

文章编号: 1672-8785(2025)10-0046-06

双色红外探测器芯片的串音测试方法研究

程 雨¹ 于元祯¹ 王 亮¹ 邢艳蕾¹ 陈彦冠^{1,2}
周 宽¹ 刘 铭² 吴 卿²

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015;

2. 华北光电技术研究所 红外探测全国重点实验室, 北京 100015)

摘 要: 介绍了双色红外探测器对目标识别的重要意义, 阐述了常见双色红外探测器的工作原理, 并指出了光谱串音测试方法的局限性。结合实际应用中响应电压的重要作用, 从普朗克黑体辐射原理出发, 对响应电压串音测试方法进行了论证。计算结果表明, 举例的双层材料双色探测器的长波波段向中波波段的串音为 13.7%, 但长波波段向中波波段的响应电压串音为 2.3%。通过成像验证, 实际应用场景中长波波段向中波波段的串音比例约为 2.4%, 证明响应电压串音测试方法具有实用性。该方法不仅适用于双层材料的双色红外探测器, 也适用于单层材料的拼接式双色红外探测器, 对于双色红外探测器芯片发展具有参考意义。

关键词: 双色红外探测器; 中波; 长波; 串音

中图分类号: TN304.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.10.004

Research on the Crosstalk Test Method of Two-Color Infrared Detector Chips

CHENG Yu¹, YU Yuan-zhen¹, WANG Liang¹, XING Yan-lei¹, CHEN Yan-guan^{1,2},
ZHOU Kuan¹, LIU Ming², WU Qing²

(1. North China Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. North China Institute of Electro-Optics, National Key Laboratory of
Infrared Detection Technologies, Beijing 100015, China)

Abstract: This paper introduces the importance of two-color infrared detectors for target identification, explains the operating principles of common two-color infrared detectors, and points out the limitations of spectral crosstalk test methods. Integrating the crucial role of response voltage in practical applications, the response-voltage crosstalk test method is demonstrated based on the principle of Planck blackbody radiation. Calculation results show that the spectral crosstalk from the long-wave band to the mid-wave band for the example two-layer two-color detector is 13.7%, while the response-voltage crosstalk from the long-wave band to

收稿日期: 2025-10-12

作者简介: 程雨(1989-), 女, 黑龙江大庆人, 硕士, 主要从事红外探测器技术研究。

E-mail: chengyu0431@aliyun.com

the mid-wave band is 2.3%. Imaging verification shows that the crosstalk ratio from the long-wave band to the mid-wave band in actual application scenarios is approximately 2.4%, demonstrating the practicality of the response-voltage crosstalk test method. This method is applicable not only to two-layer two-color infrared detectors but also to single-layer spliced two-color infrared detectors, providing valuable insights into the development of two-color infrared detector chips.

Key words: two-color infrared detector; mid-wave; long-wave; crosstalk

0 引言

自 20 世纪五六十年代第一台 PbS 红外探测器研制成功起, 红外探测技术已发展多年, 在短波、中波、长波和甚长波等单色探测器领域日趋成熟。由于具有全天候成像、穿透性强等优势, 该技术已经成为现代信息化战争中必不可少的组成部分^[1]。与单色探测器相比, 双色探测器可提供宽波段响应信息, 通过对比不同波长下的辐射特征, 有效抑制复杂背景的干扰, 在目标跟踪和军事预警过程中能明显降低虚警率, 因此在地球物理和卫星遥感等方面都具有重要的应用价值。

双色红外探测器有一个重要的性能评价指标——串音, 用于评定单个波段含有另一波段的信息比重。本文首先介绍当前主流的双色红外探测器的工作原理, 然后针对已报道的光谱串音测试方法进行分析, 推出结合实际应用和科学原理的响应电压串音测试方法, 并对其进行对比和论证。

1 双色红外探测器芯片的工作原理

早期双色红外探测器结构多为拼接式, 由两块独立的芯片、两套互连钢柱阵列和读出电路组成。像元在物理上是隔离的, 两个波段独立工作且可同时积分。由于两块芯片物理隔离, 串音水平很低。基于成熟的单色探测器工艺平台, 拼接式双色红外探测器芯片成品率高, 是目前最主流和商业化的路线, 在战术预警、红外搜索与跟踪 (Infrared Search and Tracking,IRST) 以及多光谱侦察等方面均有广泛应用。拼接式双色红外探测器最致命的缺点是空间配准误差大。由于两个波段的像元物理隔离, 存在视差, 导致观测同一目标时位置

