

中长双色红外焦平面探测器组件技术研究

耿松, 杨晋, 李树杰, 覃钢, 李立华, 赵俊*, 李艳辉, 孔金丞, 赵鹏,
左大凡, 胡彦博, 梁艳, 任洋

(昆明物理研究所, 云南昆明650223)

摘要:在(211)B碲镉汞衬底上,采用分子束外延生长制备了PPP型中长双色碲镉汞材料,通过台面孔刻蚀、侧壁钝化等工艺,实现中长双色640×512红外焦平面探测器组件研制。中长双色碲镉汞材料测试结果表明,表面宏观缺陷(2~10 μm)密度统计分布约773 cm⁻²,同时对材料进行了XRD双晶衍射半峰宽(FWHM)测试和位错腐蚀坑(EPD)统计,XRD测试FWHM约31.9 arcsec,EPD统计值约为5×10⁵ cm⁻²;双色器件芯片台面刻蚀深度达到8 μm以上,深宽比达到1:1以上,侧壁覆盖率达到72.5%。中长双色红外焦平面组件测试结果表明,中波波长响应范围为3.6~5.0 μm,长波波长响应范围为7.4~9.7 μm,中波向长波的串音为0.9%,长波向中波的串音为3.1%,中波平均峰值探测率达到3.31×10¹¹ cm·Hz^{1/2}/W,NETD为17.7 mK;长波平均峰值探测率达到6.52×10¹⁰ cm·Hz^{1/2}/W,NETD为32.8 mK;中波有效像元率达到99.46%,长波有效像元率达到98.19%,初步实现中长双色红外焦平面组件研制。

关键词: 中长双色; 碲镉汞; 分子束外延; 等离子体刻蚀; 串音

中图分类号: TN36

文献标识码: A

Study of MW/LW dual-band IRFPAs detector assemblies

GENG Song, YANG Jin, LI Shu-Jie, QIN Gang, LI Li-Hua, ZHAO Jun*, LI Yan-Hui,
KONG Jin-Cheng, ZHAO Peng, ZUO Da-Fan, HU Yan-Bo, LIANG Yan, REN Yang
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Based on (211) B CdZnTe substrate, PPP type medium-wave and long-wave dual-band HgCdTe material was prepared by molecular beam epitaxy. The medium-wave and long-wave dual-band 640×512 infrared focal plane detector assembly was fabricated by mesa-hole etching, sidewall passivation and other processes. The test results of MW/LW dual-band HgCdTe material show that the macro defects (2~10 μm) density is about 773 cm⁻². Then, the materials were tested by XRD double crystal diffraction half peak width (FWHM) and etch pit density (EPD). The FWHM measured by XRD is about 31.9 arcsec, and the EPD is about 5 × 10⁵ cm⁻². The etching depth of dual-band device chip mesa reaches 8 μm or more, the depth-width ratio is more than 1:1, and the sidewall coverage is 72.5%. The test results of dual-band IRFPAs show that the response range is 3.6~5.0 μm and 7.4~9.7 μm. The crosstalk of medium wave to long wave is 0.9%, and long wave to medium wave is 3.1%. The average peak detection rate of medium wave and long wave reaches 3.31 × 10¹¹ cm · Hz^{1/2}/w and 6.52 × 10¹⁰ cm · Hz^{1/2}/w, while the NETD and effective pixel rate are 17.7 mK, 32.8 mK and 99.46%, 98.19%, respectively.

Key words: MW/LW dual-band, HgCdTe, molecular beam epitaxy(MBE), plasma etch, cross-talk

引言

中长双色红外焦平面探测器是典型的第三代红外器件产品,可同时获取目标在中波与长波两个

红外波段的辐射信息,相较于单色红外探测器,具有探测波段范围宽、特征信息丰富、抗干扰能力强等优点,是红外探测与红外成像领域的热点^[1-2]。

目前,中长双色红外探测的材料主要包括碲镉

收稿日期:2022-09-25,修回日期:2023-03-19

Received date:2022-09-25, revised date:2023-03-19

基金项目:国家科技重大专项

Foundation item: Supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China.

作者简介(Biography):耿松(1983-),男,安徽利辛人,高级工程师,博士,硕士生导师,主要研究领域为双色红外焦平面组件。

E-mail:93892203@qq.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail: junzhao80@163.com

汞(HgCdTe)、Ⅱ类超晶格与量子阱等,其中,量子阱材料因受限于其子带间跃迁的工作方式,只能选择性吸收部分入射光,量子效率较低;Ⅱ类超晶格材料具有较好的均匀性,但材料生长时较难同时满足厚吸收层与低表面缺陷密度的要求,导致制备的双色芯片量子效率低、串音偏大;碲镉汞材料作为成熟的双色红外材料,具有量子效率高、缺陷密度低、串音小、波段覆盖广等优点,是第三代双色红外探测器的首选^[3-4]。自20世纪90年代初,美国圣芭芭拉研究中心(Santa Barbara Research Center)第一次使用液相外延(LPE)技术制备碲镉汞双色器件以来^[5],碲镉汞双色材料技术逐渐走向成熟,美国、法国、英国等国家在碲镉汞双色红外焦平面探测器研究方面迅速发展,已制备出了高性能双色器件用于各种军用或民用系统中,其典型产品像元中心距达到20 μm,长波NETD达到30 mK左右,中波NETD达到20 mK以下^[6-9]。

