

文章编号: 1672-8785(2020)08-0009-06

短/中波双色碲镉汞红外探测器 性能分析研究

邢艳蕾 刘建伟 王经纬 李忠贺

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 介绍了国内外双色红外探测器的发展现状, 并报道了中国电子科技集团公司第十一研究所(以下简称“中电十一所”)自行研制的像元间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的 Si 基 320×256 短/中波双色红外探测器的性能。在 $77\ \text{K}$ 测试条件下, 短波和中波两个波段的盲元率分别为 0.88% 和 1.47% , 平均峰值探测率分别为 $2.21\times 10^{12}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 和 $2.13\times 10^{11}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$, 后截止波长分别为 $3.129\ \mu\text{m}$ 和 $5.285\ \mu\text{m}$, 且短波向中波波段的频谱串音为 1.38% , 中波向短波波段的频谱串音为 2.82% 。同时, 该探测器在双波段具有较好的成像效果, 为后续更大面阵、更佳性能的多波段探测器研究提供了基础。

关键词: 短/中波; 双色; 碲镉汞探测器; 频谱串音; 成像

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.08.002

Study on the Performance of SW/MW Double-color MCT Detector

XING Yan-lei, LIU Jian-wei, WANG Jing-wei, LI Zhong-he

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

Abstract: The development of double-color detector at home and abroad is introduced. And the performance of the Si-based 320×256 SW/MW double-color infrared detector developed by the unit is reported. Under the test condition of $77\ \text{K}$, the blind element rates of the short wave (SW) and medium wave (MW) bands are 0.88% and 1.47% respectively. The average peak detection rate are $2.21\times 10^{12}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ and $2.13\times 10^{11}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ respectively. The back cutoff wavelengths are $3.129\ \mu\text{m}$ and $5.285\ \mu\text{m}$ respectively. The spectral crosstalk from SW to MW band is 1.38% , the crosstalk from MW to SW band is 2.82% . At the same time, the detector has good imaging results in the dual-band, which provides a foundation for further research on multi-band detectors with larger array and better performance.

Key words: SW/MW; double-color; MCT detector; spectral crosstalk; imaging

收稿日期: 2020-06-17

作者简介: 邢艳蕾(1992-), 女, 河北衡水人, 硕士, 助理工程师, 主要从事红外探测器的性能测试与分析研究。E-mail: xingyanleicetc@126.com

0 引言

随着第三代红外探测器技术的发展,集成式、大面阵、高分辨率、多色焦平面技术已成为主流^[1]。自 20 世纪 80 年代以来,双色碲镉汞红外探测器以其材料本身较高的量子效率、宽响应波段、双波段信息检测、高集成度以及较强的抗干扰能力等优点,逐渐成为第三代红外焦平面探测器发展的主要方向之一^[2-4]。

本文以中电十一所自主研发的 320×256 短/中波双色红外探测器为例,对其光电性能进行分析和评价,从而为后续工艺的改进与提升提供一定的参考信息。

1 国内外双色红外探测器的发展现状

目前,国外在集成式双色碲镉汞红外探测器技术方面比较领先的公司主要有 Raytheon 公司、Sofradir 公司、Teledyne 公司、DRS 公司、AIM 公司以及 Selex 公司等等。研究各公司的发展情况对国内如何发展双色器件有指导性意义。

1.1 Sofradir 公司

Sofradir 公司开发出像元间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的 320×256 双色焦平面探测器阵列,其后截止波长分别为 $3.1\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$,有效像元率大于 99.9%,积分时间为 1 ms 时的噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 小于 15 mK (见表 1)^[5]。像元间距为 $30\ \mu\text{m}$ 的 320×256 双色器件与传统的平面单色二极管有相同或相近的击穿电压和最大阻抗值。当工作温度为 77 K、视场角为 30° 、目标温度为 300 K 时, 16×16 面阵的 I-V 和 R-V 曲线如图 1 所示。可以看出,器件的反向击穿电压极大,说明器件的工作特性很好。

图 2 所示为探测器在制冷温度为 77 K 时的光谱响应曲线。可以看出,两个波段的后截止波长分别为 $3.1\ \mu\text{m}$ 和 $5.0\ \mu\text{m}$,光谱串音一般在百分之几,其大小决定于探测器的波长。

