

文章编号:1001-5078(2015)06-0646-04

· 红外材料与器件 ·

Si 基短波碲镉汞材料分子束外延生长研究

王经纬, 高 达

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:报道了在中波工艺基础上, Si 基碲镉汞分子束外延短波工艺的最新研究进展, 通过温度标定、使用反射式高能电子衍射、高温计的在线测量和现有的中波 Si 基碲镉汞温度控制曲线建立及优化了 Si 基碲镉汞短波材料的生长温度控制曲线; 获得的 Si 基短波 HgCdTe 材料表面光亮、均匀, 表面缺陷密度小于 3000 cm^{-2} ; 基于此技术成功制备出了 Si 基短/中波双色材料。

关键词:硅基碲镉汞; 分子束外延; 短波碲镉汞外延; 短/中波双色碲镉汞

中图分类号: TN213 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.06.010

Research on short-wavelength HgCdTe film growth on silicon composite substrate by molecular beam epitaxy growth

WANG Jing-wei, GAO Da

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

Abstract: Based on the fabrication technology of MW HgCdTe, the recent research progress on molecular beam epitaxy growth of SW-HgCdTe on Si composite substrate is reported. Through the original temperature calibration, the use of in-situ measurements such as RHEED and pyrometry, the temperature-controlling figure profile of MW-MCT, a customized temperature-controlling figure profile for SW-MCT was built and optimized. The defects density of optimized Si based SW-HgCdTe is less than 3000 cm^{-2} and the surface is smooth and uniform. SW/MW dual-band HgCdTe has been also fabricated based on this technology.

Key words: Si based HgCdTe; MBE; SW-HgCdTe; SW/MW dual-band HgCdTe

1 引 言

硅基碲镉汞焦平面器件因为其更大的可用面积、更低的材料成本、与 Si 读出电路的热应力自动匹配、较高的机械强度和平整度、更高的热导率以及潜在的可以实现单片式 IRFPA 等优点, 近些年受到国内外的广泛关注和研究^[1-6]。尽管 Si 衬底材料与碲镉汞高达 19.3% 的晶格失配导致 Si 基材料的位错密度相对更高, 但 Si 基短、中波探测器已经被证明完全可以取代碲锌镉基材料。

在 Si 基碲镉汞材料的制备过程中主要存在两个

难题: ①巨大的晶格失配; ②高精度的温度控制。由于使用 Si 基复合衬底与背面的热偶是非接触的, 且 CdTe 和 HgCdTe 表面的发射率存在较大的差异, 因此在生长的初始阶段由于表面发射率的变化导致样品表面的温度会产生变化, 这个温度的变化远远超出了 HgCdTe 的生长窗口, 这就需要合适的生长温度控制曲线来补偿生长表面温度的变化^[2]。对于以上两个难点, 尽管在中波波段已经能够较好的解决, 然而对于 Si 基碲镉汞的一个重要应用—Si 基短波大面阵及 Si 基中/短波双色探测器, 由于短、中波材料生长条件

的较大差异性还没有较好的解决。

本文报道了在 Si 基复合衬底、Si 基中波碲镉汞工艺的基础上,通过既有数据分析、生长温度曲线优化等方法,成功的获得了高质量的 3 in 短波碲镉汞薄膜材料,并对其进行了表征。在此基础上制备出了短/中波双色材料并简单进行了表征。

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;所用复合衬底为我们自己生长^[1],如图 1 所示。

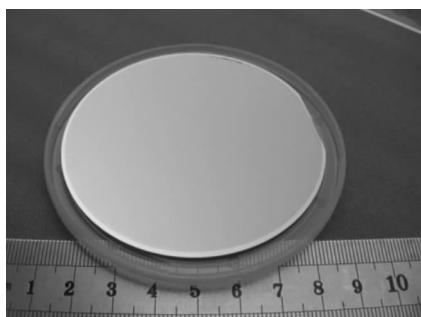


图1 生长后的 CdTe/Si 复合衬底照片

复合衬底在装入系统进行生长前,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;衬底在预处理室中 180 °C 除气 3 h 后即可使用。样品表面温度监控使用高温计,生长过程中使用 RHEED 对生长表面进行实时监控,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:

$$x = \frac{\text{BEP}_{\text{CdTe}}}{\text{BEP}_{\text{Te}} + \text{BEP}_{\text{CdTe}}} \quad (1)$$