本文在(211)B碲锌镉(CZT)衬底上,采用分子束外延(MBE)技术生长了P-P-P结构中/长波双色碲镉汞薄膜材料;通过台面孔刻蚀、侧壁钝化、离子注入、爬坡电极制备等双色芯片加工工艺,获得了中/长波双色640×512红外焦平面芯片;通过倒装互连、背减薄、杜瓦封装后,获得了中/长波双色探测器组件,完成组件光电性能系统表征,并演示了640×512规模中/长波双色红外焦平面组件成像效果。

1 材料设计与生长

中/长波双色红外焦平面组件两个波段响应波长分别为3~5 μm和7~10 μm,中/长波双色碲镉汞材料结构设计上,主要考虑以下几个因素:(1)光谱串音的抑制;(2)器件的量子效率;(3)器件制备工艺难度。针对光谱串音的抑制,主要通过增大中波吸收层厚度和两个波段之间插入一定厚度的高组分势垒层来实现。碲镉汞材料的本征吸收系数 α 与材料组分 x 、工作温度 T 和入射光子能量 E 相关:

$$\alpha = \alpha_g \exp\left[\beta(E - E_g)\right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中, $\alpha_g = -65 + 1.88T + (8694 - 10.31T)$, $\beta = -1 + 0.083T + (21 - 0.13T)x$ 。

光子吸收率 A_e 与吸收层厚度 d 之间满足如下关系:

$$A_e = 1 - e^{-\alpha \cdot d} \quad (2)$$

对于中长双色材料中的中波层,通过增大吸收层厚度可以保证入射光子的充分吸收,从而降低器

件的光谱串音。图1所示为中波光子吸收率与吸收层厚度之间的关系。根据计算结果可知,当吸收层厚度达到6 μm以上时,综合吸收率超过93%。

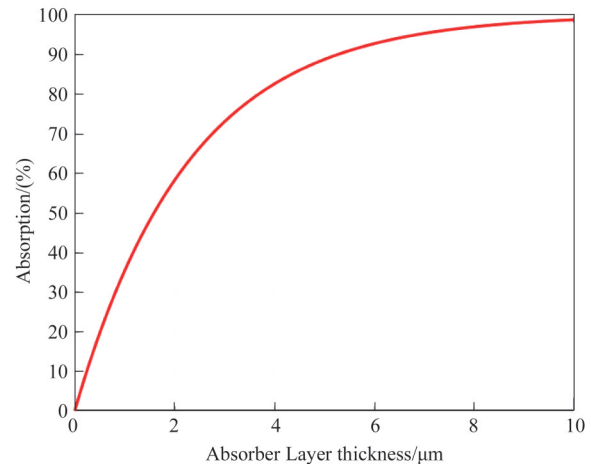


图1 中波光子吸收率与吸收层厚度的关系

Fig. 1 Relationship of medium wave photon absorptivity and absorption layer thickness

对于背照射器件,器件的量子效率 η 与吸收层厚度 L_h 之间满足如下关系:

$$\eta = \frac{L_h \alpha}{L_h^2 \alpha^2 - 1} \left[\frac{L_h \alpha - e^{-\alpha d} \cdot \sinh\left(\frac{d}{L_h}\right)}{\cosh\left(\frac{d}{L_h}\right)} - L_h \alpha \cdot e^{-\alpha d} \right] \quad (3)$$

计算可得中/长波双色器件量子效率与吸收层厚度之间的关系如图2所示。根据计算可知,长波层厚度在7~8 μm时既能保证光子充分吸收又能保证器件具备较高的量子效率。

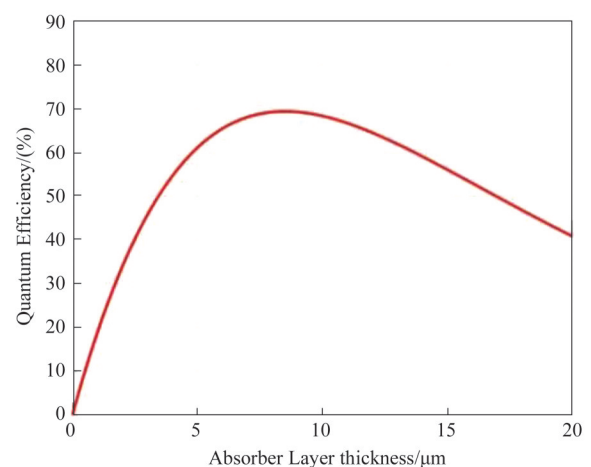


图2 长波量子效率与吸收厚度的关系

Fig. 2 Relationship of long wave quantum efficiency and absorption thickness

同时,为了防止中波光生载流子输运到长波层,需要在两个波段之间插入一定组分的阻挡层形成一个较高的势垒。势垒的高度设定需要保证高于工作温度下的热电子激发能。计算表明势垒层组分 $x \geq 0.36$ 时已经完全可以忽略中波光生载流子向长波层的输运,结合后续器件台面刻蚀、侧壁钝化等工艺实施考虑,长波层厚度和势垒层厚度设定分别为 $7.0 \sim 7.5 \mu\text{m}$ 和 $1.0 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 。

