

文章编号: 1672-8785(2020)11-0020-05

4 in 硅基碲化镉的厚度均匀性研究

李 震 高 达 师景霞 王 丛

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 采用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)方法在 4 in 硅衬底上进行了硅基碲化镉复合衬底生长工艺研究。使用光学轮廓仪、原子力显微镜、傅里叶红外光谱仪等设备对碲化镉薄膜进行了测试。结果表明, 碲化镉薄膜的厚度均匀性、表面粗糙度、翘曲度和半峰宽等都达到了预期标准, 能为外延碲镉汞薄膜提供良好的衬底。

关键词: 碲化镉; 硅基; 分子束外延

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.11.004

Study on Thickness Uniformity of 4-in Silicon-based Cadmium Telluride

LI Zhen, GAO Da, SHI Jing-xia, WANG Cong

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

Abstract: Molecular beam epitaxy was used to study the growth of CdTe/Si composite substrates on a 4-inch silicon substrate. Optical profilometer, atomic force microscope, Fourier infrared spectrometer and other equipment were used to test the cadmium telluride film. The test and analysis results show that the thickness uniformity, surface roughness, warpage and half-width of the cadmium telluride film meet the expected standards, which can provide a good substrate for the epitaxial mercury cadmium telluride film.

Key words: cadmium telluride; silicon-based; molecular beam epitaxy

0 引言

大面积、厚度均匀性好以及材料质量高的碲镉汞材料是目前焦平面技术研究的重点。美国等西方国家在 20 世纪 90 年代就开展了硅衬底方面的研究。伊利诺斯大学、陆军实验室、雷神公司、特利丹公司和 EPIR 公司等机构在硅基碲镉汞材料上的早期研发已经成熟, 目前正在向更大面积以及高晶体质量的方向发

展^[1-2]。衬底尺寸变大会带来材料外延均匀性的问题, 对硅基衬底的厚度均匀性、粗糙度等以及碲镉汞组分和厚度均匀性都有很大的影响。该问题与热解氮化硼(PBN)加热盘的加热均匀性、大尺寸材料在钼托中的形变以及源束流的分布有关。硅基衬底的束流源位置与外延衬底表面成一定角度放置。在操纵器不旋转的情况下进行外延。外延后的复合衬底呈现明显

收稿日期: 2020-08-13

作者简介: 李震(1995-), 男, 北京人, 助理工程师, 本科, 主要从事分子束外延硅基工艺研究。

E-mail: liyuif@163.com

的膜厚分布不均匀现象。区域差值可达 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右。对于平均膜厚 $6\sim 7\text{ }\mu\text{m}$ 的复合衬底材料来说, 这是巨大的差异。因此, 影响衬底厚度均匀性的因素主要有整个衬底温度的均匀性、衬底旋转速率和各源束流分布的均匀性^[3-6]。

本文报道了影响硅基碲化镉厚度均匀性的因素与优化方案, 以及我们在 4in 硅基衬底方面取得的最新进展。

1 影响因素

1.1 衬底温度的均匀性

衬底温度的主要影响因素是 PBN 加热盘的加热性能是否均匀。旧的 MBE 系统采用单加热温区的 PBN 加热盘, 而新引进的 P600

MBE 外延系统则具有双温区加热功能, 发热均匀, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的温差在 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。图 1 所示为相同温度下两种加热盘在加热时的对比情况。其中发亮程度可以表征温度。颜色越红越均匀, 表明双加热温区 PBN 加热盘的加热效果更佳。图 2 为优化后双温区 PBN 加热温度的均匀性曲线图和硅片在 $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时的温区示意图。单加热温区加热时, 中心温度比外围温度低; 双加热温区加热时, 中心温度与外围温度相差不大。生长碲化镉时的温度差可能对衬底生长影响不大, 但对生长碲镉汞的影响就很明显。因为汞的黏附系数很小, 所以生长温度必须控制在 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围以内。若偏差超出

