

·成果简介·

HgCdTe 分子束外延制备技术研究进展

何 力*

(中国科学院上海技术物理研究所, 半导体薄膜材料研究中心,
红外物理国家重点实验室, 上海 200083)

[关键词] 分子束外延, 红外焦平面, 碲镉汞

获得大面积的组成均匀的高质量 HgCdTe 外延材料是光伏型红外焦平面列阵探测器 (FPA) 制备的关键问题。HgCdTe 液相外延 (LPE) 制备技术是现今 HgCdTe 红外探测器工业所使用的主流技术。从 80 年代开始, 人们研究发展了 HgCdTe 材料的分子束外延 (MBE) 技术^[1]。大量研究表明, MBE HgCdTe 材料具有更好的表面形貌、更好的外延层组成和厚度均匀性, 以及更好的组成 x 值和电学参数控制能力等优点。MBE HgCdTe 材料性能以及所制备的探测器水平已经达到与 LPE HgCdTe 材料相媲美的水平^[2]。MBE HgCdTe 技术与 LPE 技术相比, 除具备低温、超高真空生长环境等优点外, 还具有在异质衬底材料上制备 HgCdTe 材料的能力^[3], 有助于解决外延层与 Si 信号处理电路的热失配以及高质量、大面积碲镉汞衬底难以获得的问题; 可根据不同使用目的灵活地改变每次生长的 HgCdTe 材料组成, 特别适合目前要求 HgCdTe 材料批量小, 组成、结构等参数灵活多变的特点^[2]; 可生长 PN 结^[2,4]、异质结、原位钝化以及多层结构^[2,4]。所以, MBE 技术是制备下一代结构复杂的红外探测器的最有希望的材料制备技术。我们对 MBE HgCdTe 材料做了较为系统的研究, 进展情况如下。

1 HgCdTe 外延材料的生长

我们用无掺杂直径为 50 cm(211) B GaAs 材料为衬底, 在 Riber 32PMBE 系统中, 使用 CdTe (6N), Te(6N) 以及 Hg(7N) 3 种束源材料进行 HgCdTe 外延材料生长。在经热处理后的 GaAs 衬底上生长了厚度为 3—4 μm 的 CdTe 缓冲层, 以降低失配位错以及衬底中 Ga 外扩散的影响。在生长 HgCdTe 之前, 需仔细标定红外辐射测温仪。在生长全过程中, 生长温度控制^[5]在 $183^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 范围内, 并通过旋转生长样品架提高材料组成和厚度的均匀性。HgCdTe 外延层的生长速率为 2.5—3 $\mu\text{m}/\text{hr}$, 厚度控制在 10—15 μm 。材料的组成 x 值是通过调整 CdTe 的束流来控制的。

2 表面形貌

大量实验表明, 材料的组成以及表面形貌对生长温度具有很大的敏感性。生长高质量的 HgCdTe 材料必须将生长温度精确控制在上述温度范围内, 如生长温度过高, 在生长中将造

* 1994 年度国家杰出青年科学基金获得者。

本文于 1997 年 9 月 8 日收到。

成富 Te 成核, 形成雪花状结构^[6]。衬底表面处理质量对 HgCdTe 表面型貌也有很大影响。在优化的生长条件以及制备良好的衬底上获得的 HgCdTe 外延层, 表面光亮, 在不同倍率的显微镜下观察的表面形貌无明显生长特征, 在直径为 50 cm 的材料表面, 宏观缺陷密度典型值为 $200\text{--}300\text{cm}^{-2}$ 。

3 组成和厚度的均匀性

通过优化生长温度的测定方法以及衬底旋转方式, 可获得组成和厚度均匀性很好的材料。我们对直径为 50 cm 的 HgCdTe 材料用 3 mm 光斑红外透射进行了横向组成以及厚度的测试 (25 点), 并用计算机模拟方法对组成和厚度进行了计算^[6,7]。测算结果: 长波 HgCdTe 样品在 50 cm 直径面积上组成的标准偏差 (STDDEV) 仅为 0.0004 (组成平均值为 0.222), 相对偏差为 0.19%; HgCdTe 层厚度平均值为 $10.88\text{ }\mu\text{m}$, 标准偏差值为 $0.238\text{ }\mu\text{m}$, 相对偏差为 2.19%, 优于近年来文献报道的最好结果。为研究材料生长过程中沿厚度方向组成分布变化情况, 我们用实时椭圆偏振光谱进行了测量, 结果表明, 组成分布偏差较小, 对 x 值为 0.3 的样品, 标准偏差为 0.002。

4 组成生长可重复性

组成参数的可重复性是 HgCdTe MBE 实用化技术的关键。通过对稳定生长工艺的研究发现, MBE 技术具有较好的组成可重复性。对于 10 次连续生长条件下的 x 值可重复性情况是: 在这批材料的生长中, x 值控制目标为 0.228, 实际获得的 x 的平均值为 0.2287, 标准偏差值为 0.0017, 相对偏差为 0.74%。

