

# 分子束外延生长 3 英寸 HgCdTe 晶片\*

陈路 巫艳 于梅芳 吴俊 乔怡敏 杨建荣 何力

(中国科学院上海技术物理研究所半导体材料器件研究中心及国家红外物理实验室, 上海, 200083)

**摘要** 报道了用分子束外延的方法制备 3 英寸 HgCdTe 薄膜的研究结果, 获得的 HgCdTe 外延材料均匀性良好, 在直径 70mm 圆内, 组份标准偏差率为 1.2%, 对应 80K 截止波长偏差仅为 0.1 $\mu\text{m}$ . 经过生长条件的改进, 表面形貌获得了大幅度改善, 缺陷密度小于 300 $\text{cm}^{-2}$ , 缺陷尺寸小于 10 $\mu\text{m}$ , 可以满足大规模 HgCdTe 焦平面列阵的应用需求.  
**关键词** 分子束外延, HgCdTe, 均匀性, 缺陷, 焦平面.

## MOLECULAR BEAM EPITAXIAL GROWTH OF 3-in HgCdTe WAFER\*

CHEN Lu WU Yan YU Mei-Fang WU Jun QIAO Yi-Min YANG Jian-Rong HE Li  
(Research Center for Advanced Materials and Devices, and the National Laboratory for Infrared Physics,  
Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract** The recent results on molecular beam epitaxial growth of 3-in HgCdTe wafers were reported. The composition uniformity in the wafer was found to be 1.2% in a diameter of 70 mm, corresponding to a deviation in cutoff wavelength of 0.1  $\mu\text{m}$  at 80 K. By refining the growth conditions, the surface morphology was significantly improved. The defect density was reduced to below 300 $\text{cm}^{-2}$ , and the defect size was suppressed to be smaller than 10 $\mu\text{m}$ . The material quality can meet the requirements of FPA fabrications.

**Key words** MBE, HgCdTe, uniformity, defect, FPA.

### 引言

随着红外焦平面技术的不断进步, 器件迫切需求廉价、大尺寸 HgCdTe 外延材料. ZnCdTe 材料晶格常数与 HgCdTe 匹配, 适用于低位错密度 HgCdTe 长波材料的分子束外延(MBE)生长, 位错密度一般小于  $5 \times 10^5 \text{cm}^{-2}$ [1], 但由于其在材料尺寸、成品率、机械强度、热胀系数等方面的限制, 难以满足大面积 HgCdTe 材料的日益增长需求. 在大规模红外焦平面需求的驱动下, 近年来, 国外围绕大面积 HgCdTe 外延技术进行了大量研究, 代表性的研究成果如采用 Ge 衬底的 3 英寸 HgCdTe MBE 研究[2], 采用 Si 衬底的 3 英寸以及 4 英寸生产型 HgCdTe MBE 技术研究[3~5].

本文报道我们在研究大面积 HgCdTe 外延材料上的初步研究结果. 研究采用了 GaAs 衬底材料. 选择 GaAs 作为外延衬底材料是基于以下考虑: GaAs

衬底材料具有廉价、大面积、机械强度较好等特点, 现在 GaAs 商品材料已经能够容易达到大于 4 英寸; 与 Si 衬底比较, 光谱透过范围宽, 覆盖短波到热红外长波波段(Si 衬底截止在约 9 $\mu\text{m}$ ), 热胀系数与白宝石基板接近[6], 以及衬底表面处理容易等优点, 更好地适于各种波段的长线条(>13 mm), 采用宝石为基板的间接混成线列焦平面器件. GaAs 作为衬底外延出的 HgCdTe 材料位错密度在  $10^6 \text{cm}^{-2}$  量级范围[7], 适用于短波、中波以及高背景环境使用的长波焦平面器件的应用.

### 1 生长温度控制

HgCdTe 材料的外延生长是在 Riber 32P MBE 系统中, 采用 3 英寸 GaAs (211)B 衬底进行的. 在 HgCdTe 生长之前, 在 GaAs 衬底上生长了厚度为 3~4  $\mu\text{m}$  的 CdTe 缓冲层. 关于衬底制备过程可参阅文献[7], 这里不再赘述.

\* 中国科学院知识创新工程资助项目  
稿件收到日期 2001-12-03, 修改稿收到日期 2002-01-18

\* The project supported by the Promotions for Science and Technology Innovations of CAS  
Received 2001-12-03, revised 2002-01-18

将 HgCdTe 外延尺寸从 2 英寸扩大到 3 英寸为 HgCdTe MBE 技术带来很大的挑战. 关键问题集中在生长温度的精确控制以及束流的大面积均匀性. 生长温度的精确控制问题尤其突出. 不同于 III-V 族或宽禁带 II-VI 族材料, HgCdTe 外延技术的难点主要集中在生长温度. 由于 Hg 的粘附系数很低, 并对生长温度十分敏感, 导致 HgCdTe 外延条件窗口十分狭窄, 要求生长温度必须控制在小于  $\pm 2^\circ\text{C}$  范围, 在生长中生长温度的微小波动将导致材料表面缺陷密度和尺寸的增加<sup>[8]</sup>, 严重影响材料在焦平面器件中的应用.

