

## 中/长波切换工作模式的双色量子阱红外焦平面研制

李东升, 周旭昌, 王 博, 木迎春

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘 要:** 报道了中/长波切换工作模式的双色量子阱红外焦平面研制。通过特殊设计的器件和读出电路结构, 获得了可对中波波段和长波波段选择的切换架构。突破了双色量子阱材料、器件以及读出电路等关键技术, 研制出 384×288 规模、25 μm 中心距双色量子阱红外焦平面探测器。在 70 K 条件下器件性能优良, 噪声等效温差为 28 mK(中波)和 30 mK(长波), 响应峰值波长分别为 5.1 μm(中波)和 8.5 μm(长波)。室温目标红外成像演示了探测器的双色探测功能。

**关键词:** 中/长波切换工作模式; 双色量子阱红外焦平面; 红外成像

**中图分类号:** TN215    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1681-05

## Dual color QWIP FPA with MW/LW switchable architecture

Li Dongsheng, Zhou Xuchang, Wang Bo, Mu Yingchun

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The development of the the MWIR/ LWIR dual color quantum well infrared FPA with the architecture switching between MWIR and LWIR was reported. The architecture including chip and read-out circuit (ROIC) frame was specially designed to realize the selection and switch of the MW band and LW band. The QWIP FPA key technologies such as quantum well material epitaxy, chip preparation and ROIC were described. The dual color 25 μm pitch 384×288 QWIP FPA is realized with the excellent noise equivalent temperature difference (NETD) of 28 mK in the MWIR and 30 mK in the LWIR at a operating temperature of 70 K. The peak wavelength is 5.1 μm for MWIR and 8.5 μm for LWIR. The infrared image of the target at room-temperature demonstrates the dual color detection function of the FPA.

**Key words:** MW/LW switchable architecture; dual color QWIP FPA; infrared image

## 0 引言

具有中/长波两个大气窗口探测能力的双色红外焦平面能显著提高红外探测系统对复杂背景条件下探测真实目标的能力,在武器系统敌我识别、告警和远距离侦察等方面有着重要的应用价值,成为世界各国重点发展的研究方向。在双色红外焦平面上,量子阱焦平面就是最重要的方向之一<sup>[1]</sup>。

量子阱红外焦平面探测器是近二十年来发展起来的一种新型红外焦平面探测器。量子阱焦平面具有探测波长可调谐、易于大面阵和双色集成、均匀性好、温度分辨率高、成品率高、成本低等优点。目前单色量子阱红外焦平面已经趋于成熟,并已经投入批量生产和军事装备。在双色量子阱焦平面研制上,国外红外研究机构主要集中在中/长波双色同时探测积分模式研究,近年来也获得了较大的进展<sup>[1-6]</sup>。其中德国 Fraunhofer IAF 研究所和 AIM 公司的双色 384×288 量子阱红外焦平面在 65 K 条件下两个波段的噪声等效温差(NETD)均小于 30 mK<sup>[1]</sup>,展现出量子阱焦平面在双色大面阵器件上的优势。在双色量子阱的技术发展上,目前国际上出现了另外一种技术路线:即通过中波和长波模式切换的方式来实现对中/长波的探测,这种器件可根据战场实际应用要求切换和选择探测波段,具有高度集成、小型化、探测波段灵活可变等特点,从而成为双色量子阱器件的另外一种发展方向<sup>[6]</sup>。国内近年来也对量子阱红外焦平面进行了重点研究,已经在长波焦平面上取得了一定的进展<sup>[7-10]</sup>,但在双色焦平面上报道较少。

文中报道了中/长波切换工作模式的 384×288 规模、25 μm 中心距双色量子阱红外焦平面探测器的研制进展,在 70 K 条件下器件噪声等效温差为 28 mK(中波)和 30 mK(长波),并进行了演示成像。

## 1 中/长波探测波段切换模式双色量子阱器件架构设计

中/长波探测波段切换模式双色量子阱器件由中波和长波两个探测元叠加而成。为实现中波/长波探测波段的切换功能,探测器在中波像元和长波像元之间设置了一个电子切换开关,通过该开关选择探测波段,分别对中波或长波像元施加偏压,并将所