来调整 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 薄膜中 Cd 的组分。

使用 XRD 测量材料的双晶摇摆曲线,采用 $\text{Cu}_{\text{K}\alpha 1}$ 特征谱线,单色器采用四个 Ge(220) 晶体;对材料组分及厚度的测试使用傅里叶红外透射光谱仪; HgCdTe 位错密度的测量选用 Chen 位错腐蚀剂^[2],腐蚀时间约 30 s;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)和普通的光学显微镜。

3 短波生长工艺参数的确定及材料表征

3.1 生长工艺参数的确定

同中波生长相比,Si 基短波碲镉汞材料的生长差异主要在:①温度控制曲线的设定;②不同的 Hg/Te 比;③不同的 CdTe/Te 束流比。其中第三点可以通过

设计的组分值,使用公式(1)计算并修正得到较为准确的值;难点在于由二者材料性质不同导致的生长温度的差异,而 Hg/Te 比在一定的范围内和温度的设定是相关的,通常在 80 ~ 130 之间。对于不同组分的碲镉汞的生长,可调整参数通常有四个:衬底温度(影响衬底表面原子迁移、成核及各原子尤其是 Hg 原子的粘附系数)、Hg 流量、Te 束流和 CdTe 束流;由于各个参数调整的相关性不是零,增大了工艺的难度。基于中波工艺基础,在短波材料的生长过程中我们选择同样的 Te 束流并依据此设定 CdTe 束流;同时选择温度作为自变量,通过温度的调整影响 Hg 原子粘附系数进而影响 Hg/Te 比。

3.1.1 初始生长温度的确定

短波和中波材料根据组分的不同,其最优生长温度存在 2 ~ 5 °C 的差异;同时二者在成核过程中吸放热也存在差异,同样需要在设定温度曲线时候考虑进去。综合二者、结合前期实验结果,短、中波材料的生长温度控制曲线差别可以确定在 5 ~ 10 °C。

3.1.2 稳定生长时温度的确定

稳定生长阶段是指当碲镉汞材料的厚度达到一定值以后,在一定的设定温度下,表面温度不再随着薄膜厚度的增厚而上升的阶段,即薄膜达到此厚度后可将特定波长(能量)范围内的光全部吸收。

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,因此,如果材料对热辐射的吸收能力不同,同样的设定温度下,衬底材料表面的温度并不相同。碲镉汞短波及中波材料由于其二者对于红外光的吸收不同,如图所示,在同样的设定温度下衬底表面的温度会有较大差异。

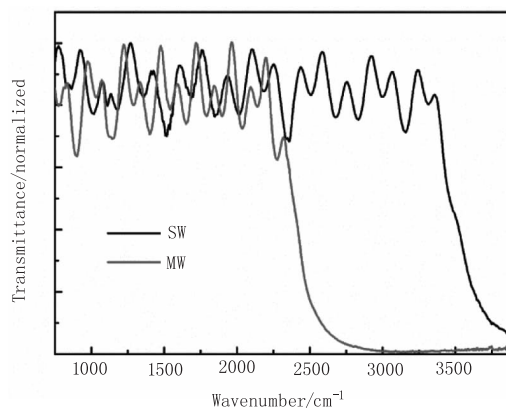


图2 短波、中波透过曲线对比

同生长最初阶段不同,随着薄膜厚度的增加,

应该更多的考虑进这种差异,直到达到临界厚度。由此可知:①在达到这一临界厚度前,短波、中波碲镉汞材料生长过程中的温度控制曲线间的差异是在逐渐增大的;②到达临界厚度后温度设定即达到稳定值;③同初始生长阶段相比,稳定生长时短、中波的温度设定值的差异要更大。

需要注意的是,由于同样原因,对于短/中波双色材料,在结束高组分阻挡层外延后的中波外延初始阶段,在设定温度相同的情况下,材料表面温度会因为吸收更多的热辐射而升高,这个过程和 Si 基复合衬底进行中波碲镉汞材料生长类似;而同时中波材料的最优生长温度又要低于短波材料 $2 \sim 5^{\circ}\text{C}$,因此在外延过程中温度控制曲线的设定需要将上述因素全部考虑在内。