该款探测器的读出电路使用 5 V 电压、 $0.5\ \mu\text{m}$ 互补式金属氧化物半导体 (Complement-

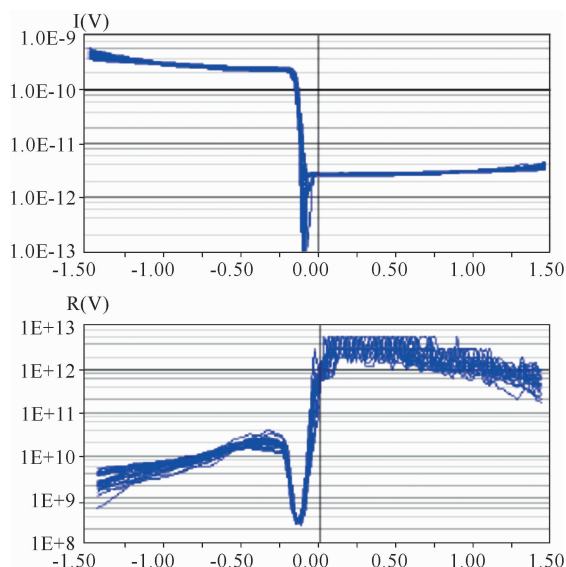


图 1 I-V 曲线(上)和 R-V 曲线(下)

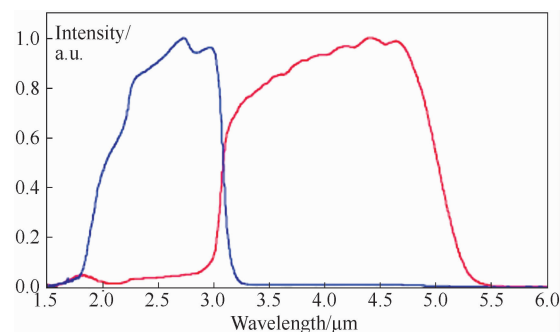


图 2 正常 77 K 下的光谱响应曲线

表 1 工业化 320×256 双色焦平面阵列的主要特性

参数	数值
阵列规模	320×256
波长/ μm	1~3/3.2~5.2
像元间距/ μm	30
工作温度/K	110
电荷容量/ Me^-	11.4~12
动态范围/dB	>80
NETD/mK	15
最大帧频/Hz	>200

tary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 技术和快照式工作模式,且有极低的功耗。随机存取模式的最小窗口尺寸为 128×1 。不同窗口可以同时独立工作,进而实现多目标跟踪。

1.2 Raytheon 公司

紧随 Selex 公司在 GaAs 衬底上生长中/长

波双色碲镉汞材料, Raytheon 公司于 2010 年报道了他们在 4 in Si 基衬底上生长中/长波双色碲镉汞的研究成果。该结构是一种生长在 4 in Si(211)基复合衬底上的 n-P-n 三层异质结。所用设备是 Riber Epineat 分子束外延系统, 配有 CdTe、ZnTe、Te 固态源和液态汞源, 且将铟和砷分别用作 n 型和 p 型掺杂剂^[6]。

采用 Raytheon 公司标准双色器件工艺制备的 512×512 长波/甚长波双波段探测器阵列(像元间距为 30 μm)的暗电流性能(见图 3)与单色长波探测器(液相外延)的相当。

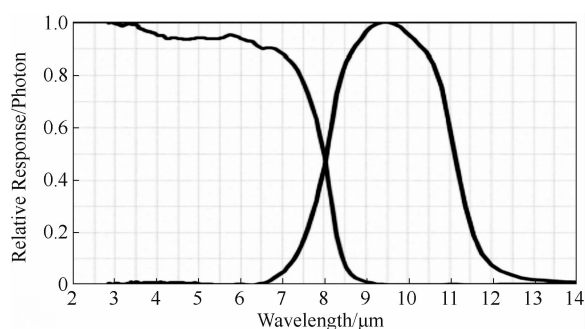


图 3 像元间距为 30 μm 的 512×512 长波/甚长波双波段探测器阵列的相应光谱

1.3 DRS 公司

目前 DRS 公司已经从单色器件发展到双色器件。他们利用一种很简单的胶合技术把两

个单色器件粘成双色器件, 形成一个绝缘的通路, 然后通过减薄层保证上层信号的读出。这项技术已用于研制 MW/LW 和 MW/MW 320×240 双色器件(性能见图 4 和表 2)。其中, MW/LW 双色器件已用于美国陆军研究实验室和美国夜视与电子传感器管理局的红外相机; MW/MW 双色器件现已用于第三代导弹预警系统。这项技术将很快扩展到三色和四色探测器^[7]。