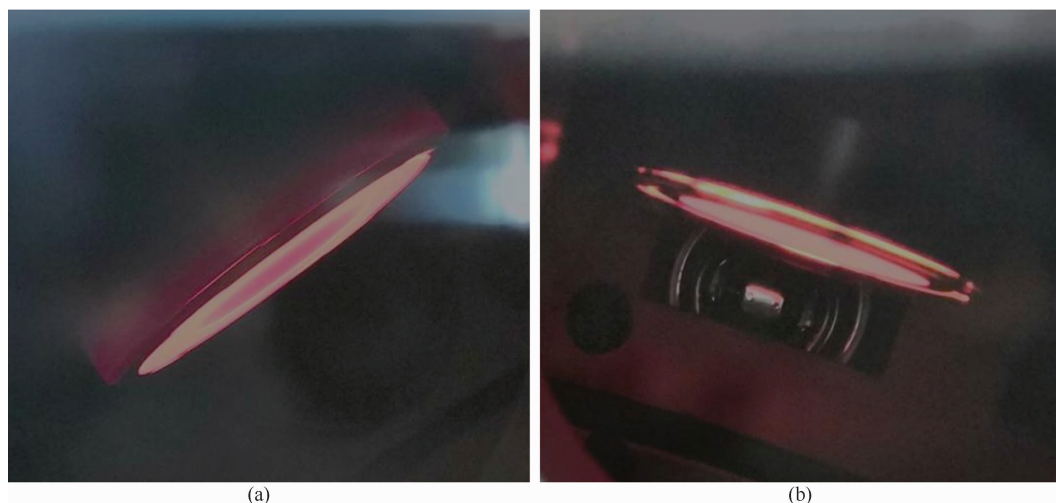


图 1 相同温度下不同尺寸硅片的表面脱附状态: (a) $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时单加热温区加热 3 in 硅片; (b) $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时双加热温区加热 4 in 硅片

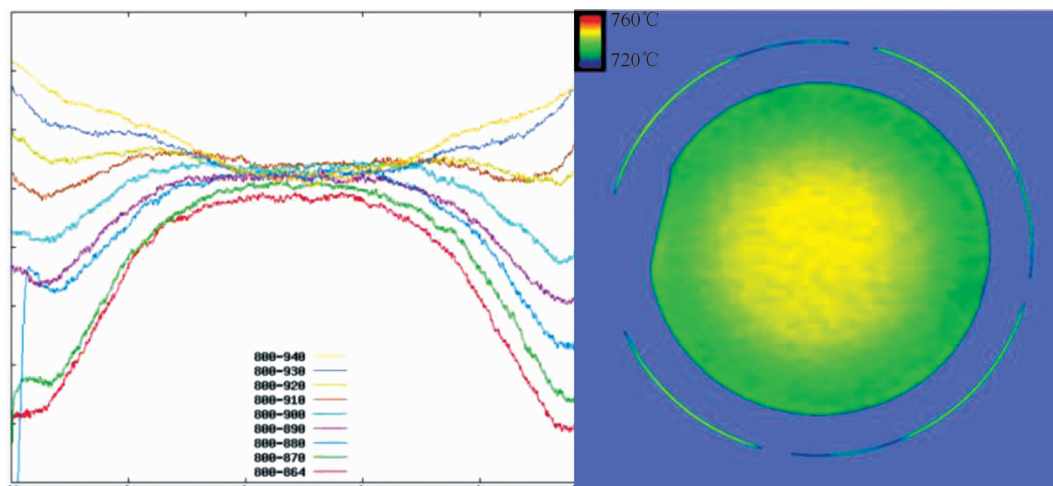


图 2 双温区 PBN 加热板的温度曲线及示意图

$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围, 则会导致该区域生长的材料缺陷过多、厚度均匀性变差等问题^[4-6]。

硅片在外延时因为温度问题也会产生滑移线, 如图 3 所示。滑移线会从外延片的边缘区域延伸到外延层表面。滑移线数量过多或长度过长都会影响衬底的质量。滑移线可由加热盘温场不均匀、硅片倒角处理不达标、基座及其他原因引起。加热盘温场的设定温度与实际温度、中心与边缘温度的差距过大都会产生滑移线^[7]。

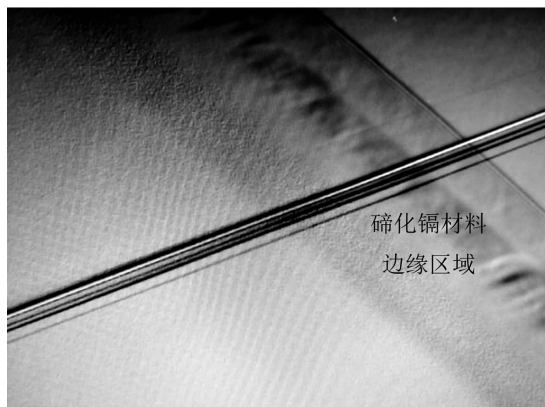


图 3 碲化镉薄膜上的滑移线

1.2 束流分布均匀性

源束流的分布均匀性会影响薄膜表面的均匀性, 包括源炉本身的设计、安装位置、安装角度以及旋转速率等。由于生长设备本身的技术所限和坩埚本身的形状设计, 生长过程中各束流源温度的稳定性和坩埚的形状会制约束流的稳定性, 从而影响薄膜材料的厚度均匀性。表 1 列出了我们在现有条件下改进前和改进后的效果对比数据。其中, 变化率变小表明束流更稳定。源容量的提升可以减少换料次数, 延长使用时间。