基于已有实验结果及上述分析,拟合获得的短波材料温度控制曲线如图 3 所示;基于该生长控制曲线的材料生长结束前 RHEED 衍射图样如图 4 所示,从图中可以看出尽管材料质量仍有一定的优化空间,但可以认为已经突破了该项工艺。

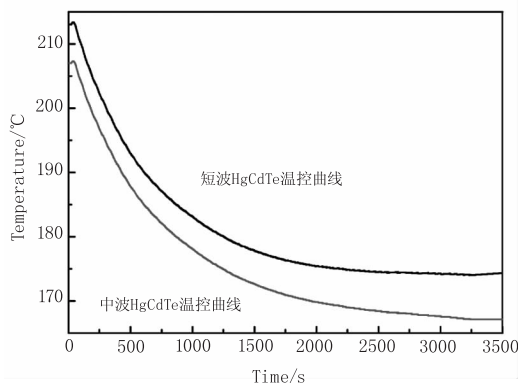


图3 短波、中波生长温控曲线对比

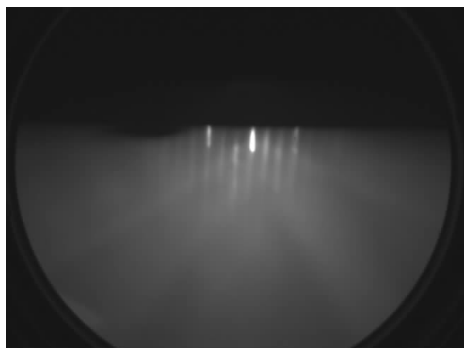
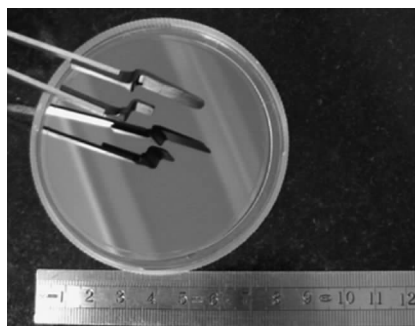


图4 生长结束前短波材料 RHEED 衍射图

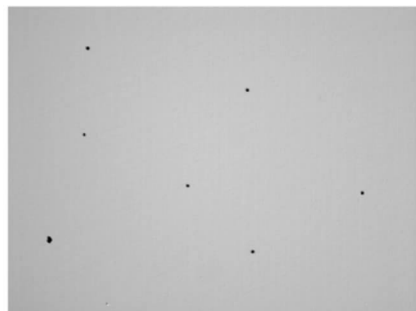
3.2 短波材料的表征

通过傅里叶红外光谱仪测得短波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

材料组分为 0.4009,截止波长为 $3.09 \mu\text{m}$,厚度为 $9.018 \mu\text{m}$ 条件下双晶衍射半峰宽为 107.6 arcsec 。材料表面照片及 $200\times$ 下显微镜照片如图 5 所示,可以看出碲镉汞薄膜表面光亮、均匀,没有宏观缺陷团,在该放大倍数下 $2 \mu\text{m}$ 以上缺陷密度为 3000 cm^{-2} 以下。



(a) 短波HgCdTe材料表面照片



(b) 200X下显微镜照片

图5 3英寸短波 HgCdTe 材料表面及显微镜照片

3.3 短/中波双色材料的生长及表征

以高质量短波 HgCdTe 材料外延技术为基础,我们外延了短/中波双色材料,材料的结构示意图如图 6 所示。在生长条件没有经过优化的条件下材料表面缺陷密度小于 5000 cm^{-2} ,并且表面没有明显宏观缺陷。由分子束外延的生长原理可知,获得的短波碲镉汞材料综合质量良好。

中波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 吸收层, $x=0.3$
短波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 阻挡层, $x=0.5$
短波 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 吸收层, $x=0.4$
Si 基复合衬底

图6 Si基短/中波材料结构示意图

使用傅里叶红外透射测试并经过软件拟合,我们测得中波吸收层的组分为 0.31,厚度 $6 \mu\text{m}$,短波吸收层组分为 0.40,厚度约 $5.02 \mu\text{m}$ 。

为了更全面的表征短/中波双色材料,使用俄歇电子能谱对样品其进行了截面扫描测试,并通过扫描电子显微镜观察了经过 FIB 处理后的截面。图 7 中可

见,各层之间的界面明显,厚度与软件模拟结果一致。

4 结 论

在 Si 基中波工艺的基础上,通过温度标定、数据分析、实验分析等方法,获得并优化了 Si 基短波碲镉汞的生长条件,获得了高质量的短波碲镉汞材料,材料的缺陷密度小于 3000 cm^{-2} ;以此为基础实现了短/中波双色碲镉汞材料的外延,在经过优化的前提下,表面质量良好,组分、厚度均与设计值相符。

致 谢:对强宇、王彬、折伟林、沈宝玉、晋舜国、田璐等同志所做的相关工作深表感谢!