对于尺寸小于 2 英寸的衬底, 通常采用将衬底用 In 固定在 Mo 制衬底架的方式, 通过 In 的热传导保证衬底的横向热均匀性, 这种方法具有可以采用红外辐射温度计监控生长温度的优点, 实验证明是较好的装片方式<sup>[7]</sup>. 但该方法的缺点是无法应用于 3 英寸大尺寸衬底, 操作不当容易引入 In 杂质粘污. 特别是当衬底面积增大后, In 固定方式难以保障大面积横向温度的均匀性, 此外, 由于衬底材料与 Mo 制衬底架之间热胀系数的差异, 还将在材料内造成较大的热应力.

本研究采用了 3 英寸无 In 衬底架, 衬底在衬底架内自由放置, 依赖于加热器的辐射加热, 无热应力问题, 并可保证衬底材料的横向温度均匀性. 由于 GaAs 衬底为红外透明材料, 红外测温仪受到衬底加热器热辐射干扰, 无法测得衬底材料表面的真实温度. 采用通常的非接触式衬底热电偶测温, 问题则更为复杂. 图 1 为在加热器加热功率恒定条件下, HgCdTe 生长时热电偶温度读数随生长时间的变化关系. 一般来说, 在理想热平衡状态下, 加热功率与

热电偶读数应有严格的对应关系. 在加热功率恒定条件下, 热电偶读数也应对应一个相对恒定值. 但是在 HgCdTe 外延生长过程中, 材料发射率或红外吸收不断发生变化, 从而导致材料表面温度辐射损失量以及材料对衬底加热器辐射的吸收量不断变化, 无接触热电偶测温方式获得的热电偶温度是衬底加热器辐射、材料红外吸收以及辐射的综合效果的反映, 与材料真实温度的对应关系十分复杂, 并且随材料的组份、生长速率或厚度的变化而改变. 故此, 热电偶的读数变化并不能反映真实衬底的温度变化. Bajaj 等人<sup>[9]</sup>采用了使测温热电偶与衬底钨块机械接触的方法, 但为 MBE 加热系统带来了复杂性, 在很大程度上限制了生长过程中衬底转动, 并对大面积材料的均匀性的提高带来限制, 由于热电偶与衬底之间的机械接触使得热电偶寿命缩短, 缩短 MBE 的无维护运行时间. Ferret 等人<sup>[2]</sup>为了解决温度控制问题, 采用了特制的石墨衬底架, 并将衬底与其机械固定. 但这种方法难以保证大面积衬底的横向温度均匀性. 为了避免上述问题, Brill 等人<sup>[4]</sup>利用高能电子衍射实时观察, 经验性地总结出无接触热电偶在生长中的温度变化关系曲线. 该方法存在的问题是高能电子衍射图像对温度微小波动的敏感度不高, 难以保障材料生长温度的可靠测量以及稳定的反馈控制.

本项研究系统地研究了生长温度的测量方法, 通过增加红外吸收加热层的方法, 有效地解决了采用 3 英寸无 In 衬底架的精确温度控制问题. 该方法采用热电偶与衬底的无机接触方式, 同时避开了热电偶温度与材料表面温度对应关系复杂的问题, 不受 HgCdTe 组份、生长速率的变化影响, 适用于响

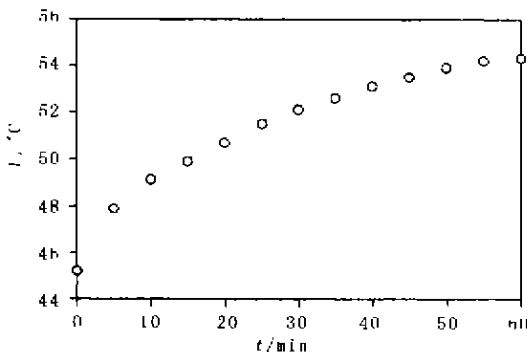


图 1 在加热器加热功率恒定条件下, HgCdTe 生长时温差电偶温度读数随生长时间的变化关系

Fig. 1 Variation of the thermal couple readings with the HgCdTe growth time when the output power of substrate heater maintained constant