中/长波双色碲镉汞材料的生长基于 MBE 32P 分子束外延系统进行,采用 (211)B 碲镉汞衬底,衬底首先通过机械抛光、化学抛光与机械化学抛光工艺进行表面处理,然后采用钢粘结在钼盘上,并通过钼盘背部热电偶接触式测温的方法进行 PID 温度控制,实现高精度生长温度控制。衬底由装载腔室传入生长腔室,经高温脱氧后,在 180°C 左右进行中/长波双色碲镉汞薄膜生长,脱氧及生长过程根据 RHEED 线条的变化来监控。中/长波双色碲镉汞材料生长结束后,将采用金相显微镜、傅里叶变换光谱仪、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜等检测设备对薄膜进行表面宏观缺陷统计、红外透过测试、双晶迪摆曲线半峰宽 (FWHM) 测试及材料截面测量。中/长波双色碲镉汞材料生长过程研究及“燕尾”状缺陷研究可参见前期相关报道^[10-11]。

2 芯片制备工艺

2.1 中/长波双色像元结构设计

芯片像元设计是中/长波双色芯片制备的基础,本文在国内外中/长波双色碲镉汞材料结构基础上^[9,12-13],采用半平面中/长波双色像元结构实现双色芯片制备,单元剖面结构如图 3 所示。长波与中波 P 区公共引出电极位于芯片侧边,每个中/长波双色芯片像元是由两个同向 N-on-P 光电二极管组成,分别制备在中/长波双色碲镉汞材料的上层长波吸收层以及下层中波吸收层上,每个光电二极管都有一个金属引出电极,当红外辐射从背面入射到中/长波双色芯片后,波长较短的中波辐射被下层中波碲镉汞吸收层吸收,光生载流子扩散至下电极,转变为中波的电信号;剩余的红外辐射继续传输,波长较长的长波辐射被上层长波碲镉汞吸收层吸收,产生对应的光生载流子扩散至上电极,转变为长波段的电信号。基于该像元设计,中/长波双色芯片像元的上、下两个光电二极管能够分别响应长波与中波两个波段的红外辐射,该结构的优点是双色芯片的中波与长波两个波段可独立工作,同时响应中

波与长波信号且互不影响,达到同时积分、同时读出的效果,这对于实际应用是十分有利的。

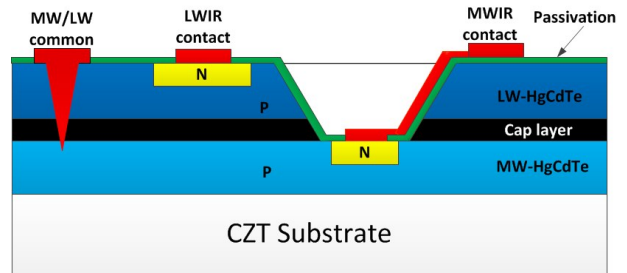


图3 中/长波双色芯片单元结构剖面

Fig. 3 Cross-section schematic of MW/LW two-band HgCdTe infrared detector

根据上述的中/长波双色芯片工艺路线,本文为实现中/长波双色芯片研制,对其中的关键工艺进行了针对性优化。为实现长波波段较高的量子效率,需要尽量提高长波像元占空比,减小长波层台面孔直径;但与之相反,为提高中波波段占空比,则需要尽量增大台面孔直径,进而保证较大的注入面积,这与长波波段占空比存在一定的矛盾,在双色像元设计中,一般要求台面孔直径应为像元间距的 $1/3 \sim 1/2$,此时长波波段占空比可达到 $75\% \sim 88.9\%$ 左右,而中波波段在扩散长度影响下,占空比最高可达到 90% 以上。

台面孔底部是经过刻蚀后露出的下层中波层区域,在此情况下,台面孔将被限制在一个非常狭小的面积,这对中波波段的 B^+ 离子注入工艺提出了非常严苛的要求,即当光刻对准工艺出现偏离时,将在阻挡层与长波层形成 N 型注入区,该区域与中波层的 N 区相连,能够同时收集中波波段与长波波段的响应信号,并形成电学串音。该注入区偏离现象产生的同时,将直接导致下中波层占空比的下降,从而降低中波波段的量子效率,因此,工艺过程中需要保证台面孔底部尽可能的大^[14]。综合上述两点可见,随着双色芯片像元间距的进一步减小,要求台面孔侧壁与水平面尽可能的垂直,但这又导致台面孔侧壁钝化膜制备工艺难度急剧增加,因此,中/长波双色像元结构设计时,需要优化台面孔上直径、下底面面积以及侧壁角度之间的关系,从而降低双色芯片制备加工难度。

2.2 双色芯片制备

为实现中/长波双色芯片制备,必须采用刻蚀工艺制备台面孔,贯穿上层长波层与中间的阻挡层,

使中波层处于可加工状态,然后利用 B^+ 离子注入工艺实现中波与长波PN结制备,再采用钝化工艺完成钝化膜沉积、金属沉积工艺制备爬坡电极实现中波电极引出、沉积铜工艺制备互连钢柱,最后经过划片、倒装焊接、背减薄等工艺完成双色芯片与双色读出电路互连,实现双电极中/长波双色器件芯片制备。

芯片制备过程中,最为关键的是台面孔刻蚀与表面钝化工艺。台面孔刻蚀过程中,由于碲镉汞材料存在损伤阈值小、缺陷密度大等特点,台面孔刻蚀过程中极易产生Hg-Te键断裂,导致材料受到损伤发生表面反型,在芯片像元表面处产生一个反向的寄生二极管,破坏芯片性能^[15]。因此,为保证双色芯片具备较好的器件性能,应减少刻蚀工艺对碲镉汞材料诱导产生的刻蚀损伤,碲镉汞材料刻蚀时需要满足超低损伤、较低工艺温度的前提下,达到较好的表面形貌、光洁度与深宽比。针对上述问题,本文采用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀设备,对刻蚀工艺的温度、气体配比、工作气压等参数进行了优化,保证芯片较好的表面光洁度、台阶陡直度以及均匀性。

