

Si 基中短波双色 HgCdTe 材料生长及表征

高达,王经纬,王丛
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:报道了碲镉汞(MCT)分子束外延(MBE)的最新研究进展。基于现有 Si 基中波、短波 HgCdTe 材料工艺基础,开发获得了 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料的生长工艺。使用反射式高能电子衍射分析在线监测生长过程,优化了 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料生长工艺。获得了具有良好晶体质量的 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料。

关键词:Si 基 HgCdTe; 中短波双色; 材料技术

中图分类号:TN213 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.05.012

Growth and characterization of SW/MW dual band HgCdTe film on Si substrate

GAO Da, WANG Jing-wei, WANG Cong
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015)

Abstract:The recent research progress on molecular beam epitaxy growth of HgCdTe on Si substrate is reported. Based on the fabrication technology of MW HgCdTe and SW HgCdTe on Si substrate, the fabrication technology of molecular beam epitaxy growth of SW/MW-HgCdTe on Si based substrate was developed. Through on-line monitoring of RHEED, the fabrication technology for SW/MW-HgCdTe growth on Si substrate was optimized. With this technology, high quality SW/MW-HgCdTe wafers were obtained.

Key words:Si based HgCdTe; SW/MW dual band; material technology

1 引言

在现代战场上,红外成像系统在越来越多的武器系统中得到了应用。随着红外探测技术的不断发展,红外隐身技术也在不断提高,通过使在特定波段上目标与环境背景具有相似的发射率,从而导致红外目标对比度的下降,难以识别。地球大气中的红外辐射窗口有 1~2.5 μm , 3~5 μm 和 8~14 μm 三个波段,若一个热成像系统能在多波段对目标和环境的辐射特征进行同时探测,通过对比不同辐射波长下的辐射特征,就可以对复杂的背景进行抑制,实现红外探测不受环境的制约,准确地提取目标特征,

提高对目标的探测效果,显著提高红外探测器在多种武器平台和复杂背景中的应用性。采用 Si 基作为衬底外延 HgCdTe 薄膜是获得双色探测器材料的一个重要途径,成为制备大规模 HgCdTe 红外双色焦平面阵列的研究重点之一。

Si 基双色 HgCdTe 材料具有多层结构,通过不同层 HgCdTe 材料组分的变化,达到探测不同波段红外信号的目的。为了获得高质量的 Si 基双色 HgCdTe 材料,需要找到适合的生长条件生长不同组分 HgCdTe 材料。这是获得高质量 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料的难点所在。本实验室已经完成了 Si

基中波、短波 HgCdTe 材料工艺的开发, Si 基中波 HgCdTe 材料、器件性能达到了国内先进水平^[1]。

本文报道了在 3 英寸 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料工艺的开发方面的最新研究进展。通过双色 HgCdTe 材料参数的设计、双色 HgCdTe 材料生长工艺的确定, 成功制备出高质量 3 英寸 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料。

2 实验

实验所用设备为芬兰 DCA P600 分子束外延系统, 系统配有 CdTe 源、Te 源和阀控 Hg 源, 所用 CdTe/Si 复合衬底为本实验室生长^[2], 如图 1 所示。

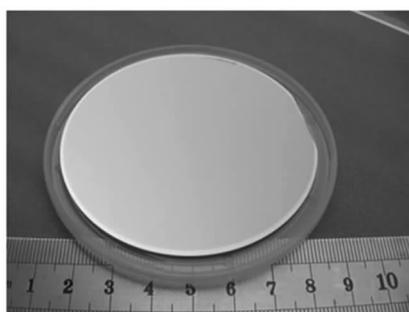


图 1 生长后的 CdTe/Si 复合衬底照片

Fig. 1 Photograph of CdTe/Si composite substrate

CdTe 复合衬底在装入 MBE 系统进行 HgCdTe 生长前, 先使用 0.5% 的溴甲醇腐蚀 20 s, 然后使用大量甲醇冲洗, 最后使用高纯氮气吹干后装入设备; 衬底在 Loadlock 中 180 °C 除气 3 h 后即可使用。生长过程中使用 RHEED 对生长表面进行实时监控样品表面温度监控使用高温计, 通过这两种在线测试方法可以即时的调整和优化生长参数; 组分控制是在考虑粘附系数修正的情况下, 依据公式(1)来调整 HgCdTe 薄膜中 Cd 的组分。

