化的光谱响应曲线中, $\overline{R_{\lambda_p}^*}$ 为 100%, $\overline{R_i}$ 为归一化光谱各个波长处的相对响应率。

由表 2 可知, 探测器的信号随着工作温度的升高而减小; 进一步地, 其响应率也在降低。结合式(5)可知, 对于不同工作温度、同一波长下的器件, 随着工作温度的升高, 量子

效率也在逐步降低。

3 试验及分析

采用自研的一款 p-on-n 型 640×512 碲镉汞长波红外探测器进行了试验。结果表明, 在 77 K 下, 该探测器的后截止波长为 $8.6 \mu\text{m}$, 正常工作模式下的 NETD 值为 22 mK、有效像元率为 99.5%、峰值量子效率为 65%; 在高温 110 K 下, 后截止波长为 $8.1 \mu\text{m}$, NETD 值为 28 mK, 有效像元率为 98.5%, 峰值量子效率为 40%。

3.1 信号及有效像元率的变化

在 77~110 K 区间内的不同工作温度下, 640×512 碲镉汞长波红外探测器的有效像元率及实际信号如图 2 所示。

在某一固定温度下, 探测器输出电平信号 V_{out} 包含了多种信息:

$$V_{out} = V_{bg} + V_{dark} + V_{light} \quad (6)$$

式中, V_{bg} 为电路的本底输出; V_{dark} 为暗电流累积的电压信号; V_{light} 为光电流累积的电压信号。

在同一工作温度下, 电路的本底信号和暗电流不随外界辐射的变化而变化, 因此测试过程中采用两个不同的黑体辐射源进行测试。利

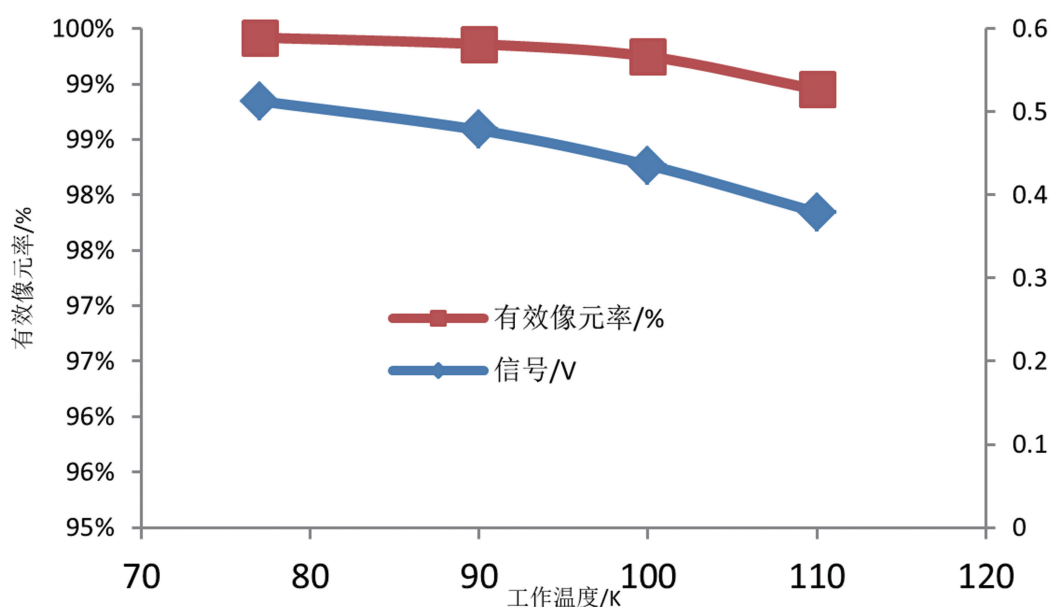


图 2 探测器的有效像元率及实际信号随温度的变化

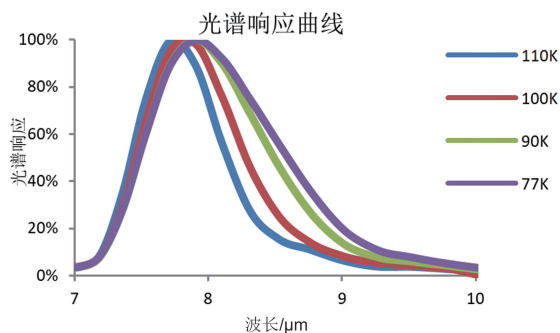


图 3 探测器的光谱响应随工作温度的变化曲线

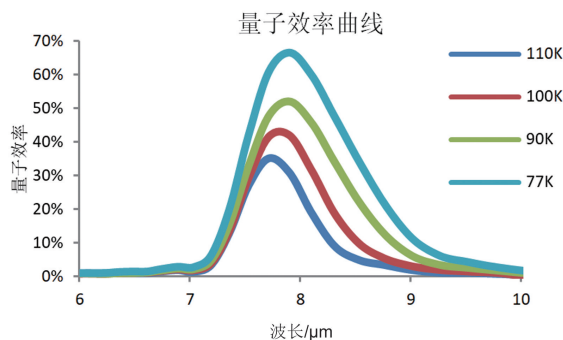


图 4 探测器的量子效率随工作温度的变化曲线

表 3 像元尺寸为 $15\ \mu\text{m}$ 时的器件电路性能对比

性能参数	器件电路	
	本文器件(5 V)	传统器件(5 V)
电荷处理能力	13.6 Me ⁻ (正常模式); 27.2 Me ⁻ (隔行模式)	9.82 Me ⁻ (增益为 1); 3.27 Me ⁻ (增益为 0)
摆幅	3.2 V	2.8 V
相同信号下的积分时间	4.1 ms (正常模式); 8.3 ms (隔行模式)	3 ms (增益为 1); 1 ms (增益为 0)
最大帧频	80 Hz (正常模式); 60 Hz (隔行模式)	90 Hz (增益为 1); 110 Hz (增益为 0)
动态范围	80 dB	80 dB

用两者的差值信号将电路的本底和暗电流信号排除, 最大程度上保证所获得的信号是光电流信号。从图 2 中可以看出, 器件的光电信号随着工作温度的升高而降低。这主要是由于波长变短, 进入探测器表面的光子数变少。