在理想模型中, 外延衬底表面正对束流源

炉口, 衬底和炉口平面平行, 炉口中心线与衬底相交于 A 点, 如图 4 所示。实际外延中, 束源炉口与衬底的法线方向并不一致, 如图 5 所示。由计算可得, 在不旋转的情况下, B 点的束流强度是 C 点的 73%^[2-4,8]。生长过程中衬底需要旋转, 旋转速率根据设备和束流源与外延衬底表面的实际角度不同而有所不同。将其与文献[9]中的试验进行了对照。结果表明, 转速与薄膜的厚度均匀性强相关。

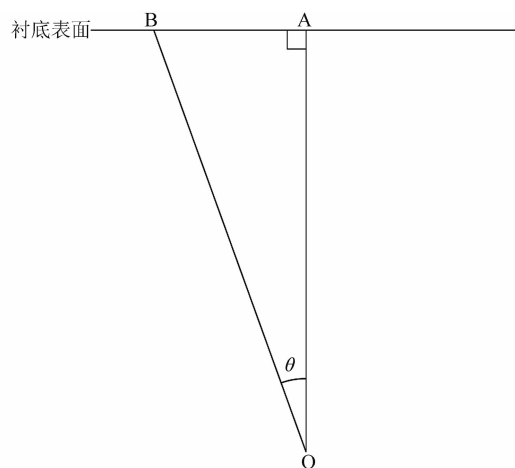


图 4 束流与衬底的示意图

2 工艺研究

实验采用芬兰 DCA 公司制造的 P600 MBE 外延设备进行 4 in 硅基复合衬底的生长。工艺过程参照文献[1]。实时监控外延过程。图 6 所示为脱附过程中的电子衍射条纹。外延后的复合衬底状态通过双晶 X 射线 (Double Crystal X-Ray Diffraction, DCXRD) 设备进行表征; 使用 Nicolet6700 傅里叶红外光谱仪进行薄膜厚度测试; 用 NewView8300 表面光学轮廓仪进行表面粗糙度测试; 通过金相显微镜对表面形貌进行观察^[1,10]。

表 1 外延坩埚优化前后的对比数据

名称	优化前	优化后	效果
源坩埚形状	圆锥状	圆柱状	—
原料形状	块状	匹配坩埚形状	—
源容量	250 g	500 g	提升 100%
使用周期	10~15 次	20~25 次	提升近 100%
变化率	1%/h~1.5%/h	0~0.25%/h	降低 70%

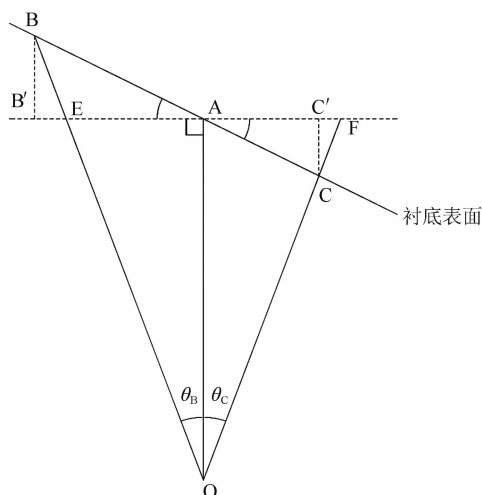


图 5 实际外延束流与衬底的示意图

3 结果与讨论

3.1 厚度均匀性

图 7 所示为 500 倍下硅基碲化镉薄膜材料的表面光学显微形貌。可以看出, 材料表面如镜面般光亮平整, 缺陷小。图 8 所示为薄膜厚度分布情况, 其厚度标准偏差为 0.08%。从表 1 中可以看出, 外延后的硅基碲化镉薄膜的厚度均匀性良好, 实验结果达到了预期目标, 表明改进方法是有效的。