$$x = \frac{BEP_{CdTe}}{BEP_{Te} + BEP_{CdTe}} \quad (1)$$

对材料组分及厚度的测试使用傅里叶红外透射光谱仪 (FTIR); 使用 XRD 测量材料的半峰宽 (FWHM); HgCdTe 位错密度的测量选用 Chen 位错腐蚀剂; 位错腐蚀坑的观察、计算和对 HgCdTe 材料表面形貌观察分别采用了扫描电子显微镜 (SEM) 和光学显微镜。

3 材料生长工艺设计及表征

3.1 双色 HgCdTe 材料结构设计

遵循技术一致性原则, 双色 HgCdTe 材料结构的工艺路线需要基于现有单色平面器件工艺技术。

本实验室准平面结构的双色 HgCdTe 材料结构。其结构图如图 2 所示。在复合衬底上依次生长短波吸收层、阻挡层和中波吸收层。通过深洞刻蚀使像元像是两个标准像元的简单叠印, 这使得整个工艺的实现和控制更熟悉, 更容易。

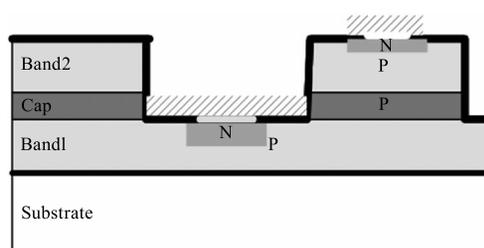


图 2 双色 HgCdTe 材料结构示意图

Fig. 2 The schematic of dual band HgCdTe heterostructure

根据 Hansen-Schmidt 公式, 可从理论上求得截止波长 λ_c 与组分和温度的关系为:

$$\lambda_c = [-0.244 + 1.556x + 4.31 \times 10^{-4}T(1 - 2x) - 0.65x^2 + 0.671x^3]^{-1} (\mu\text{m}) \quad (2)$$

此次设计的双色 HgCdTe 材料吸收波段在中波 4.5 ~ 5 μm 、短波 2.8 ~ 3.0 μm , 根据 Hansen-Schmidt 公式, 在 77 K 工作温度下, 对应的 HgCdTe 组分分别为中波 0.303 ~ 0.321, 短波 0.399 ~ 0.416。

准平面双色结构利用多层外延技术, 通过刻蚀, 以并列的方式构成独立的两个不同响应波段的 pn 结。为了防止不同吸收层的光生载流子扩散到另一吸收层, 避免形成波段之间的串音, 在两个吸收层之间生长一层高组分的阻挡层。图 3 给出了阻挡层的能带结构阻挡少子漂移的示意图。设计阻挡层组分为 0.45 ~ 0.5, 厚度为 $(1 \pm 0.2) \mu\text{m}$ 。

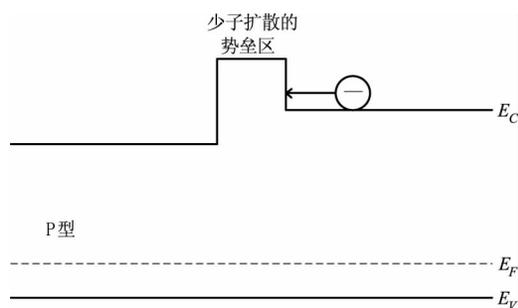


图 3 阻挡层对少子漂移阻挡作用的示意图

Fig. 3 Energy band of the Band

3.2 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料生长工艺参数设定

HgCdTe 材料生长工艺参数设定主要包括生长

温度设定、Hg/Te 比设定、CdTe/Te 比设定。CdTe/Te 比设定决定了所生长的 HgCdTe 组分,使用公式(1)可以获得需要的 HgCdTe 组分。Hg/Te 比和生长温度都直接决定了 HgCdTe 材料的生长质量,由于 Hg 的粘附系数受温度影响,所以二者在一定程度内是相关的。为了减少生长不同组分 HgCdTe 材料过程中需要改变的参数,降低工艺难度,试验中选择生长温度作为变量,通过温度的变化来影响 Hg/Te 比。因此,在生长不同 HgCdTe 材料过程中需要确定的参数主要有 CdTe/Te 比和温度。其中不同组分所需要的 CdTe/Te 比在校正束流过程中获得,而双色 HgCdTe 最优的生长温度需要在试验中探索。