表面钝化对于碲镉汞红外器件的性能具有很大影响,尤其是中/长波双色碲镉汞材料,表面效应很大程度上决定了碲镉汞红外焦平面探测器的性能,良好的钝化工艺可以有效地减小碲镉汞表面损伤、减少器件表面的界面态、降低器件表面漏电流、降低器件表面复合速度和 $1/f$ 噪声、提高探测器动态电阻和反向击穿电压,从而改善芯片性能^[15-16]。中/长波双色碲镉汞材料完成台面孔刻蚀后,由于台面孔侧壁与材料表面存在一定的角度,为实现较好的钝化膜覆盖效果,要求台面孔侧壁与材料表面的钝化膜厚度尽量一致,并保证较好的附着力与较高的阻抗。本文采用低温、低损伤CdTe/ZnS复合钝化膜沉积技术,提高钝化膜层沉积到台面孔侧壁的几率,保证台面孔侧壁钝化膜的均匀性与台阶覆盖性。

2.3 读出电路设计

该实验设计了一款适用于中/长波双色的 640×512 读出电路(Readout Integrated Circuit, ROIC)。两个波段的输入级均采用适用于中波与长波波段的直接注入(Direct Injection, DI)结构,输入级电路结构如图4所示。中波与长波波段间的信号串扰抑制是中/长波双色ROIC的设计重点之一,因此,为最

大程度降低两个波段间的信号串扰,保证两个波段探测器的性能最优化,采用单个波段积分电容独立设计,每个波段单独对应一路输入信号链路的设计方式。ROIC的工作模式为先积分后读出(Integration Then Readout, ITR)模式,两个波段的积分-读出方式为同时积分、同时读出,工作时序见图5。为满足不同波段信号对积分时间的差异需求,每个波段的积分时间单独可调,动态范围 ≥ 75 dB,帧频 ≥ 100 Hz,中波与长波电荷存储量总和达到 $47 Me^-$ 。

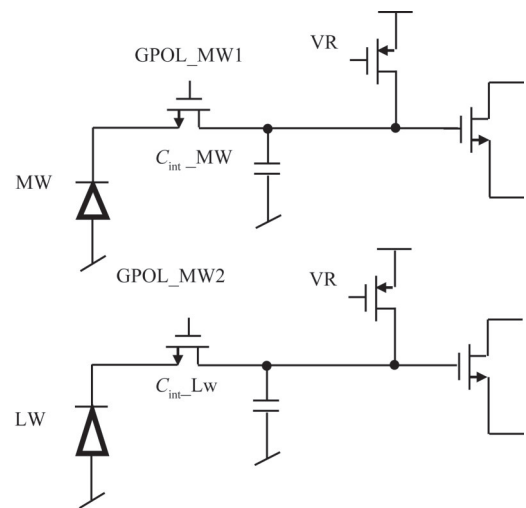


图4 双色读出电路输入级电路原理图

Fig. 4 Schematic of the input stage of the dual-band ROIC

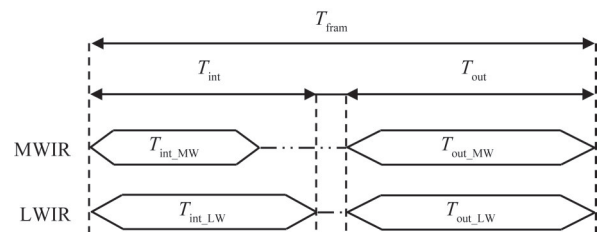


图5 积分-读出时序图

Fig. 5 Timing schedule of integration and readout

中/长波双色读出电路采用标准 $0.18 \mu m$ CMOS工艺进行加工,读出电路性能如表1所示。

3 结果与讨论

3.1 材料生长结果及表征

图6为中/长波双色碲镉汞材料解离面各个膜层厚度的SEM测试结果,其中,最下层为碲镉汞衬底层,向上分别为中波吸收层、高阻层与长波吸收层,其厚度分别为 $6.76 \mu m$ 、 $1.13 \mu m$ 与 $7.19 \mu m$,与材料设计要求完全匹配。

表 1 双色读出电路 77 K 下的性能参数

Table 1 The performance of the dual-band ROIC chip under 77 K

| 项目 | 技术指标 |
|------------------------|---------|
| 阵列规模 | 640×512 |
| 输入级电路 | 双 DI |
| 动态范围/dB | ≥75 dB |
| 最大读出速率/MHz | ≥10 |
| 工作模式 | ITR |
| 电荷存储能力/Me ⁻ | 47 |