不重合, 因此需要依赖复杂的图像处理算法进行配准^[2]。

随着科技进步, 双钢柱双色红外探测器的概念应运而生。其中每个双色像元由两个钢柱、双层材料和读出电路组成, 两个波段独立工作且可同时积分。在工艺设计上, 双钢柱双色红外探测器需要在每个像元上制作两个钢柱, 并使上下双层材料分别与读出电路形成可靠互连, 工艺难度极大, 成品率极低。理论上, 双钢柱双色红外探测器具有完美的空间配准和同时工作的双重优势。由于双层材料共用吸收层, 其串音比拼接式双色红外探测器高。但因工艺难度极大, 双钢柱双色红外探测器大多处于实验室研究和高端应用阶段。

接着衍生出单钢柱双色红外探测器技术路线。其中每个双色像元由一个钢柱、双层材料和读出电路组成, 通过切换偏压选择响应波段、分时积分工作。两个波段来自物理上的同一个像元, 因此具有完美的空间配准。同时双层光敏层紧密叠放, 中波红外光子易被长波层吸收, 导致串音提高。在单一芯片上外延生长双层高质量、不同截止波长的红外材料目前仍具挑战, 导致工艺复杂、成品率低、价格较贵。与双钢柱双色红外探测器相比, 单钢柱双色红外探测器具有更强的技术发展能力和批量应用潜力。本文以基于双层材料的 640×512 中/长波双色红外探测器为例, 对串音进行研究和评价。

2 双色红外探测器芯片的串音测试方法

2.1 光谱串音测试方法

双色红外探测器的串音计算方法集中报道为光谱串音测试方法, 具体如下: 假设双色红

外探测器的 A 波段探测器前、后截止波长分别为 λ_1 和 λ_2 , B 波段探测器前、后截止波长分别为 λ_3 和 λ_4 , 对 A 波段探测器和 B 波段探测器的相对光谱曲线进行归一化处理。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 ; 计算 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 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 。

在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内探测器 B 波段向探测器 A 波段的光谱串音由式(1)计算, 在 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 波段内探测器 A 波段向探测器 B 波段的光谱串音由式(2)计算。

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

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

式中, CT_{BA} 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内探测器 B 波段向探测器 A 波段的光谱串音; CT_{AB} 为 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 波段内探测器 A 波段向探测器 B 波段的光谱串音。

用光谱串音测试方法对相对光谱曲线进行计算分析, 将光谱之间的交叠比例作为串音的结果^[3-4]。这种方法突出了光谱范围的绝对作用, 要求单波段的光谱含有其他波段的光谱极少。光谱串音测试方法对拼接式双色红外探测器很友好。该探测器在每个波段的芯片上方均放置单色滤光片, 因此每个波段均不含有其他波段的光谱信息, 容易获得光谱串音很小的指标^[5-6]。随着拼接式双色红外探测器的广泛应用, 光谱串音测试方法得到了较多的报道。

在基于双层材料的双色红外探测器的材料结构设计中, 长波二极管的光电子传输需要经过中波波段的二极管, 通过光谱串音测试方法很难获得较好的串音指标。因此需要采用中波减透工艺来降低串音, 将长波波段的长波部分全面减透抑制, 且要保证中波波段响应相当, 但仍无法获得与拼接式双色红外探测器相当的光谱串音指标。

然而在红外探测器产品的实际应用中, 响应电压的作用更为重要。它对目标的表征起决定性作用, 比如长波波段光谱中的中波部分对响应电压贡献极小, 所以即使光谱之间有交叠, 光谱串音指标很高, 实际应用中用长波波段去观察目标时, 目标的中波特征很难展现出来。因此, 需要对串音测试方法进行修正, 将不同光谱的响应电压融入到串音计算内。