选择波段的探测信号输出到整机电路,从而实现中/长波探测波段的切换,原理如图 1 所示。两种模式切换主要是通过器件和读出电路的结合,分别将中波像元顶部电极或长波像元底部电极与读出电路的公共地电极相连,通过对某一波段像元的偏压施加,将信号从中部电极层输出。

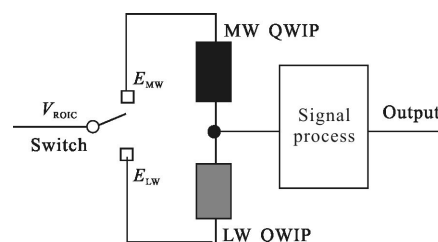


图 1 中/长波切换模式双色量子阱探测器工作原理图

Fig.1 Operational principle of the dual-color QWIP with switch architecture

## 2 切换模式中/长波双色量子阱焦平面器件研制

### 2.1 材料设计与生长

双色量子阱材料包括中波和长波量子阱吸收层以及电极层。中波量子阱层采用 InGaAs/AlGaAs 材料,长波量子阱层采用 GaAs/AlGaAs 应变量子阱材料。通过能带结构计算设计,将量子阱层导带的激发态置于阱口位置,获得束缚态到准束缚态(B→QB)的子带间跃迁,降低了暗电流。优化的材料结构如图 2 所示。在结构上,分别设计了上中下三个电极接触层,为器件的中波、长波驱动电压和信号输出提供电学接触。

Contact	GaAs	Si:1×10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
MW QWs	×25	In <sub>0.28</sub> Ga <sub>0.72</sub> As 4×10 <sup>18</sup> cm <sup>-2</sup> 4 nm
		Al <sub>0.35</sub> Ga <sub>0.65</sub> As 50 nm
Contact	GaAs	1×10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
LW QWs	×25	GaAs 1×10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup> 5 nm
		Al <sub>0.27</sub> Ga <sub>0.73</sub> As 50 nm
Contact	GaAs	Si:1×10 <sup>18</sup> cm <sup>-3</sup>
GaAs substrate(100)		

图 2 双色量子阱材料结构

Fig.2 Dual-color QWIP material structure

采用 MBE 49 在 4 in(1 in=2.54 cm)半绝缘 GaAs

(100)衬底上进行量子阱材料的生长,生长过程中采用红外测温仪测试控制生长温度,使材料生长保持在 $\beta(2\times 4)$ 再构表面。生长过程中,在界面处进行了适当的停顿,以获得平整的界面。

对生长的量子阱材料进行了 HRXRD 测试以及红外吸收光谱测试,结果如图 3 和图 4 所示。其中 XRD 衍射图谱中量子阱材料卫星峰具有较高的强度且半峰宽很窄,表明材料具有优良的晶格完整性。红外吸收谱测试结果表明量子阱材料的吸收特性符合材料设计以及器件响应波段要求。

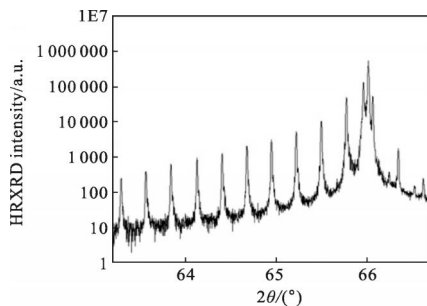


图 3 双色量子阱材料的 HRXRD 衍射图谱

Fig.3 HRXRD results of the dual-color QWIP material

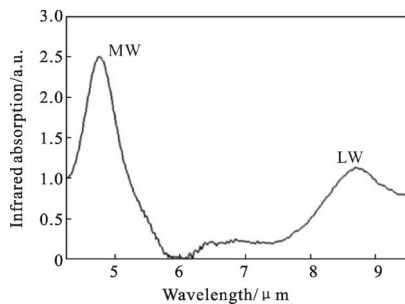


图 4 双色量子阱材料的红外吸收谱

Fig.4 Infrared absorption of the dual-color QWIP material

### 2.2 双色量子阱芯片

双色量子阱像素的结构如图 5 所示,采用台面结构,底电极层保持联通状态,在器件的上电极层 EMW 或器件的底电极层 ELW 施加偏压,在中间电极层信号引出。器件底电极 ELW 作为长波波段器件的公共电极,当偏置电压切换到底电极 ELW 时,在阵列像素中间电极层输出信号就是目标的长波信息。而阵列像素的上电极层则是通过引出金属串联为一个公共电极 EMW,当偏置电压切换到上电极 EMW 时,在阵列像素中间电极层输出信号就是目标的中波信息。