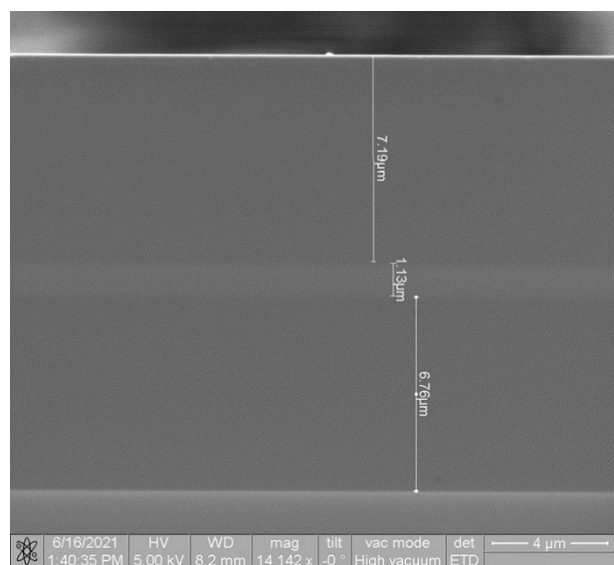


图 6 MBE 中长波双色碲镉汞薄膜 SEM 图像

Fig. 6 SEM characterization of MW/LW dual-band HgCdTe grown by MBE

利用金相显微镜观察材料的表面,放大倍数为 1 000 倍,并选取了 9 个视场对材料位错腐蚀坑 (EPD) 进行统计;材料表面形貌良好,交叉线 (cross-hatch) 明显,如图 7 所示;EPD 约为 $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 左右,如图 8 所示。同时对材料进行了 XRD 双晶衍射半峰宽 (FWHM) 测试和表面宏观缺陷密度 ($2 \sim 10 \mu\text{m}$) 统计, XRD 测试 FWHM 均值为 31.9 arcsec ,如图 9 所示;表面宏观缺陷密度统计分布约 773 cm^{-2} 。上述测试结果均表明中长双色材料具备了较好的晶体质量。

3.2 芯片制备结果

中/长波双色芯片台面刻蚀工艺主要通过对刻蚀温度、气体配比、工作压力、工作气压、刻蚀功率等工艺参数进行优化^[17-18],增大刻蚀偏压值提升离子对刻蚀残余物的物理轰击效果,提高 Ar、CH₄、H₂ 等工艺气体电离率,获得适合双色芯片所要求的高深宽比台面刻蚀工艺,保证较低的刻蚀损伤的同

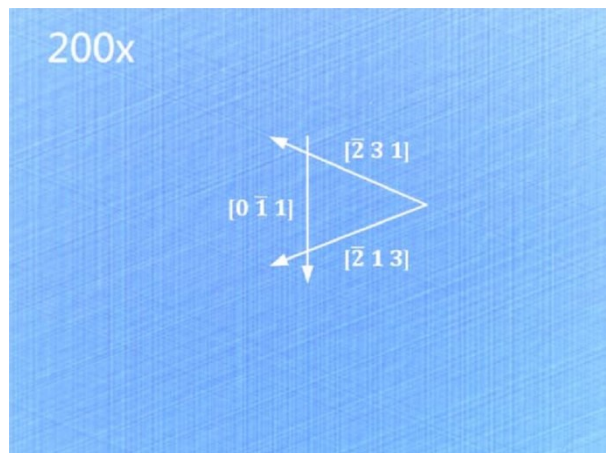


图 7 中/长波双色碲镉汞材料表面形貌相

Fig. 7 Surface morphology of MW/LW dual-band HgCdTe film



图 8 中波/长波双色碲镉汞材料 EPD 测试结果 (1000 倍)

Fig. 8 EPD of MW/LW dual-band HgCdTe film (1000 倍)

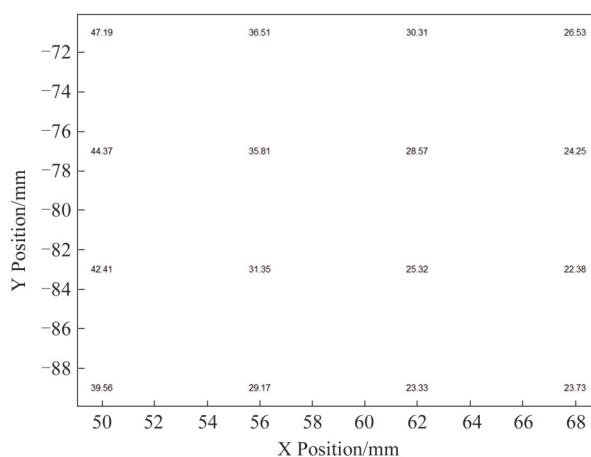


图 9 中/长波双色碲镉汞材料 XRD 测试结果

Fig. 9 XRD characterization results of MW/LW dual-band HgCdTe film

时,将吸收层中少子扩散长度与器件量子效率影响最小化。主要优化方法如下:

(1)降低基底温度

在刻蚀过程中,碲镉汞基底的温度会随着刻蚀时间的增加而升高,而碲镉汞材料本身对温度较为敏感,工作台面温度较高时,化学反应较快,刻蚀生成的反应物挥发速率小于沉积速率,容易造成刻蚀生成物的再次沉积,如图10(a)所示;工作台面温度较低时,化学反应较慢,刻蚀生成的反应物容易挥发,不容易造成生成物的再次沉积。因此,降低基底温度可有效控制刻蚀基与碲镉汞材料的反应速率、刻蚀生成物的挥发速度等,从而优化刻蚀的表面形貌与陡直度。

(2)优化工艺气体配比

调整Ar、CH₄、H₂等工艺气体配比,可有效提高刻蚀工艺对碲镉汞选择性,进而影响干法刻蚀的刻蚀速率、刻蚀的宽深比、刻蚀的表面粗糙度、刻蚀的选择比、均匀性等方面,当工艺气体配比不当时,极易形成沉积物,而合适的气体配比可有效消除深台面刻蚀工艺中产生的残留物与聚合物,典型的工艺气体配比失衡时的刻蚀效果见图10(b)所示。