1.4 中国科学院上海技术物理研究所

2010 年, 中国科学院上海技术物理研究所采用分子束外延和原位掺杂技术生长出了 P-P-P-N 型 HgCdTe 多层异质结双色材料, 并最终获得了 128×128 面阵(顺序探测)短/中波双色碲镉汞红外焦平面探测器(性能见表 3)。

2 自研双色探测器的性能分析

2.1 电学性能

本文根据 GB/T 17444-2013 测试方法, 采用红外探测器组件光电特性测试系统测量自研双色探测器在两个波段内的相关性能。测试步骤如下: (1)调节探测器所需的时序及偏压, 并将其发送到采集卡; (2)将面源黑体温度分别设置为 273 K 和 308 K; (3)待探测器制冷到

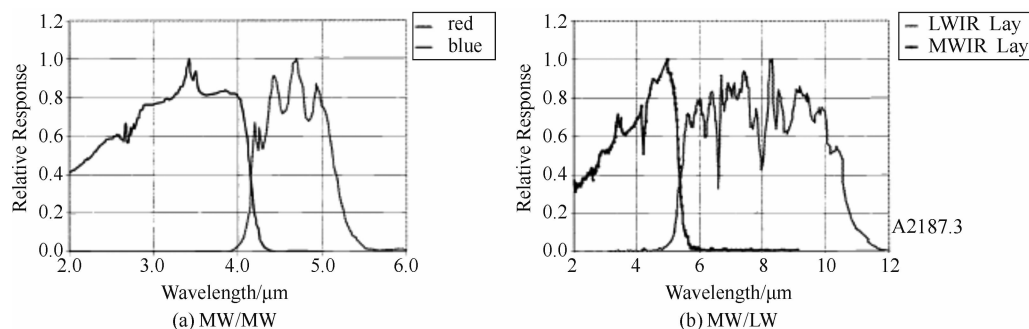


图 4 DRS 公司双色器件的测试光谱图

表 2 DRS 公司 320×240 双色探测器的性能参数

	光谱/ μm	像元间距/ μm	有效像元率/ %	响应率非均匀性/ %	NETD/ mK
320×240 MW/LW	3.0~5.2/ 8.0~10.2	50	97.1/96.3	4.8/4.2	9/23
320×240 MW/MW	3.0~4.2/ 4.2~5.2	50	99.4/99.6	4.3/3.7	18.1/8.3

77 K 后,用测试系统分别采集两个温度下的电平值;(4)根据 GB/T 17444-2013 中的测试方法,可以得到探测器的盲元率、非均匀性、NETD 和黑体响应率等电学性能参数。测试原理如图 5 所示。

短波和中波波段分别采用 150 ms 和 3 ms 的积分时间(测得的性能见表 4 和图 6)。

2.2 光学性能

通过对红外焦平面探测器多个波段的相对光谱响应进行测试,得到各波段之间的光谱串音,进而判断红外焦平面探测器各波段之间信号串扰的程度。

2.2.1 测试原理

光谱串音测试实际上就是红外焦平面探测器多个波段的相对光谱响应测试。在测得多个波段的相对光谱响应后,可根据定义算得光谱串音。

具体的测试步骤如下:

(1)按测试系统框图连接测试系统,然后进行系统预置。

(2)调节测试系统,使器件处于正常工作状态。

(3)采用相对光谱响应测试方法完成各波段的相对光谱响应测试。对于双波段探测器,假设为 A 波段和 B 波段。

(4)当测得 A、B 波段的相对光谱响应后,

表 3 128×128 面阵短/中波双色红外焦平面探测器的测试性能

技术参数	测试结果
像元间距/ μm	50
截止波长/ μm	SW: 2.7; MW: 4.9
平均峰值探测率/ $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	SW: 1.42×10^{11} ; MW: 2.15×10^{11}
响应率不均匀性/%	SW: 11.73; MW: 26.37
盲元率/%	SW: 1.30; MW: 13.60