2.2 响应电压串音测试方法

基于光谱对响应电压的贡献, 研究了针对双层材料双色红外探测器的串音测试方法。以响应电压在单个波段含有另一波段的比重作为串音, 这就是响应电压串音测试方法, 具体如下: 分别测出双色红外探测器在 A 波段和 B 波段的平均响应电压 V_{SA} 和 V_{SB} 。根据 GB/T 17444-2013 中的相应方法, 以相同的采集步进 $\Delta\lambda$ 和采集范围 $\lambda_{start} \sim \lambda_{end}$, 分别测出探测器组件在 A 波段和 B 波段的相对光谱响应曲线 $X(\lambda)$ 和 $Y(\lambda)$, 获得中波波段的长截止波长 λ_1 、后截止波长 λ_2 以及长波波段的长截止波长 λ_3 、后截止波长 λ_4 。

根据普朗克黑体辐射公式、视场角(Field of View, FOV)以及单光子能量公式进行换算, 可以得到光谱采集步进 $\Delta\lambda$ 、单位接收面积及单位积分时间内探测器理论接收黑体发射的光子数 $N(\lambda)$:

$$N(\lambda) = \frac{2c \cdot \pi \cdot \Delta\lambda}{\lambda^4 \cdot FOV (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (3)$$

式中, c 为光速, $c = 3.0 \times 10^8$ m/s; π 为圆周率, $\pi = 3.14$; h 为普拉克常数, $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J·s; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K。

将式(3)按照光谱采集步进 $\Delta\lambda$ 从 λ_{start} 到 λ_{end} 进行细化, 获得采集步进间隔 $\Delta\lambda$ 的光子数列表。设置温度 T 分别为 293 K 和 308 K, 获得 308 K 和 293 K 下在采集范围内以步进间隔 $\Delta\lambda$ 的光子数差值列表 $N_\Delta(\lambda)$ 。

将相对光谱响应曲线 $X(\lambda)$ 和 $Y(\lambda)$ 分别除以 λ , 得到相对量子效率列表 $x(\lambda)$ 和 $y(\lambda)$ 。将

$N_{\Delta}(\lambda)$ 与 $x(\lambda)$ 按照波长进行相乘相加, 得到列表 $A(\lambda)$; 将 $N_{\Delta}(\lambda)$ 与 $y(\lambda)$ 按照波长进行相乘相加, 得到列表 $B(\lambda)$ 。

分别计算探测器在 A 波段的平均响应电压 V_{SA} 在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的响应电压分量 ΔU_{AA} 和在 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 波段的响应电压分量 ΔU_{AB} , 以及探测器在 B 波段的平均响应电压 V_{SB} 在 $\lambda_3 \sim \lambda_4$ 波段的响应电压分量 ΔU_{BB} 和在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的响应电压分量 ΔU_{BA} 。

$$\Delta U_{AA} = \frac{V_{SA} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} (A(\lambda))}{\sum_{\lambda_{start}}^{\lambda_{end}} (A(\lambda))} \quad (4)$$

$$\Delta U_{AB} = \frac{V_{SA} \sum_{\lambda_3}^{\lambda_4} (A(\lambda))}{\sum_{\lambda_{start}}^{\lambda_{end}} (A(\lambda))} \quad (5)$$

$$\Delta U_{BB} = \frac{V_{SB} \sum_{\lambda_3}^{\lambda_4} (B(\lambda))}{\sum_{\lambda_{start}}^{\lambda_{end}} (B(\lambda))} \quad (6)$$

$$\Delta U_{BA} = \frac{V_{SB} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} (B(\lambda))}{\sum_{\lambda_{start}}^{\lambda_{end}} (B(\lambda))} \quad (7)$$

则探测器 B 波段向 A 波段的串音以及探测器 A 波段向 B 波段的串音分别为

$$CT_{BA} = \frac{\Delta U_{BA}}{\Delta U_{AA}} \times 100\% \quad (8)$$

$$CT_{AB} = \frac{\Delta U_{AB}}{\Delta U_{BB}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, CT_{BA} 为探测器 B 波段向探测器 A 波段的响应电压串音; CT_{AB} 为探测器 A 波段向探测器 B 波段的响应电压串音。

响应电压串音测试方法的原理是基于不同光谱位置的光子数差值与相对量子效率乘积之比, 相当于不同光谱位置的响应电压之比。下面对两种串音测试方法进行验证。

3 双色红外探测器芯片的响应电压串音测试方法验证

以基于双层材料的 640×512 中/长波双色红外探测器为例, 在 50 Hz 帧频下采集中波波段与长波波段的光电性能和光谱数据。然后用光谱串音测试方法和响应电压串音测试方法分别计算串音, 最后通过双色红外探测器演示成