(3)工作气压优化

不同气压大小关系到等离子体密度的高低以及离子运动的平均自由程,从而影响等离子体刻蚀生成物的挥发效果,最终影响刻蚀表面质量及侧壁陡直度,当腔体工作压力过高时,会有大量刻蚀生成物在解析后重新沉积在刻蚀表面,形成刻蚀沉积物,见图10(c);而合适的腔体压力将获得表面光滑、无刻蚀残余物的刻蚀效果。在双色台面芯片制备过程中,优化刻蚀工艺工作气压,可获得理想的侧壁角度,提高光敏元隔离沟槽和后续台面金属爬坡电极效果,降低盲元率。

(4)刻蚀功率优化

刻蚀功率参数直接决定台面刻蚀形貌,当刻蚀功率较大时,等离子体密度更高、能量更大,对碲镉汞材料的物理轰击作用较强,能够为基团和化学反应过程提供能量,此时获得的台面侧壁通常比较陡直、残余物较少,但对碲镉汞损伤较大、表面粗糙度不理想;当刻蚀功率较小时,物理轰击作用减弱,化学反应占主导,能够有效降低刻蚀损伤与表面粗糙度,但过小的刻蚀功率也容易引起刻蚀生成物的堆积,见图10(d)所示,此种情况与图10(a)刻蚀温度较高时的刻蚀效果类似。

台面刻蚀优化后,利用扫描电子显微镜(SEM)对台面刻蚀结果进行了测试。图10(e)为台面刻蚀工艺优化前后台面孔底部刻蚀效果图,图中可看出,工艺优化后可获得更加光滑、平整的底面,可满足中波波离子注入与欧姆接触孔制备对表面状态的要求。图10(f)为工艺优化后台面孔剖面图,图中可见,台面侧壁与底面光滑、无残余物,刻蚀深度达到8 μm以上,深宽比达到1:1以上,但仍存在表面粗糙度大,以及一定的台面退缩现象。针对上述问题,后期研究中将寻找更高选择比的掩膜方法^[19-20],以实现更加理想的台面刻蚀效果。

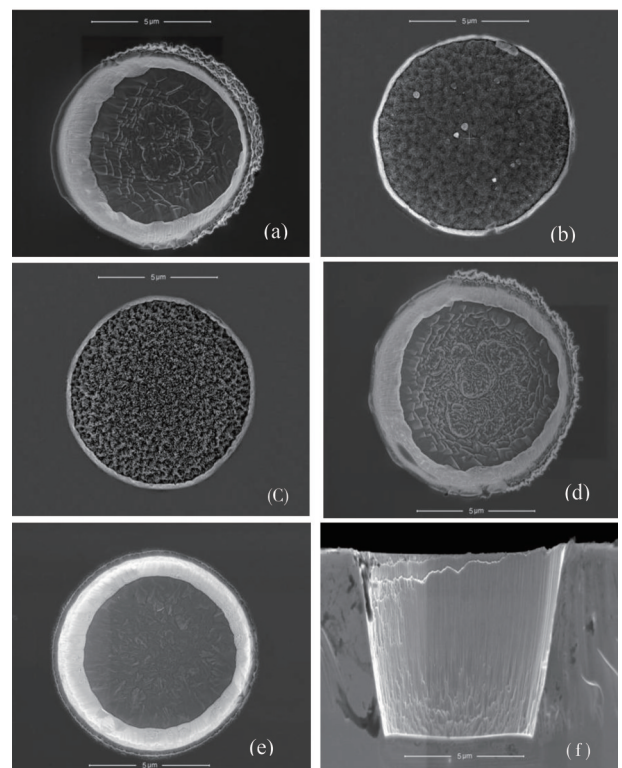


图10 台面刻蚀ICP刻蚀效果(a)高刻蚀温度,(b)工艺气体配比失衡,(c)高工作压力,(d)低刻蚀功率,(e)刻蚀工艺优化后,(f)台面刻蚀截面情况

Fig. 10 The ICP etching effect of the mesa-hole (a) high etching temperature, (b) the ratio of process gas is out of balance, (c) high etching pressure, (d) low etching power, (e) after improvement of the etching process, (f) cross-section schematic of the mesa-hole

图11是表面钝化后台面孔侧壁钝化膜效果,侧壁复合钝化膜层厚度分别为220 nm与241 nm。为评价台面侧壁钝化膜覆盖效果,定义侧壁覆盖率 η :