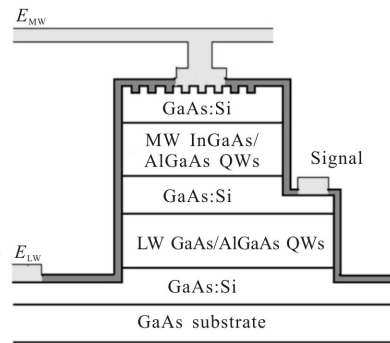


图 5 双色量子阱芯片结构

Fig.5 Dual color QWIP chip structure

双色量子阱芯片的制备主要包括二维光栅制备、台面制备、金属沉积、合金化、钝化、顶部电极串联金属制备等过程,其中台面制备过程中的刻蚀是关键工艺。为了尽可能提高像元占空比,双色量子阱探测器器件制备工艺要完成高深宽比的深槽刻蚀,实现各个像元完全隔离。双色量子阱材料总厚度约 3~4  $\mu\text{m}$ ,一般器件隔离槽宽度 $\leq 2 \mu\text{m}$ 。采用反应离子刻蚀(RIE)与化学辅助离子束刻蚀(CAIBE)工艺,通过对刻蚀气体流量、工作压强、射频功率等参数进行条件实验设计和优化,获得了深 4  $\mu\text{m}$ 、宽 2  $\mu\text{m}$  的深槽刻蚀技术,完成了台面和光栅制备的量子阱芯片结构,如图 6 所示。

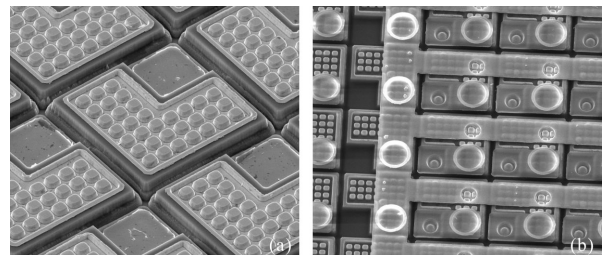


图 6 量子阱器件台面结构(a)和芯片(b)的 SEM 照片

Fig.6 SEM pictures of the QWIP mesa (a) and the chip (b)

### 2.3 读出电路

中/长波读出电路如图 7 所示,可分别输入中波和长波探测信号。探测器信号在各自最优的偏置条件下,主要通过采用中/长波输入级积分电容优化、积分时间可调、探测器偏置可调等技术手段实现信号输出。针对中/长波器件的特点,设计与之相对应的输入级阻抗,使中/长波器件在最佳负载条件下工作。针对中/长波器件光电流的巨大差异,设计与之相对应的最优的电荷处理能力,使其具有最佳的动

态范围及信噪比。

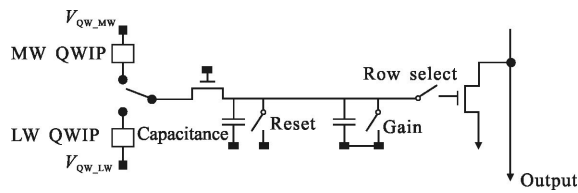


图 7 读出电路工作模式原理图

Fig.7 Operational principle of the ROIC

## 2.4 探测器芯片组

将制备完成的双色量子阱芯片和读出电路倒焊互连,获得探测器芯片组,通过背减薄/衬底去除工艺来提高器件响应。确定采用以下工艺流程:第一步在红外敏感探测器芯片与读出电路芯片之间的缝隙用环氧胶填充。第二步采用机械磨抛去除约  $600\ \mu\text{m}$  的 GaAs 层,接着用化学抛光再去除约  $100\ \mu\text{m}$  GaAs。第三步采用选择性湿化学腐蚀和反应离子刻蚀完全去除最后的 GaAs 衬底。在完成量子阱芯片背减薄以后对芯片进行镀膜增透,芯片如图 8 所示。