像来验证串音的符合性。

3.1 两种串音测试方法计算

对双色红外探测器进行光电性能测试以及光谱测试后, 获得中波波段平均响应电压 V_{SA} 为 480 mV、长波波段平均响应电压 V_{SB} 为 362 mV。将光谱曲线 50% 位置记为前、后截止, 中波前截止波长为 $3.53 \mu\text{m}$, 后截止波长为 $4.84 \mu\text{m}$; 长波前截止波长为 $7.42 \mu\text{m}$, 后截止波长为 $9.56 \mu\text{m}$ 。对光谱曲线数据进行归一化处理, 如图 1 所示。

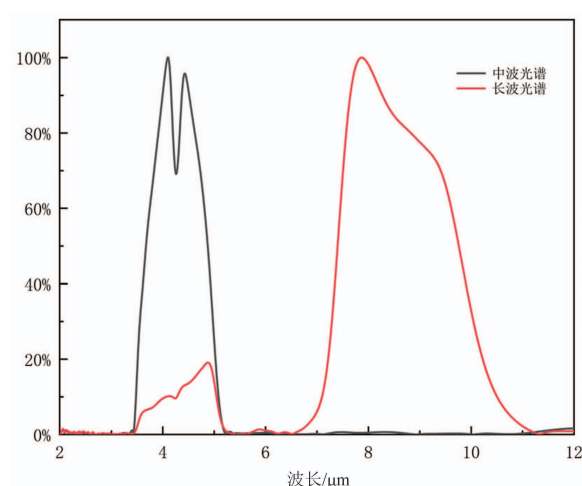


图 1 双色红外探测器的相对光谱曲线图

依据光谱串音方法计算得到, 长波波段向中波波段的串音为 13.7%, 中波波段向长波波段的串音为 0.4%。依据响应电压串音方法计算得到, 长波波段向中波波段的响应电压串音为 2.3%, 中波波段向长波波段的响应电压串音为 0.7%。可以发现, 两种方法针对双层材料双色红外探测器的串音结果差异巨大。下面以实际成像应用来验证测试方法的有效性。

3.2 双色红外探测器的成像验证

将前面采用的双色红外探测器组件进行室外成像, 同样以 50 Hz 帧频进行校正成像。成像图如图 2 所示。在观察中波波段成像时, 前置透射波段为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 的带通滤光片; 在观察长波波段成像时, 前置透射波段为 $7.7 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 的带通滤光片。观察成像图码值变化, 并记录数据(结果见表 1)。