5 电学性质

由 MBE 生长直接得到的材料为 n 型导电材料。由于红外器件对材料的电学参数有严格要求, 必须对生长后的材料进行退火处理以调整其电学参数。通过对不同退火条件的大量研究, 我们稳定地获得了适合 FPA 器件需要的 p 型或 n 型材料。在直径为 50 cm 的材料表面不同区域进行霍耳抽样测试表明, 电学参数分布均匀。对长波 p 型材料进行霍耳变温测试, 没有观测到由于材料导电参数的不均匀而导致的反常霍耳效应。我们用剥层腐蚀方法对材料的厚度方向电学性质做进一步研究, 结果也显示出材料的电学参数分布均匀, 证实了变温霍耳的测量结果。在 77K 下长波 p 型材料的典型空穴浓度约为 $1 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, 空穴迁移率大于 $600\text{ cm}^2/\text{Vs}$, 优于文献报道水平, 满足器件对材料电学参数的要求。在 77K 下 n 型材料的典型电子浓度约为 $1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$, 电子迁移率为 $0.8 \times 10^5\text{--}1 \times 10^5\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。

6 位错密度

实验发现, 原生 HgCdTe 材料的位错密度较高, 一般情况下, 位错腐蚀坑密度 (EPD) 值达 $9 \times 10^6\text{--}20 \times 10^6\text{ cm}^{-2}$ 。图 1 为实验获得的 HgCdTe 材料表面 EPD 值与退火温度的关系。大量实验结果表明: 生长后的热处理对降低材料 EPD 有非常明显的效果, 在约 250°C 退火, EPD 可降低至原生材料缺陷密度的 50%, 典型值为 $4 \times 10^6\text{--}6 \times 10^6\text{ cm}^{-2}$; 490°C 退火, EPD 值为 $2 \times 10^6\text{--}3 \times 10^6\text{ cm}^{-2}$ 。退火对位错缺陷的影响可以解释为是在热应力场作用下位错热运动所引起的湮灭和交合过程所致。特别在 HgCdTe 材料中, 由于汞空位的大量存在, 位错和汞空位的相互作用降低了位错的热运动激活能, 从而即使在 250°C 下的低温退火, 对降低 EPD 仍有较大的效果。对 FPA 而言, 离开外延层表面 $1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ 以上区域是探测器的 PN 结区和红外吸收区。在这个区域内, 特别是在 PN 结区内材料的 EPD 将直接影响器件性能。为了

了解位错密度的纵向分布情况,我们对不同 HgCdTe 样品进行剥层 EPD 腐蚀实验,结果如图 2 所示,位错缺陷密度在 HgCdTe 表面最低,随 HgCdTe 腐蚀深度的增加缺陷密度逐渐缓慢上升。经退火后的材料 EPD 随深度的变化与原生材料相比,有更加缓慢上升的趋势。以上表明,材料高温退火降低缺陷密度的工艺,对器件的应用有很强的实用价值。

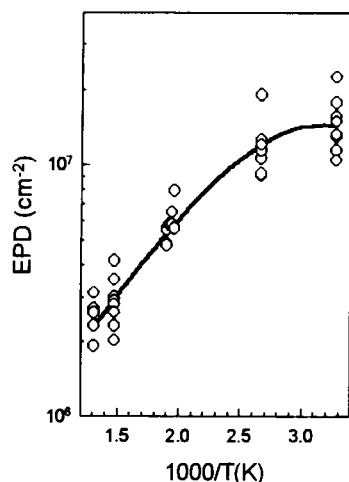


图1 HgCdTe 材料表面 EPD 值与退火温度的关系

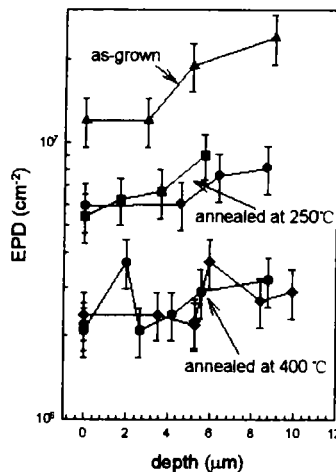
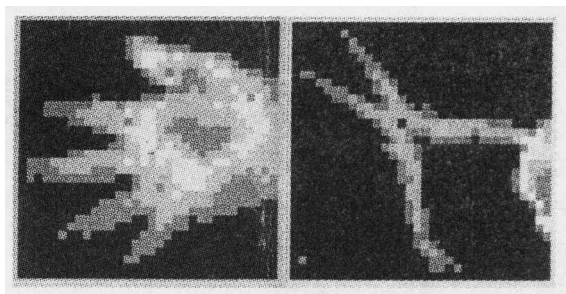