图 2 3 英寸与 2 英寸 HgCdTe 外延材料

Fig. 2 HgCdTe epitaxial wafers of 3-in and 2-in

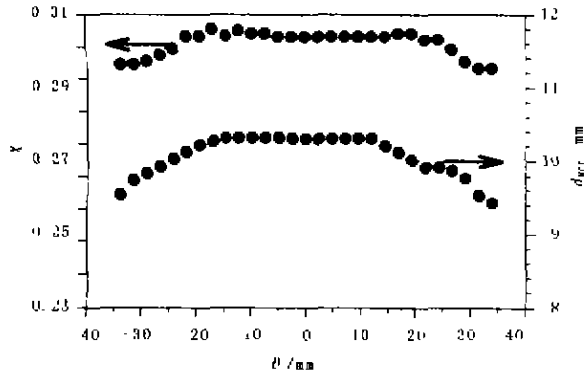


图3 典型3英寸HgCdTe圆晶的组份、厚度径向分布  
Fig.3  $x$  value and thickness distributions along radial direction of a typical 3-in HgCdTe wafer

应波段从短波到长波的各种 HgCdTe 生长. 最大温度控制偏差小于  $\pm 1\%$ , 完全满足高质量 HgCdTe 的生长要求. 另外, 该方法具备与衬底材料种类、大小无关等特点, 可以适用于更大尺寸、不同衬底的 HgCdTe 外延要求.

## 2 均匀性

生长大尺寸材料特有的另一个问题是 Cd、Te 以及 Hg 束流在样品生长面上的分布, 分布不均匀将严重影响材料的组份  $x$ 、厚度  $d$ 、以及表面形貌的均匀性. 束流的分布情况取决于束源炉本身的设计以及各束源炉相对于衬底架的相对位置、角度, 相对于材料生长速率, 样品的旋转速率等因素. 在解决了生长温度控制问题的基础上, 进行了 3 英寸

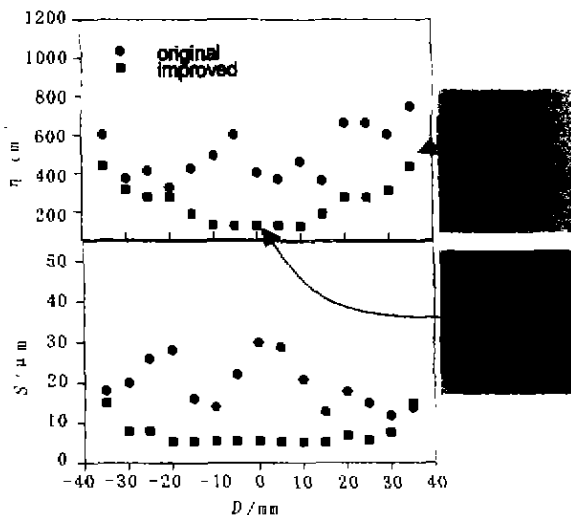


图4 改进前后表面缺陷密度及尺寸分布情况对比

Fig.4 Comparison of the density and size distribution of the surface defects before and after improvements.

HgCdTe 的外延条件探索、生长实验.

图2为获得的75mm直径HgCdTe外延圆晶照片. X射线衍射分析表明, HgCdTe材料为[211]晶向, 没有观察到[331]衍射峰. [331]晶向是材料生长中, 在[111]方向发生孪晶而引发的, 通常认为与生长条件的波动相关. 该结果证实了生长过程中温度精确控制方法的可靠性. 位错腐蚀坑实验表明该材料位错密度与在GaAs衬底上制备的2英寸HgCdTe材料相同(图2)[10].

用傅利叶红外透射光谱(BRO-RAD STF-65A)的方法对3英寸HgCdTe外延圆晶沿径向进行了测量, 测试光斑孔径为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ , 并在此基础上进行了组份、厚度均匀性分析. 图3给出了典型的组份、厚度径向分布. 统计结果汇总于表1. 在直径为70mm圆内, 组份标准偏差为0.004, 对应于80K截至波长的标准偏差为 $0.1 \mu\text{m}$ , 完全满足制备焦平面器件的应用要求.

HgCdTe外延材料的表面质量严重影响HgCdTe红外焦平面器件的性能, 在优化的生长温度下, 表面缺陷的种类、密度与各组成元素束流密切相关[8]. 经过实验条件的优化, 3英寸材料的表面形貌获得了大幅度改善, 达到了2英寸HgCdTe材料的同等水平[11]. 图4为改进前后表面缺陷密度 $\eta$ 以及尺寸 $S$ 的分布情况对比. 在直径约70mm圆内, 缺陷尺寸小于 $10 \mu\text{m}$ , 密度小于 $300 \text{cm}^{-2}$ . 按1个缺陷将导致焦平面器件的1个盲元的极端可能性估算, 如果应用于中心距为 $30 \mu\text{m}$ , 规模为 $256 \times 256$ 的焦平面器件, 则该焦平面器件由于缺陷引发的盲元率小于0.3%, 完全满足器件的应用要求.