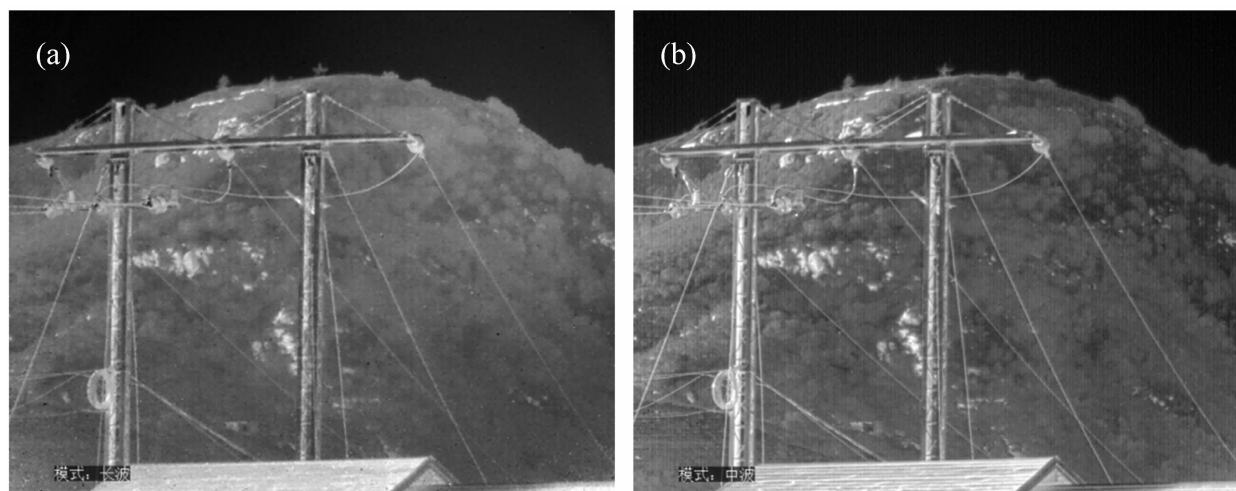


图 2 双色红外探测器的成像图: (a)长波波段; (b)中波波段

表 1 前置滤光片后的输出码值变化表

成像波段	常规输出码值	前置单色带通滤光片后的输出码值	码值衰减率
中波	33562	33397	0.5%
长波	27562	26900	2.4%

码值衰减率代表了单色波段引入其他波段的响应电压比例,与串音比例近似。由此可知,在实际应用场景中,长波波段向中波波段的串音比例约为 2.4%,中波波段向长波波段的串音比例约为 0.5%,串音比例很小。从图 2 中可以看出,中波向光区与背光区的灰度对比度比长波波段更强,符合中波波段可探测目标自身发出的热辐射和目标反射太阳光的辐射而长波波段探测的信号几乎全部来自于目标自身热辐射的规律。针对目标特征光谱的采集和识别,本文采用的基于双层材料的 640×512 中/长波双色红外探测器在使用过程中能够探测两个波段的独有特征,满足应用需求。实际应用场景中测得的串音与响应电压串音测试方法得到的结果非常接近。因此可认为,针对双层材料双色红外探测器,光谱串音测试方法无法有效表征实际应用场景中的串音比例,而响应电压串音测试方法则更具实用性。

相似地,对于拼接式双色红外探测器,因单色芯片上方均置有单色滤光片,如果用响应电压方法计算串音,那么拼接式双色红外探测器的串音比例仍然较低。

因此,响应电压串音测试方法不仅适用于双层材料的双色红外探测器,也适用于单层材料的拼接式双色红外探测器。该方法补充了光谱串音测试方法的不足,可以兼顾当前先进双色结构特征,结合普朗克黑体辐射原理,以不同光谱对应的响应电压为切入点,最终将响应电压在单个波段含有另一波段的比重记为串音(结果与实际应用场景贴近)。响应电压串音测试方法可以对实际应用情况进行预判,具有较高的有效性。

4 结束语

本文以双色红外探测器的工作原理为背景,阐述了广泛报道的光谱串音测试方法不适用双层材料双色红外探测器的问题,提出了兼容双层材料双色探测器和单层材料双色探测器的响应电压串音测试方法。该方法依据普朗克黑体辐射原理,将实际应用中的关键指标——响应电压按照光谱进行细分,提取出双色探测器波段之间串音的本质——应用场景中单个波段含有另一个波段的响应电压比重,具有很高的有效性。响应电压串音测试方法发展并补充了光谱串音测试方法,具有很强的实用价值。

未来可优化双层材料双色探测器的台面隔离与钝化技术, 减少像元间因表面漏电导致的串扰, 改良抗反射膜设计, 减少入射光在探测器内部的多次反射和散射, 进一步实现双层材料双色探测器的串音抑制。

参考文献

- [1] 邢艳蕾, 刘建伟, 王经纬, 等. 短/中波双色碲镉汞红外探测器性能分析研究 [J]. 红外, 2020, **41**(8): 9–14.
- [2] 刘铭, 游聪娅, 李景峰, 等. 长/长波双色二类超晶格红外探测器研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2023, **42**(5): 574–579.
- [3] 陈冬琼, 杨文运, 邓功荣, 等. 碲镉汞红外探测器的研究进展 [J]. 红外技术, 2022, **44**(10): 1009–1017.
- [4] 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): 286–289.
- [5] 吴亮亮, 高达, 刘铭, 等. 中长波双色碲镉汞红外探测器器件模拟与分析 [J]. 激光与红外, 2020, **50**(12): 1472–1479.
- [6] 叶振华, 李杨, 胡伟达, 等. 同时模式的中波/长波碲镉汞双色红外探测器 [J]. 红外与毫米波学报, 2012, **31**(6): 497–500.