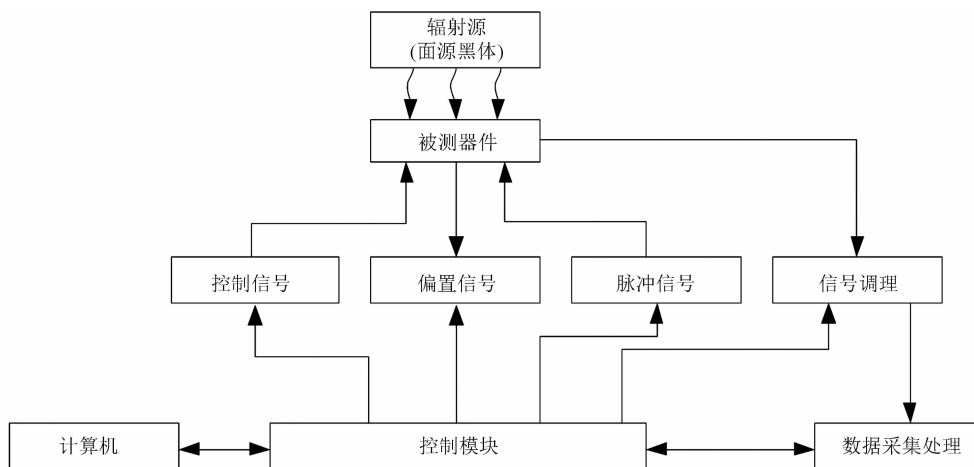


图 5 探测器电学性能测试的原理图

表 4 320×256 短/中波双色探测器的性能参数

指标项	测试结果	
像元间距/ μm	30	
非均匀性/%	SW: 3.85	MW: 4.22
峰值探测率/ $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	SW: 2.21×10^{12}	MW: 2.13×10^{11}
NETD/mK	SW: 9.815	MW: 13.28
盲元率/%	SW: 0.88	MW: 1.47

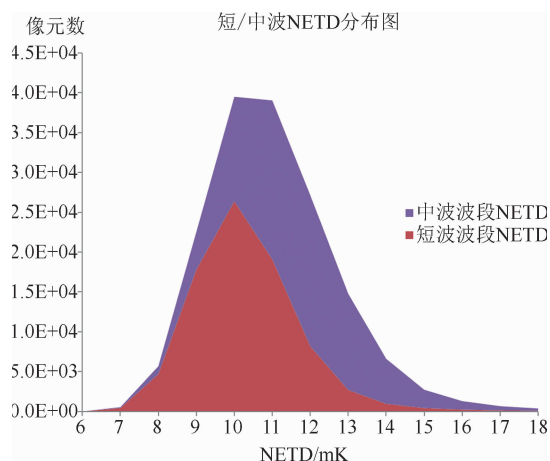


图 6 短/中波 NETD 分布图

在同一个坐标系中对两条相对光谱响应曲线进行归一化处理。此时, 光谱串音可按定义算得。

2.2.2 计算方法

考虑 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 和 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 波段内探测器的光谱串音, 分别计算 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内 A 波段探测器和 B 波段探测器的相对光谱响应曲线与波长轴所围的面积 S_A 和 S'_B 、 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 波段内 A 波段探测器和 B 波段探测器的相对光谱响应曲线与波长轴所围的面积 S_B 和 S'_A (见图 7)。

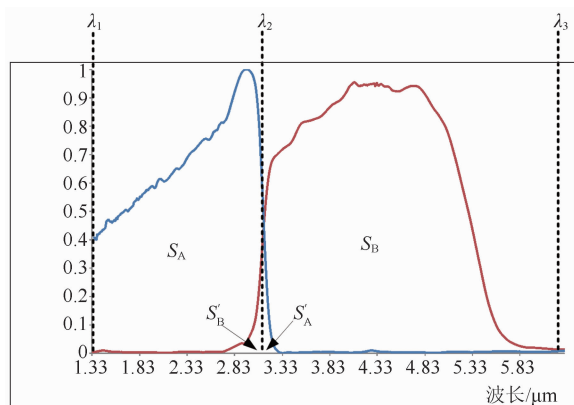


图 7 规定波段内光谱串音的计算

在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内, B 波段探测器对 A 波段探测器的光谱串音可根据式(1)算得。在 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 波段内, A 波段探测器对 B 波段探测器的光谱串音^[8-9]可由式(2)算得^[6]。

$$C_{TBA} = \frac{S'_B}{S_A} \times 100\% \quad (1)$$

$$C_{TAB} = \frac{S'_A}{S_B} \times 100\% \quad (2)$$

式中, C_{TBA} 表示 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内 B 波段探测器对 A 波段探测器的光谱串音; C_{TAB} 表示 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 波段内 A 波段探测器对 B 波段探测器的光谱串音; S_A 表示 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内 A 波段探测器的相对光谱响应曲线与波长轴所围的面积; S'_B 表示 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内 B 波段探测器的相对光谱响应曲线与波长轴所围的面积; S_B 表示 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 波段内 B 波段探测器的相对光谱响应曲线与波长轴所围的面积; S'_A 表示 $\lambda_2 \sim \lambda_3$ 波段内 A 波段探测器的相对光谱响应曲线与波长轴所围的面积。 λ_1 取 A 波段相对光谱响应前截止小于等于 0.1 的波长点, λ_3 取 B 波段相对光谱响应后截止小于等于 0.1 的波长点。