参考文献:

- [1] Zhou Liqing, Liu Ming, 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,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.
- [2] G Brill, S Velicu, et al. MBE growth and device processing of MWIR HgCdTe on large area Si substrates[J]. Electron. Mater, 2001, 30:717-722.
- [3] S Farrell, G Brill. et al. Ex situ cycle annealing of molecular beam epitaxy grown HgCdTe/Si layers[J]. Electron. Mater, 2010, 39, 43-48.
- [4] P S Wijewarnasuriya, G Brill. LWIR MBE HgCdTe photovoltaic detectors grown on Si composite substrates[J]. SPIE, 2004, 5046:323-331.
- [5] B Yang, Y xin. Molecular beam epitaxial growth and structural properties of HgCdTe layers on CdTe(211)B/Si(211) substrates[J]. Appl. Phys, 2000, 88:115-119.
- [6] Fu Xiangliang, et al. Study of surface defects induced by impurities from mercury source on MBE grown HgCdTe epilayers[J]. Laser & Infrared, 2007, 37(9):915-918. (in Chinese)
傅祥良,等. 束源杂质引发的 MBE HgCdTe 表面缺陷[J]. 激光与红外, 2007, 37(9):915-918.

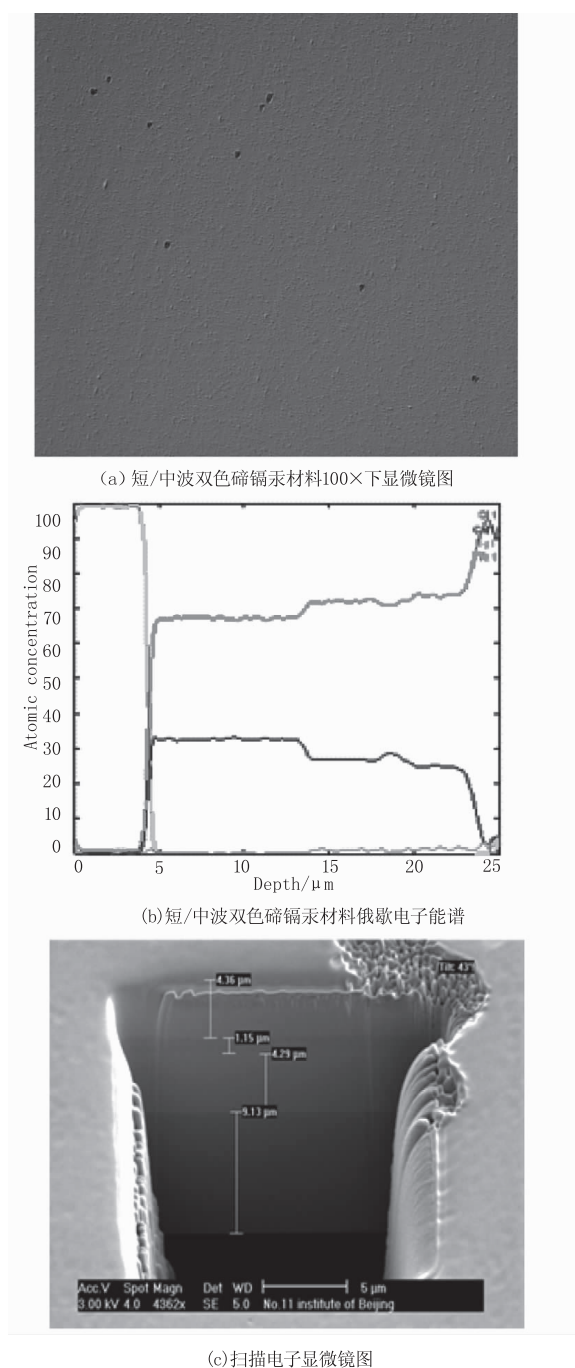


图7 短/中波双色碲镉汞材料的表征