$$\eta = d/D \times 100\% \quad (4)$$

其中 d 为侧壁钝化膜厚度, D 为表面钝化膜厚度。

当表面钝化膜厚度 D 为 304 nm, 侧壁钝化膜厚度 d 约为 220.4 nm, 该芯片侧壁覆盖率 η 可达到 72.5%。

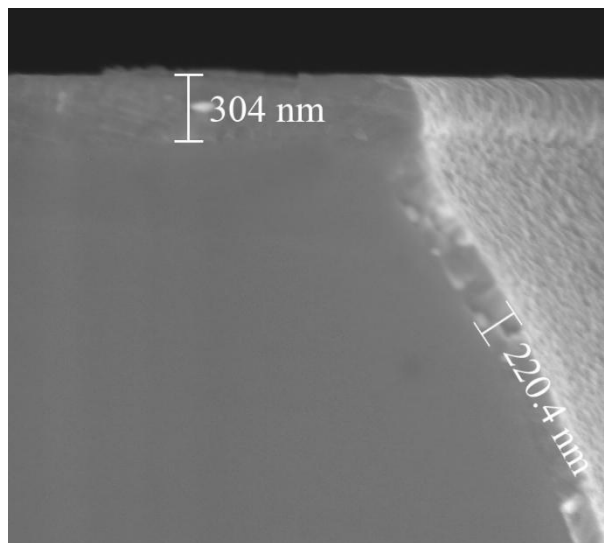


图 11 台面侧壁钝化效果

Fig. 11 Sidewall passivation effect of the mesa-hole

3.3 焦平面性能测试结果

将中/长波双色器件芯片封装进金属微杜瓦, 配接斯特林制冷机形成探测器组件, 降温至 77 K 后, 通过傅里叶光谱仪及焦平面测试系统测试了探测器组件光电性能。

图 12 是中/长波双色探测器组件光谱测试结果, 按照 50% 截止波长判定, 中波波段光谱响应范围为 3.6~5.0 μm , 长波波段光谱响应范围为 7.4~9.7 μm , 中波向长波的串音为 0.9%, 长波向中波的串音为 3.1%, 这主要得益于材料生长时较厚的中波层厚度、同时积分同时读出双色器件芯片结构, 以及低串音双色读出电路^[21]。

中/长波双色组件主要电学性能测试结果见表 2 所示。其中, 中波波段平均峰值探测率达到 $3.31 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, NETD 为 17.7 mK, 有效像元率达到 99.46%; 长波波段平均峰值探测率达到 $6.52 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, NETD 为 32.8 mK, 有效像元率达到 98.19%, 已具备较好的光电性能。

4 结论

基于 (211)B 碲锌镉衬底, 采用分子束外延生长制备了高质量 PPP 型中长双色碲镉汞材料, 材料表面宏观缺陷 (2~10 μm) 密度统计分布约 773 cm^{-2} , XRD 双晶衍射半峰宽 (FWHM) 约 31.9 arcsec, EPD

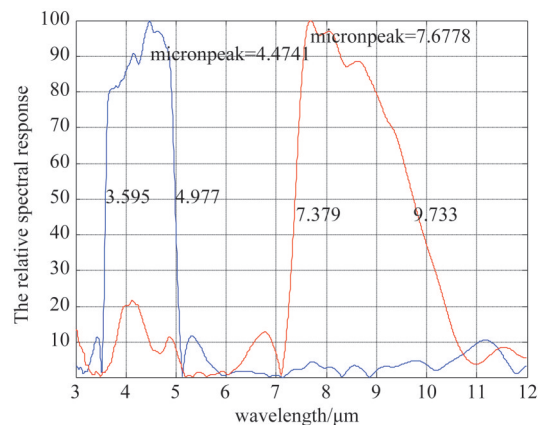


图 12 中波和长波相对光谱响应

Fig. 12 The relative spectral response between MW and LW

表 2 中长双色组件性能测试结果

Table 2 Test results of the MW/LW dual-band FPA

| 参数 | 平均峰值探测率 $/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W})$ | 响应率非 均匀性 | NETD/mK | 有效像 元率 |
|----|--|-------------|---------|-----------|
| 长波 | 6.52×10^{10} | 7.25% | 32.8 | 98.19% |
| 中波 | 3.31×10^{11} | 6.42% | 17.7 | 99.46% |

统计值约为 $5 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 左右。对双色器件芯片制备过程中的台面刻蚀、侧壁钝化等工艺进行了系统优化, 台面刻蚀深度达到 8 μm 以上, 深宽比达到 1:1 以上, 侧壁覆盖率达到 72.5%, 实现中/长波双色芯片制备。设计了中/长波双色读出电路, 其动态范围达到 75 dB 以上, 帧频为 100 Hz, 中波与长波电荷存储量总和达到 47 Me^- 。中长双色器件芯片与设计的中长双色读出电路通过倒装互连、杜瓦封装后, 形成中长双色红外焦平面组件, 组件测试结果表明, 中波波长响应范围为 3.6~5.0 μm , 长波波长响应范围为 7.4~9.7 μm , 中波向长波的串音为 0.9%, 长波向中波的串音为 3.1%, 中波平均峰值探测率达到 $3.31 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, NETD 为 17.7 mK; 长波平均峰值探测率达到 $6.52 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, NETD 为 32.8 mK; 中波有效像元率达到 99.46%, 长波有效像元率达到 98.19%, 初步实现中长红外焦平面双色探测器组件研制。

References

- [1] P. Martyniuk P. Kopytko M. Rogalski A. Barrier infrared detectors [J]. *Opto - Electronics Review*, 2014, 22 (2), 127-146.
- [2] YE Zhen-Hua, LI Hui-Hao, WANG Jin-Dong, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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趋势. *红外与毫米波学报*), 2022, 41(1)15-39.