3.2 表面平整度和粗糙度

图 9(a)和图 9(b)所示分别为 4 in 硅基碲化镉材料表面的平整度和粗糙度测试结果。表面平整度测试范围是直径为 90 mm 的圆形区域,

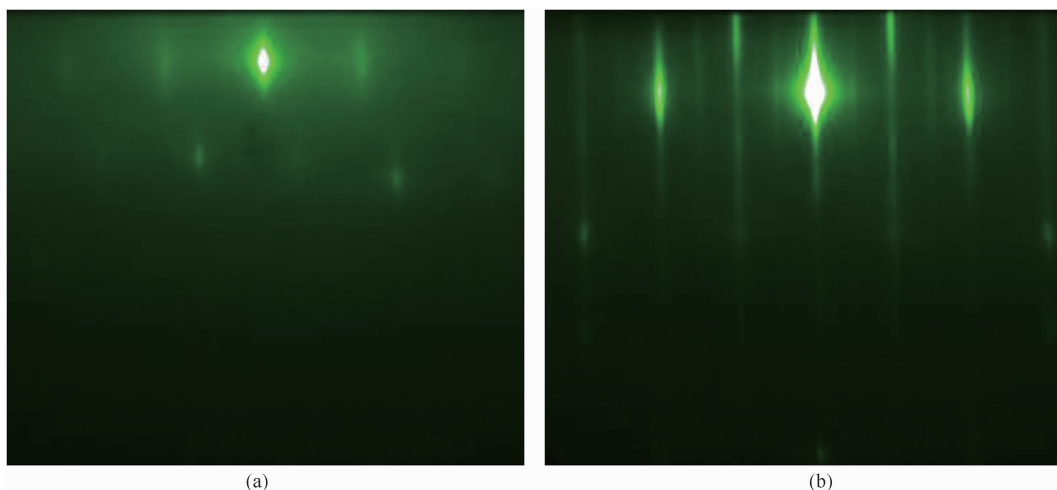


图 7 500 倍下 4 in 硅基碲化镉表面的显微形貌

其值为 16.87 μm 。粗糙度测试时采用“十”字形测试。测试结果可以覆盖整个片子, 平均值为 0.77 nm。整个外延片的表面平整度和粗糙度都较差, 因此在后续的工艺中需要继续优化, 减小表面平整度和粗糙度对衬底的影响。

3.3 结果分析

采用 P600 MBE 外延系统进行 4 in 硅基复合衬底材料的外延, 并使用双加热温区的 PBN 加热盘进行生长。该加热盘没有单加热温区中心与边缘处的温差问题, 对获得厚度均匀性好的衬底起到了关键作用。原位退火过程中的温度差距越小, 对降低复合衬底位错密度的作用越大。位错密度过高会降低材料的性能。减小碲化镉复合衬底的位错密度, 而碲化镉复合衬底的厚度均匀性、表面平整度和粗糙度的降低也有助

图 6 衬底表面脱附过程中的电子衍射条纹: (a)湿化学处理后的表面; (b) 860 $^{\circ}\text{C}$ 去除氧化层后的硅衬底表面

步长(mm)	X = 14	X = 21	X = 28	X = 35	X = 42	X = 49	X = 56	X = 63	X = 70	X = 77	X = 84	X = 91
Y = 98				6.699	6.761	6.730	6.761	6.761				
Y = 91			6.761	6.730	6.792	6.824	6.824	6.824	6.730	6.730		
Y = 84		6.761	6.792	6.824	6.888	6.888	6.888	6.888	6.888	6.792	6.638	
Y = 77	6.730	6.761	6.856	6.888	6.921	6.921	6.921	6.888	6.888	6.856	6.792	6.730
Y = 70	6.638	6.824	6.856	6.888	6.921	6.921	6.921	6.921	6.921	6.921	6.824	6.699
Y = 63	6.699	6.856	6.888	6.921	6.921	6.921	6.954	6.921	6.954	6.888	6.856	6.761
Y = 56	6.730	6.856	6.888	6.921	6.921	6.954	6.954	6.954	6.921	6.921	6.888	6.761
Y = 49	6.792	6.888	6.921	6.954	6.954	6.954	6.954	6.954	6.921	6.888	6.824	6.668
Y = 42	6.824	6.888	6.888	6.921	6.921	6.954	6.921	6.921	6.921	6.888	6.792	6.792
Y = 35	6.761	6.856	6.888	6.921	6.954	6.954	6.921	6.921	6.888	6.888	6.824	6.761
Y = 28	6.668	6.792	6.888	6.888	6.921	6.954	6.921	6.921	6.888	6.824	6.699	6.730
Y = 21		6.699	6.824	6.888	6.888	6.888	6.921	6.856	6.824	6.761	6.730	
Y = 14			6.668	6.792	6.824	6.824	6.824	6.792	6.699	6.761		
Y = 7				6.761	6.761	6.668	6.761	6.761	6.824			

图 8 4 in 硅基碲化镉薄膜的厚度分布(标准偏差为 0.08%)