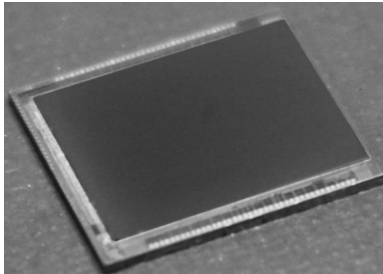


图 8 背减薄的双色量子阱芯片

Fig.8 Dual-color QWIP chip after back-lapping

## 3 探测器组件测试/成像演示结果

将双色量子阱芯片封装于金属微杜瓦, 配装斯特林制冷机, 将芯片降温到  $70\ \text{K}$  进行光谱和性能测试。双色量子阱探测器的光谱响应曲线如图 9 所示, 器件的中波峰值波长为  $5.1\ \mu\text{m}$ , 长波峰值波长为  $8.5\ \mu\text{m}$ 。同时可看出, 由于量子阱红外峰值响应特性, 中波响应和长波响应没有交集, 不会产生光学串扰。对双色量子阱焦平面器件的噪声等效温差 (NETD) 测试结果如图 10 所示, 其中器件中波波段的 NETD 为  $28\ \text{mK}$ , 器件长波波段的 NETD 为  $30\ \text{mK}$ , 已经达到国外报道水平。

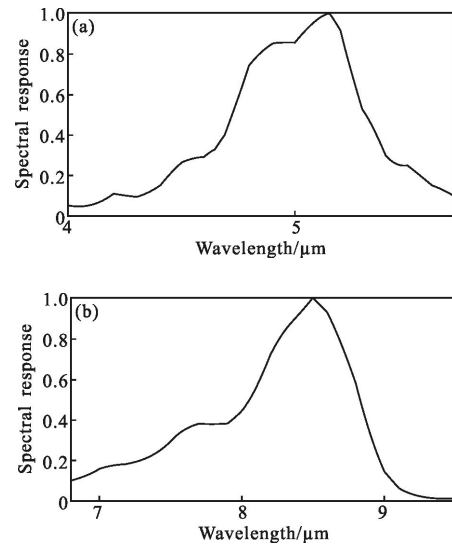


图 9 双色量子阱探测器的中波(a)和长波(b)响应光谱

Fig.9 Responsivity spectrum of the dual-color QWIP,

(a) MW QWIP, (b) LW QWIP

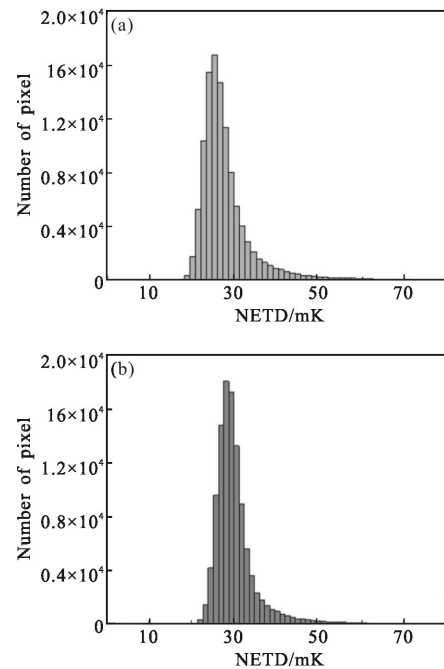


图 10 双色量子阱探测器的中波(a)和长波(b)噪声等效温差

Fig.10 NETD histograms of a dual-color QWIP, (a) MW QWIP,

(b) LW QWIP

对双色量子阱焦平面进行了人物演示成像验证, 结果如图 11 所示, 可清晰分辨出人物头发。在成像过程中, 将一根金属棒放置于红外截止波长为  $5.6\ \mu\text{m}$  的蓝宝石片后, 用于对比验证。在中波通道下该蓝宝石是透明的, 可看到宝石片后的金属棒。而在长波通道下, 由于蓝宝石片不透明, 所以无法观察