HgCdTe 的生长温度是指 HgCdTe 生长表面的温度,分子束外延设备采用热辐射的方法在衬底材料的背面对其进行加热,热偶在同侧采用非接触的方式测温。由于不同组分碲镉汞对于红外波段的吸收不同,在同样的设定温度下材料表面的温度会有较大差异。所以,在复合衬底上生长短波 HgCdTe 材料和在生长阻挡层后继续生长中波吸收层时,因为后者对于红外波段的吸收强于前者,所以生长温度需要随着生长进行降低,直至达到一个可以红外波段稳定吸收的临界厚度。于此同时,不同组分 HgCdTe 最优生长温度不同,组分越大最优生长温度越小,因此在外延过程中温度控制曲线需要综合考虑不同组分 HgCdTe 最优生长温度差异和各组分 HgCdTe 生长到临界厚度之前的温度曲线。这是中短波双色 HgCdTe 材料工艺中的难点所在。

中短波双色 HgCdTe 材料首先在复合衬底上生长短波吸收层,所以需要先确定短波吸收层的生长温度及降温曲线。在 Si 基复合衬底上生长短波 HgCdTe 材料的工艺在前期试验中已经突破,获得了表面光亮、均匀,缺陷密度小于 3000 cm^{-2} 的 Si 基短波 HgCdTe 材料^[3]。短波吸收层的生长工艺与 Si 基短波 HgCdTe 材料工艺相同,直接在 Si 基复合衬底上生长 HgCdTe 短波吸收层。

短波层生长完成后,继续生长阻挡层。试验中通过改变 CdTe 束流来调节 HgCdTe 组分。在生长前,已经校正好生长不同组分 HgCdTe 所需要的 Te、CdTe、Hg 束流。为了保证双色 HgCdTe 材料生长的连续性和界面的突变性,采用双 CdTe 源模式

进行生长。由于阻挡层组分大于短波层,热吸收能力小于短波吸收层,生长变化时可以只考虑不同组分生长温度差异引入的温度变化。以短波 HgCdTe 材料生长温度为基础,逐渐提高生长温度,通过对比 RHEED 图像,可以确定合适的阻挡层生长温度。如图 4 所示,温度提升 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 以后生长质量有明显改善。图 4(a)、(b)、(c)、(d) 依次增加 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

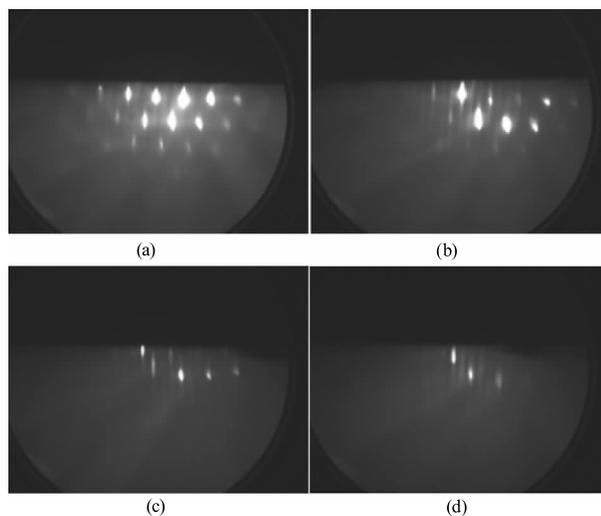


图 4 不同温度生长阻挡层 RHEED 图

Fig. 4 RHEED photograph of the Band with different growth temperature

阻挡层生长完成后,切换束流调整过的 CdTe 源继续生长中波吸收层。前面提到,在阻挡层基础上生长中波吸收层在生长初期阶段生长温度需要一个逐渐降低的过程,来保证生长表面温度稳定。实验室在 Si 基中波 HgCdTe 材料工艺及优化方面已经拥有比较好的基础^[4],中波 HgCdTe 材料工艺中的生长截止温度和临界厚度适用于中波吸收层生长的生长过程中。不同的是,中波吸收层生长温度起始于阻挡层的生长温度。综合考虑中波吸收层生长起始温度、临界厚度与生长速率、生长截止温度,获得了中波吸收层前期的生长温度曲线。