盲元增多的原因如下: 随着工作温度的升高, 探测器材料内部的缺陷、杂质等受温度影响而被激活, 导致载流子的产生和复合过程发生变化, 使得部分像元的响应特性改变, 进而形成盲元。与低温时相比, 高温下热盲元占比增加。这是由于低温下探测器材料的载流子迁移率较低, 某些像元由于材料缺陷无法产生或传输载流子, 而当温度升高时, 探测器材料的热激发增加, 使得部分像元出现过响应的状态, 进而形成盲元; 温度升高还会导致器件的暗电流增加, 干扰正常像元的响应, 进而产生更多盲元; 温度升高引起的热噪声增加, 进一步造成盲元的增加。

3.2 波长与量子效率的变化

探测器波长响应范围是目标识别的一个重

要参数, 不同的工作波段探测的目标范围不同。随着工作温度的升高, 测得的探测器的光谱响应和量子效率的变化曲线如图 3 和图 4 所示。

随着工作温度的升高, 探测器光谱响应曲线中的后截止波长与峰值波长都在变短, 77 K 下的后截止波长从 $8.6\ \mu\text{m}$ 变成 $8.1\ \mu\text{m}$ 。究其原因, 主要是探测器的禁带宽度随着工作温度的升高而变大。在相同的背景辐照条件下, 辐射进入探测器进行光电转换的光子数变少, 进一步引起信号下降。在同一波长下, 探测器的响应率变低, 从而进一步导致量子效率下降。

当像元尺寸均为 $15\ \mu\text{m}$ 时, 本文器件与传统器件的电路性能对比情况如表 3 所示。本文器件分别在 77 K 和 110 K 下进行了成像。从图 5 中可以看出, 虽然 110 K 下由于 NETD 变差(信噪比变差), 成像清晰度有一定程度的下降, 但是仍可以识别出被测物体的细节, 具备可应用的状态。



图 5 本文器件的成像图: (a) 77 K; (b) 110 K

4 结束语

本文介绍了一款具有大电荷处理能力和高工作温度的长波碲镉汞器件。在像元尺寸一定的条件下, 通过电容积分复用的原理, 其电荷处理能力达到了普通电路的 2 倍, 可以很好地适应目标温度变化范围较大的场景。高工作温度红外探测器由于无需在温度极低的环境下工作, 其体积、重量、功耗相较于低温制冷器件具有后续应用优势。虽然该款器件在 110 K 下的光电性能相较于 77 K 时有一定的降低, 但总体上仍然可以使用。如何通过继续优化器件工艺水平, 降低暗电流, 增强响应信号, 将工作温度由 110 K 向更高的温度扩展是后期需要研究的一项重要内容。

参考文献

- [1] 杨斯博, 李敬国, 袁媛. 大电荷处理能力红外探测器读出电路像素设计 [J]. 激光与红外, 2023, **53**(12): 1892–1896.
- [2] 熊伯俊, 邹雷, 杨超伟, 等. 长波 p-on-n 碲镉汞红外焦平面器件高温工作性能 [J]. 红外与毫米波学报, 2022, **41**(4): 672–677.
- [3] 王亮, 杨微. 碲镉汞红外探测器量子效率计算研究 [J]. 激光与红外, 2019, **49**(7): 871–875.
- [4] 蒋志. 铟化物超晶格中长波红外探测器 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2019.
- [5] 朱萌. 基于迈克尔逊干涉仪的红外焦平面探测器光谱测试技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [6] 陈凯豪. 高量子效率 InAs/GaSb II 类超晶格外延生长及其特性研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2020.