图2 不同样品 EPD 随厚度方向的变化关系, 横轴原点为 HgCdTe 外延层表面

7 器件应用

为了进一步检验材料的性能,我们用 MBE 制备的 p 型长波 $\text{Hg}_{0.76}\text{Cd}_{0.24}\text{Te}$ 材料试制了光伏型 32×32 小规模长波混成 FPA。PN 结是用 B 离子注入形成损伤层的方法制备的。初步结果显示,平均探测率 D^* 达到 $1 \times 10^{10} - 2 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 温度分辨率为 0.1 K, 像元响应的不均匀性小于 25%。图 3 (a), (b) 为人体以及室温物体凝视热成像的两个例子。图中物体的温度由不同灰度表示,人手表面温度分布的不同可以清晰地分辨出来。室温目标凝视热成像的实现,标志着 MBE 生长的 HgCdTe 材料已经初步具备实际应用能力。



(a) 人手成像照片 (b) 室温尖嘴钳成像照片

图3 32×32 HgCdTe 混成 FPA 热成像实例

致谢 衷心感谢上海技术物理研究所半导体薄膜材料研究中心的研究人员、研究生在本项目研究中作出的贡献。

参 考 文 献

- [1] Faurie J P, Million A. Molecular beam epitaxy of II-VI compounds: HgCdTe. J. Crystal. Growth, 1981, 4: 582.
- [2] Bajaj J, Arias J M, Zandian M, et al. Molecular beam epitaxial HgCdTe material characteristics and device performance: reproducibility status. J. Electronic. Materials, 1995, 24: 1067.

- [3] Delyon T J, Rajavel R D, et al. Heteroepitaxy of HgCdTe (112) infrared detector structures on Si (112) substrates by molecular beam epitaxy. *J. Electronic Materials*, 1996, **25**: 1341.
- [4] Wu O K, et al. Growth and properties of In- and As-doped HgCdTe by MBE. *J. Crystal Growth*, 1993, **127**: 365.
- [5] 王善力, 杨建荣, 何力等. p-型长波碲镉汞材料的分子束外延研究. *红外与毫米波学报*, 1996, **15**: 333.
- [6] He L, Yang J R, et al. A study of MBE growth and thermal annealing at HgCdTe. *J. Crystal Growth*, 1997, **165—166**: 677.
- [7] 杨建荣, 王善力, 何力等. 红外透射光谱在 HgCdTe 薄膜性能评价中的应用. *红外与毫米波学报*, 1996, **15**: 327.

RECENT DEVELOPMENT IN MBE OF HgCdTe

He Li

(*Epitaxy Research Center for Advanced Materials and State key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083*)

Key words MBE, focal plane arrays, HgCdTe

资料·信息·

科学基金杂志部与美国《Science》杂志正式建立合作关系

为了加强中美科技界和科技期刊界的合作与交流,国家自然科学基金委员会科学基金杂志部与美国《Science》杂志日前已正式签署协议,建立合作关系。

协议内容包括:双方相互交换《中国科学基金》、《自然科学进展》和《Science》等期刊;当中国方面有重要研究成果发表时,科学基金杂志部可通告《Science》杂志,《Science》杂志将对此发表短评和介绍,反之亦然;相互交流创办、运行科学期刊的经验和提供了解科技期刊工作程序以及参加学术会议组稿的实践机会;每年科学基金杂志部与《Science》杂志社人员或少数科技期刊撰稿人定期互访;中国科学家在《Science》杂志上发表英文论文后,其论文的英文摘要和可靠的中文译文可以在科学基金杂志部所属的刊物上发表。另外,《中国科学基金》和《自然科学进展》每期发排后,将其目录、摘要、关键词及参考文献等传给《Science》杂志社,其专栏编辑挑选后在《Science》杂志电子版上发表等等。

为了把我国基础研究成果尽快推向世界,提高我国青年科研人员的论文写作水平,并使我国科技期刊整体水平提高做出贡献。科学基金杂志部近一年来在努力办好自己杂志的基础上开展了内容广泛的国际交流活动。与英国《Nature》杂志的刊物交换已经从 1998 年 5 月份开始;向中国科学家寄发了 4.5 万份关于“如何在《Nature》杂志上发表文章”的小册子;指导中国科学家如何阅读和下载《Nature》杂志电子版的中英文摘要等等。此外,作为国际科技出版界最大的出版商——德国的 Springer 出版社现在也正处于与科学基金杂志部积极接触之中。

科学基金杂志部与美国《Science》杂志社的合作关系的正式建立,为国家自然科学基金委员会与国外科技机构建立合作交流的又一成功范例。我们相信,通过我们的努力、通过全委各部门的积极配合,国家自然科学基金委员会的国内外声誉将会进一步提高。