综合上述分析和实验结果,获得的中短波双色 HgCdTe 材料生长温度控制曲线如图 5 所示。基于该生长温度曲线不同生长阶段后期的 RHEED 衍射图样如图 6 所示。通过 RHEED 图像可以看出材料质量还有一定的优化空间,但可以认为已经获得了晶体质量良好的中短波双色 HgCdTe 材料。

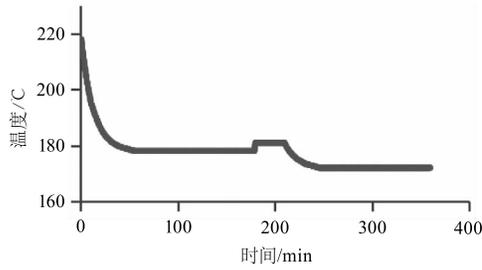


图5 中短波双色 HgCdTe 材料生长温度控制曲线
Fig. 5 The temperature-controlling figure profile of dual band HgCdTe

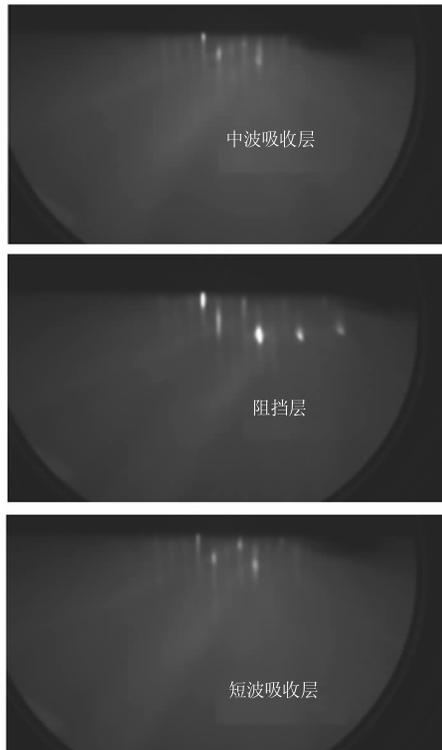
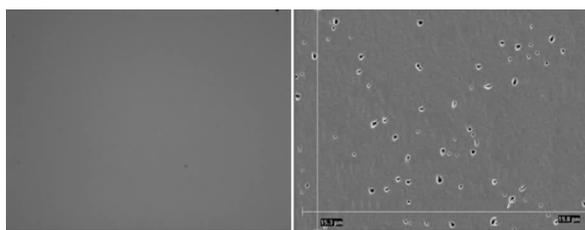


图6 不同生长阶段后期的 RHEED 衍射图样
Fig. 6 RHEED photograph of different layers

4 材料结果

以高质量的中波、短波 HgCdTe 材料工艺为基础,并综合考虑到不同组分生长参数的差异,我们外延得到了较高质量的 3 in Si 基中短波双色 HgCdTe 材料。Si 基双色 HgCdTe 材料晶体质量良好,双晶衍射半峰宽为 107arcsec,材料表面缺陷为 2172 cm^{-2} ,位错密度为 $2.11 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$,如图 7 所示。



(a) 光学显微镜下缺陷分布 (b) 扫描电镜下位错分布

图7 缺陷及位错统计

Fig. 7 Photograph of defect and EPD

HgCdTe 的组分测试通常使用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR),由于 FTIR 在多层膜 HgCdTe 结构测试中干涉信号大部分被低组分吸收,测试中截止波长反馈出来的信息是中波层的信息。而 Si 基双色 HgCdTe 材料中短波层和阻挡层的组分需要通过模拟软件分析傅里叶变换红外光谱获得。图 8 为 Si 基双色 HgCdTe 材料傅里叶变换红外光谱分析结果。可以得出组分信息。Si 基中/短波双色 HgCdTe 材料中波层组分为 0.317,短波层的组分和阻挡层组分分别为 0.399 和 0.475。