## 3 结论

本文报道了用MBE的方法制备3英寸HgCdTe薄膜的研究结果. 扩大材料尺寸面临的问题是生长温度的控制, 束流的最佳配置以及均匀性. 本研究采用了3英寸无In衬底架、无机机械接触热电偶测温方式, 在生长中衬底处于无热应力的自由状态. 最大温度控制偏差小于 $\pm 1\%$ , 完全满足高质量

表1 3英寸HgCdTe组份、厚度分散统计  
Table 1 Statistical deviations in  $x$ -value and thickness for a 3-in HgCdTe wafer

	mean	max	min	$\sigma/\text{mean}$	$(\text{max} - \text{min}) / (\text{max} + \text{min})$
$x$	0.314	0.318	0.306	1.2%	$\pm 1.9\%$
$d$	10.37	10.6	9.7	2.7%	$\pm 4.4\%$

HgCdTe 的生长要求。

获得的 HgCdTe 外延材料均匀性良好,在直径 70mm 圆内,组份标准偏差率为 1.2%,对应 80K 截止波长偏差仅为 0.1 $\mu\text{m}$ 。经过生长条件的改进,表面缺陷密度以及尺寸获得了大幅度改善,缺陷密度小于 300 $\text{cm}^{-2}$ ,尺寸小于 10 $\mu\text{m}$ ,可以满足大规模 HgCdTe 焦平面阵列的应用需求。

**致谢** 本项工作得到上海技术物理研究所半导体材料器件研究中心方维政、张小平、陈新强、杜美蓉、贺志良的技术支持,以及红外物理国家重点实验室黄志明在红外透射光谱分布测量的支持,作者表示衷心感谢。

### REFERENCES

- [1] YU Mei-Fang, WU Yan, HE Li, *et al.* Dislocation density of MBE HgCdTe on ZnCdTe substrates. *Solid Electronics*, to be published (于梅芳,巫艳,何力,等. ZnCdTe 衬底的 MBE HgCdTe 位错密度研究. *固体电子学*, 待发表)
- [2] Ferret P, Zanatt J P, Hamelin R, *et al.* Status of the MBE technology at Leti LIR for the manufacturing of HgCdTe focal plane arrays. *J. ELECTRONIC Materials*, 2000, **29**: 641
- [3] de Lyon T J, Jensen J E, Gorwitz M D, *et al.* MBE growth of HgCdTe on silicon substrates for large-area infrared focal plane arrays: a review of recent progress. *J. Electronic Materials*, 1999, **28**: 705
- [4] Brill G, Velicu S, Boieriu P, *et al.* MBE growth and device processing of MWIR HgCdTe on large area Si substrates. *J. ELECTRONIC Materials*, 2001, **30**: 717
- [5] Varesi J B, Bornfreund R E, Childs A C, *et al.* Fabrication of High-performance large-format MWIR focal plane arrays from MBE-grown HgCdTe on 4" silicon substrates. *J. Crystal Growth*, 2001, **30**: 566
- [6] Ziegler J, Finck M, Kruger R, *et al.* Long linear HgCdTe arrays with superior temperature-cycling-reliability. *SPIE*, 2000, **4028**: 380
- [7] He L, Yang J R, Wang S L, *et al.* A study of MBE growth and thermal annealing of p-type long wavelength HgCdTe. *J. Crystal Growth*, 1997, **175/176**: 677
- [8] He L, Wu Y, Chen L, *et al.* Composition control and surface defects of MBE-grown HgCdTe. *J. Crystal Growth*, 2001, **227/228**: 677
- [9] Bajaj J, Arias J M, Zandian M, *et al.* Uniform low defect density molecular beam epitaxial HgCdTe. *J. Electron Materials*, 1996, **25**: 1394
- [10] YU Mei-Fang, YANG Jian-Rong, WANG Shan-li, *et al.* Study of dislocation density in MBE HgCdTe epilayers. *J. Semiconductors* (于梅芳,杨建荣,王善力,等. 分子束外延 HgCdTe 薄膜位错密度的研究. *半导体学报*), 1999, **20**(5): 378
- [11] CHEN Lu, WU Yan, HE LI, *et al.* Surface defects on MBE grown HgCdTe. *J. Infrared Millim. Waves* (陈路,巫艳,何力,等. 分子束外延 HgCdTe 表面缺陷研究. *红外与毫米波学报*), 2001, **20**(6): 406