本文采用傅里叶红外光谱仪。当探测器正常工作后, 设置采集步进值 $\Delta = 0.006234 \mu\text{m}$, 并分别采集探测器在两个波段内的相对光谱响应, 然后对其进行归一化处理。此时可分别得到 S_A 、 S_B 、 S'_A 和 S'_B , 并可得到 $1.7076 \sim 3.129 \mu\text{m}$ 短波红外光谱和 $3.120 \sim 5.285 \mu\text{m}$ 中波红外光谱。

将算得的 S_A 、 S_B 、 S'_A 和 S'_B 代入式(1)和式(2), 可得到两个波段之间的光谱串音(见表 5)。

表 5 计算结果

参数	数值
短波 S_A 面积	1.286384
短波 S'_A 面积	0.027364
中波 S_B 面积	1.982198
中波 S'_B 面积	0.036256
C_{TAB}	1.38%
C_{TBA}	2.82%

采用两点法分别对两个波段的探测器进行了校正(结果见图 8 和图 9)。可以看出, 短波和中波波段的成像特性十分明显。

3 总结

本文详细介绍了国外各公司典型双色探测器的发展现状及性能指标。在此基础上, 介绍了中电十一所利用分子束外延工艺制备的 320



图 8 中波波段的成像图



图 9 短波波段的成像图

$\times 256$ 短/中波双色红外探测器及其进展。该探测器的性能较好: 77 K 测试条件下短波和中波两个波段的盲元率分别为 0.88% 和 1.47%, 平均峰值探测率分别为 $2.21 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 和 $2.13 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$, 后截止波长分别为 $3.129 \mu\text{m}$ 和 $5.285 \mu\text{m}$, 且短波向中波波段的谱串音为 1.38%, 中波向短波波段的谱串音为 2.82%。但是在双色发展方面, 国内的技术水平与国外仍有较大差距。本文的实验数据可为后续降低谱串音、

减小盲元率、提高信噪比的相关研究提供参考。

参考文献

- [1] 周杰, 丁瑞军, 翟永成, 等. 320×256 中/长波双色 IRFPAs 读出电路设计 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 2880–2885.
- [2] 叶振华, 丁瑞军, 何力, 等. 128×128 短波/中波双色红外焦平面探测器 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 415–418.
- [3] 王成刚, 孙浩, 李敬国, 等. 双色碲镉汞红外焦平面探测器发展现状 [J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 367–371.
- [4] 王经纬, 晋舜国, 陈慧卿, 等. 短/中波双色碲镉汞红外焦平面探测器研究 [J]. 激光与红外, 2018, 48(11): 77–80.
- [5] Destefanis C, Ballet P, Baylet J, et al. Bi-color and Dual-band HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays at DEFIR [C]. SPIE, 2006, 6206: 620–60R.
- [6] Radford W A, Patten E A, King D F, et al. 3rd Generation 1280×720 FPA Development Status at Raytheon Vision Systems [C]. SPIE, 2006, 6206: 62060W.
- [7] Antoni Rogalski. Third-generation Infrared Photon Detectors [J]. Optical Engineering, 2003, 42(12): 3498–3516.
- [8] 叶振华, 周文洪, 胡伟达, 等. 碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(1): 6–9.
- [9] 赵俊, 毛京湘, 李艳辉, 等. 双色焦平面红外探测器相对光谱串音研究 [J]. 红外技术, 2014, 36(4): 34–37.
- [10] 陆地应用 [J]. 载人航天, 2018, 24(4): 546–552.
- [11] 洪韬. 珠海一号高光谱卫星在内陆湖泊监测中的应用 [J]. 卫星应用, 2019, 10(8): 19–22.
- [12] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. “高分五号”卫星概况及应用前景展望 [J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 1–13.
- [13] “资源一号”02D 卫星可见近红外相机亮点多 [J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(5): 2.
- [14] (上接第 8 页)
- [15] [26] Bian J H, Li A, Zuo J Q, et al. Estimating 2009–2017 Impervious Surface Change in Gwadar, Pakistan Using the HJ-1A/B Constellation, GF-1/2 Data, and the Random Forest Algorithm [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8(10): 443.
- [16] [27] 覃帮勇, 刘志文, 李盛阳. 天宫一号高光谱数据的