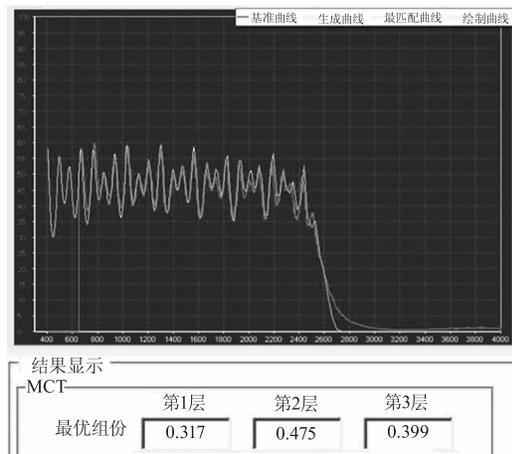


图8 傅里叶变换红外光谱模拟

Fig. 8 FTIR data simulation

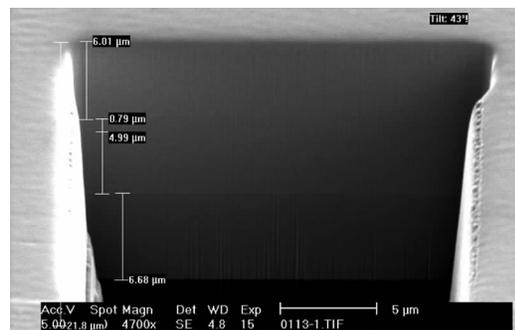


图9 SEM 截面图

Fig. 9 SEM profile of dual band HgCdTe

为了更直观的观察 Si 基双色 HgCdTe 材料结构,使用聚焦离子束刻蚀 HgCdTe 材料,获得材料的截面信息,通过使用 SEM 对材料截面的分析,如图 9 所示,我们得到中/短波双色 HgCdTe 材料中波层 $6.01 \mu\text{m}$,阻挡层 $0.79 \mu\text{m}$,短波层 $4.99 \mu\text{m}$ 。

5 结论

以已有的 Si 基中波、短波 HgCdTe 材料工艺为

基础,再综合考虑到不同组分层的生长温度曲线,Si基中/短波双色 HgCdTe 材料获得了预期的材料参数和较好的晶体质量。通过对该材料材料的参数、性能进行测试表征,表明 Si 基中短波双色 HgCdTe 材料取得了工艺上的突破。

致谢:感谢刘铭、折伟林、晋舜国、沈宝玉等同事在论文的完成期间给予的帮助。

参考文献:

- [1] GONG Feng, ZHOU Liqing, WANG Jingwei, et al. Research on molecular beam epitaxy growth HgCdTe film on 3 in Si based substrate [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42 (7): 781 - 785. (in Chinese)
巩 锋,周立庆,王经纬,等. 3 英寸 Si 基碲镉汞分子束外延工艺研究 [J]. *激光与红外*, 2012, 42 (7): 781 - 785.
- [2] ZHOU Liqing, LIU Ming, GONG Feng, et al. Study on MBE CdTe layer on 3 inch silicon substrate [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41 (5): 537 - 541. (in Chinese)
周立庆,刘铭,巩锋,等. 3 英寸 CdTe/Si 复合衬底外延技术研究 [J]. *激光与红外*, 2011, 41 (5): 537 - 541.
- [3] WANG Jingwei, GAO Da. Research on short-wavelength HgCdTe film growth on silicon composite substrate by molecular beam epitaxy growth [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45 (6): 646 - 649. (in Chinese)
王经纬,高达. Si 基短波碲镉汞材料分子束外延生长研究 [J]. *激光与红外*, 2015, 45 (6): 646 - 649.
- [4] WANG Jingwei, GONG Feng, LIU Ming, et al. Optimized research on molecular beam epitaxy growth HgCdTe film on Si substrate [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42 (10): 1161 - 1164. (in Chinese)
王经纬,巩锋,刘铭,等. Si 基碲镉汞分子束外延工艺优化研究 [J]. *激光与红外*, 2012, 42 (10): 1161 - 1164.