到宝石片后的金属。由此分辨出中波和长波成像的差别。

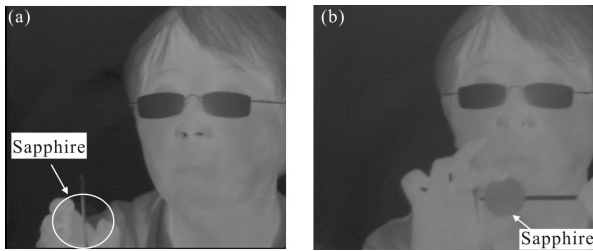


图 11 双色量子阱焦平面,中波通道(a)和长波通道(b)演示成像  
Fig.11 MW infrared image (a) and LW infrared image (b) of the dual-color QWIP FPA

## 4 结论

通过双色量子阱材料生长、双色芯片制备以及双色读出电路的研制工作,获得了  $384 \times 288$  规模、 $25 \mu\text{m}$  中心距、中/长波切换工作模式的双色量子阱红外焦平面探测器,在 70 K 条件下器件性能优良,噪声等效温差为 28 mK(中波)和 30 mK(长波)。演示成像验证了器件的双色探测性能,表现出量子阱探测器在双色大面阵成像方面的优势。基于该工作的相关结果,将推进双色量子阱焦平面探测器向实用化方面发展。

## 参考文献:

- [1] Schneider H, Liu H C. Quantum Well Infrared Photodetector [M]. Berlin: Springer, 2006: 196-199.
- [2] Costard E, Bois P, Rossi A D, et al. QWIP detectors and thermal imagers[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2003, 4(10): 1089-1102.
- [3] Hirschauer B, Alverbro J, Andersson J, et al. Development and production of QWIP focal plane arrays at ACREO [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2001, 42: 329-332.
- [4] Gunapala S D, Bandara K M S V, Levine B F, et al. High performance InGaAs/GaAs quantum well infrared photodetectors [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 64 (25): 3431-3434.
- [5] Cabanskia W, Münzberga M, Rodea W, et al. Third generation focal plane array IR detection modules and applications[C]//Infrared Technology and Applications XXXI, Proc of SPIE, 2005, 5783: 340-349.
- [6] Costarda E, Truffera J P. Two color QWIP and extended wavebands[C]//SPIE, 2007, 6542: 65420X.
- [7] Zhou Xuchang, Tan Ying, Yang Chunzhang, et al, Study on the quantum well infrared Photodetector material [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 463-466. (in Chinese)  
周旭昌, 谭英, 杨春章, 等. 长波量子阱红外探测器材料技术研究[J]. 红外技术, 2013, 35(8): 463-466.
- [8] Li Xianjie, Liu Yingbin, Feng Zhen, et al. AlGaAs/GaAs quantum well infrared photodetector focal plane array based on MOCVD technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(4): 435-438. (in Chinese)  
李献杰, 刘英斌, 冯震, 等. 基于 MOCVD 技术的长波 AlGaAs/GaAs 量子阱红外焦平面探测器[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(4): 435-438.
- [9] Zhong Ming, Su Yanmei, Zhang Yanbing, et al.  $160 \times 128$  focal plane arrays of long wavelength GaAs/AlGaAs multiple quantum well infrared photodetector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 702-704. (in Chinese)  
种明, 苏艳梅, 张艳冰, 等.  $160 \times 128$  元多量子阱长波红外焦平面探测器器件研制 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 702-704.
- [10] Jin Jupeng, Liu Dan, Wang Jianxin, et al.  $320 \times 256$  GaAs/AlGaAs long-wavelength quantum well infrared photodetector focal plane array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 833-837. (in Chinese)  
金巨鹏, 刘丹, 王建新, 等.  $320 \times 256$  GaAs/AlGaAs 长波红外量子阱焦平面探测器[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 833-837.