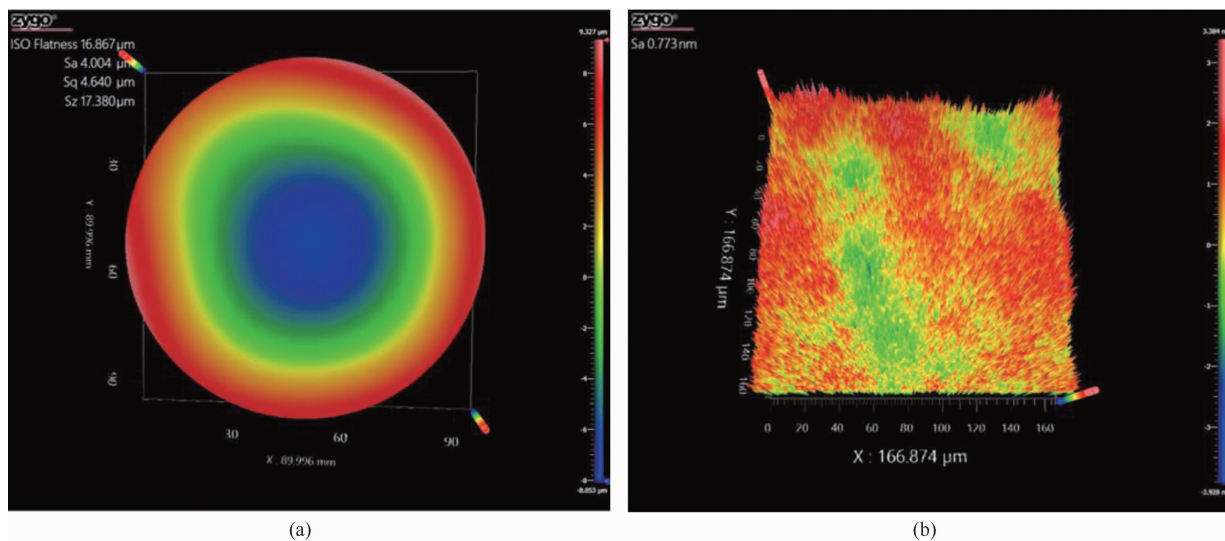


图 9 4 in 硅基碲化镉材料的表面测试结果: (a)平整度; (b)粗糙度

于改善碲镉汞的表面形貌与晶体质量, 为制造性能良好的器件提供材料基础。

延薄膜达到最佳的使用效果。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.

(下转第 32 页)

- 抑制研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [7] 王伟丽, 吕勇, 李晓英, 等. 一种双波段成像系统的红外通道杂散光分析 [J]. **应用光学**, 2018, **39**(2): 262-267.
- [8] 常伟军, 耿海峰, 腾国奇, 等. 基于 CODE V 和 LightTools 的成像系统初级鬼像分析 [J]. **应用光学**, 2017, **38**(2): 281-284.
- [9] 朱杨, 张新, 伍雁雄, 等. 紫外星敏感器光学系统设计及其鬼像分析 [J]. **红外与激光工程**, 2016, **45**(1): 115-120.
- [10] 梅超, 周泗忠, 张恒金, 等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法 [J]. **光学学报**, 2016, **33**(4): 72-75.
- [11] 郭帮辉, 王健, 黄剑波, 等. 三波段光学成像系统设计及鬼像分析 [J]. **光子学报**, 2014, **43**(1): 98-102.
-
- (上接第 26 页)
- [4] 王丛, 强宇, 高达, 等. 基于正交设计的 Si 基复合衬底优化工艺试验 [J]. **激光与红外**, 2019, **49**(11): 1353-1356.
- [5] 高达, 王经纬, 王丛, 等. 低缺陷 Si 基碲镉汞分子束外延工艺研究 [J]. **红外**, 2018, **39**(10): 12-15.
- [6] 葛玉斌, 高达, 王经纬, 等. 基于正交试验方法的 Si 基碲镉汞工艺优化 [J]. **激光与红外**, 2019, **49**(2): 209-212.
- [7] 李普生. 对影响外延片表面质量的若干问题的研究 [J]. **甘肃科技**, 2016, **32**(19): 43-45.
- [8] 李震, 王文燕, 强宇, 等. 束流强度分布与膜厚的关系 [J]. **红外**, 2019, **40**(9): 23-27.
- [9] 林肖. 镍薄膜厚度均匀性的优化及其对器件电学性能的影响 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [10] 折伟林, 田璐, 晋舜国, 等. $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$ 薄膜厚度测试方法的研究 [J]. **激光与红外**, 2012, **42**(12): 1351-1354.