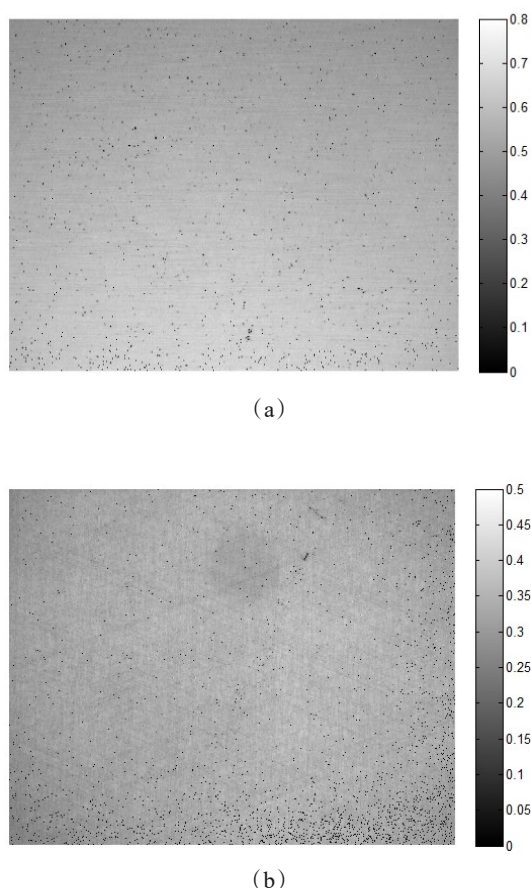


图 13 中长双色组件中测试结果(a)中波响应信号图,(b)长波响应信号图

Fig. 13 Test results of the MW/LW dual-bands HgCdTe FPA (a) response signal map of MW,(b) response signal map of LW

- [3] Rogalski A. New material systems for third generation infrared photodetectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2008, **16** (4):458-482.
- [4] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes [J]. *Proc. of SPIE*, 2019, **11151**:1115114.
- [5] Wilson J A, Patten B A, Chapman G, et al. Integrated Two-Color Detection for Advanced FPA Applications [J]. *Proc. of SPIE*, 1994, **2274**:117-125.
- [6] Abbott P, Pillans L, Knowles P, et al. Advances in Dual-Band IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7660**:766035.
- [7] King D F, Graham J S, Kennedy A M, et al. 3rd-generation MW/LWIR sensor engine for advanced tactical systems [C]. *Proc. of SPIE*, 2008, **6940**:69402R.
- [8] Vilela M F, Olsson K R, Norton E M, et al. High-Performance M/LWIR dual-band HgCdTe/Si focal-plane arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42** (11) 3231-3238.
- [9] Reibel Y, Chabuel F, Vaz C, et al. Infrared Dual Band detectors for next generation [J]. *Proc. of SPIE*, 2011, **8012**:801238.
- [10] YANG Jin, KONG Jin-Cheng, YU Jian-Yun, et al. The 'swallow-tailed defect' in MBE HgCdTe film [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨晋, 孔金丞, 俞见云, 等. 分子束外延碲镉汞薄膜“燕尾”状缺陷. *红外与毫米波学报*), 2020, **39**(6)690-695.
- [11] YANG Chun-Zhang, QIN Gang, LI Yan-Hui, et al. Research on growth of M/L-wavelength dual-band IR-MCT on CZT substrate by MBE [J]. *Infrared Technology* (杨春章, 覃钢, 李艳辉, 等. 碲镉汞衬底上中长双色红碲镉汞分子束外延生长研究. *红外技术*), 2018, **40**(1)1-5.
- [12] YE Zhen-Hua, YIN Wen-Ting, HUANG Jian, et al. 128×128 SW/MW Two-color HgCdTe IRFPAs [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华, 尹文婷, 黄建, 等. 128×128 短波/中波双色红外焦平面探测器. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(6)415-418.
- [13] WANG Jing-Wei, JIN Shun-Guo, CHEN Hui-Qing, et al. Research on SW/MW dual-band MCT focal plane arrays [J]. *Laser & Infrared* (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. *激光与红外*), 2018, **48**(11)1395-1398.
- [14] Chen Y Y, Ye Z H, Zhang P, et al. A barrier structure optimization for widening processing window in dual-band HgCdTe IRFPAs detectors [J]. *Opt Quant Electron*, 2016, **48**:294.
- [15] HE Li, YANG Ding-Jiang, NI Guo-Qiang, et al. *Introduction to advanced focal plane arrays* [M]. National Defense Industry Press (何力, 杨定江, 倪国强, 等. *先进焦平面技术导论*), 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [16] HAN Fu-Zhong, GENG Song, SHI Qi, et al. Passivation technology of composite film on the HgCdTe IRFPA [J]. *Infrared Technology* (韩福忠, 耿松, 史琪, 等. 碲镉汞红外焦平面器件表面复合膜层钝化技术. *红外技术*) 2015, **37**(10): 864-867.
- [17] Liu L F, Chen Y Y, Ye Z H, et al. A review on plasma-etch-process induced damage of HgCdTe [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **90**:175-185.
- [18] Liu L F, Chen Y Y, Ye Z H, et al. Inductively coupled plasma-induced electrical damage on HgCdTe etched surface at cryogenic temperatures [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2018, **47**(10):5759-5762.
- [19] Ye Z H, Hu W D, Lei W, et al. Investigations on a multiple mask technique to depress processing-induced damage of ICP-etched HgCdTe trenches [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11):3164-3167.
- [20] Chen Y Y, Ye Z H, Sun C H, et al. Dry etched SiO2 mask for HgCdTe etching process [J]. *Journal of Electronic Materials*. 2016, **45**(9):4705-4710.
- [21] ZHAO Jun, MAO Jing-Xiang, LI Yan-Hui, et al. Analysis on the relative spectral crosstalk of dual-band IRFPA detector [J]. *Infrared Technology* (赵俊, 毛京湘, 李艳, 等. 双色焦平面红外探测器相对光谱串音研究. *红外技术*) 2014, **36**(4):286-289.