

HgCdTe 器件中 pn 结结区扩展的表征方法

翁彬^{1,2}, 周松敏¹, 王溪^{1,3}, 陈奕宇^{1,3}, 李浩^{1,3}, 林春^{1*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 上海科技大学, 上海 201210;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:报道了液氮温度下激光束诱导电流(LBIC)和 $I-V$ 测试两种在 HgCdTe 器件中 pn 结结区扩展的表征方法. 通过 LBIC 和 $I-V$ 测试, 发现了 p 型 HgCdTe 材料中由 B⁺ 离子注入成结和干法刻蚀成结对材料造成的损伤使得有效结区范围大于注入和刻蚀面积, 并获得 n 区横向扩展. 同时, 通过对比, 相互印证两种方法得到的测试结果一致.

关键词: HgCdTe; 激光束诱导电流; $I-V$ 测试; B⁺ 离子注入; 干法刻蚀
中图分类号: TN3 **文献标识码:** A

Characterization method of PN junction region expansion in HgCdTe device

WENG Bin^{1,2}, ZHOU Song-Min¹, WANG Xi^{1,3}, CHEN Yi-Yu^{1,3}, LI Hao^{1,3}, LIN Chun^{1*}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The laser beam induced current (LBIC) and the $I-V$ test at liquid-nitrogen temperature were applied to characterize the PN junction region extension effect in the HgCdTe device processing. By LBIC and $I-V$ test, it was found that the area of n-type region of p-type HgCdTe material implanted by Boron ion or etched by ion beam milling is larger than the nominal values. The transverse dimension of n-type region was measured. At the same time, it was found that the results obtained by both methods were comparable.

Key words: HgCdTe, laser beam induced current, $I-V$ test, Boron ion implantation, dry etching
PACS: 71.22. + i

引言

典型的碲镉汞光电探测器是在低温环境下运行, 红外焦平面阵列则主要是由 n + -on-p 结组成, 探测器的性能与 pn 结的结构是密切相关^[1-2]. 目前, 碲镉汞红外探测器的成结工艺主要是离子注入成结, 离子注入成结是通过向材料注入加速后的高能离子, 将表面层中的部分 Hg 原子挤出正常格点, 形成 Hg 填隙, Hg 填隙原子是 n 型掺杂, 把注入区从 p

型转化成 n 型, 因为 Hg 填隙原子会向材料内部扩散, 使得有效结区大于注入孔面积^[3]. 在器件制备中, 还有另外一种成结工艺就是刻蚀成结, 在 Ar⁺ 离子轰击材料表面过程中, Ar⁺ 离子会将部分 Hg 原子挤出正常格点, 形成 Hg 填隙, Hg 填隙原子是 n 型掺杂, 会向材料内部扩散, 使得刻蚀坑周围的 p 型材料因损伤变成 n 型, 因此有效结区也会大于刻蚀区域^[4-6].

测量注入成结或刻蚀成结形成的 n 区实际分

收稿日期: 2015-02-19, 修回日期: 2016-07-15

Received date: 2015-02-19, revised date: 2016-07-15

基金项目: 中国科学院国防科技创新基金项目(国防实验基金)

Foundation items: National Defense Science and technology innovation fund of the Chinese Academy of Sciences (National defense experimental fund)

作者简介(Biography): 翁彬(1989-), 男, 福建莆田人, 硕士, 主要研究领域为碲镉汞半导体器件. E-mail: wengbin@boe.com.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: chun_lin@mail.sitp.ac.cn

布,对于减小 pn 结区扩展的研究起着很大的作用,有利于减小器件的光敏元尺寸,因此研究注入成结或刻蚀成结形成的 n 区实际分布就具有很大的现实意义. 因为常规的一些测试方法如显微观察、霍尔测试等方法无法测试出 HgCdTe 器件真正的 n 区分布,所以需要一种高精度的、无损的测试方法来测试 HgCdTe 器件的 n 区实际分布. 本文主要是以激光诱导电流法(LBIC)为主^[7-8],液氮温度下的 $I-V$ 测试为辅来测量材料器件因成结工艺而造成的有效结区扩大范围,从而得到 n 区分布.

1 表征方法

1.1 液氮环境下的 $I-V$ 测试

$I-V$ 测试属于实验室较为通用的测试方法,而本文的 $I-V$ 测试关键点在于样品表面设计的特殊结构. 在样品表面设计若干相同大小的光敏元对,光敏元对之间间距递增,再利用探针测试台在液氮温度下测试样品上光敏元之间的 $I-V$ 曲线,来分析 HgCdTe 材料 pn 结区扩展情况.

1.2 激光束诱导电流

激光诱导电流(LBIC)是一种无损伤的、高分辨率的、高效便捷的光学测试方法^[9]. LBIC 信号产生的机理图如图 1 所示^[10-12],用聚焦的低功率激光照射待测样品,在激光入射位置附近,样品会产生光生载流子空穴-电子对,在结区电场的作用下,光生电子从 p 区向 n⁺ 区移动,光生空穴在 p 区反方向堆积,连接两端电极,就能探测到激光照射位置 LBIC 信号电流.

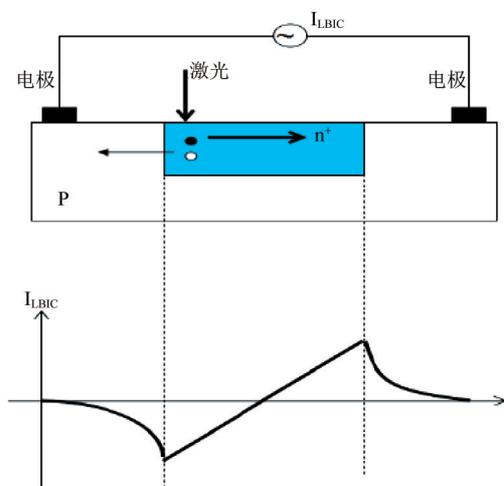


图 1 LBIC 信号原理图

Fig. 1 The schematic diagram of LBIC signal

图 2 所示,是 LBIC 测试系统,由光学和电学两

部分组成. 主要关键部件有:①诱导光源:波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器;②锁相检测系统:斩波器,锁相放大器,探测灵敏度最低可达 fA 量级;③扫描控制设备: $x-y$ 移动平台,平台控制器. 测试系统的光斑直径约为 5 μm ,扫描步进可达 1 μm ,电学分辨率约为 nA 量级.

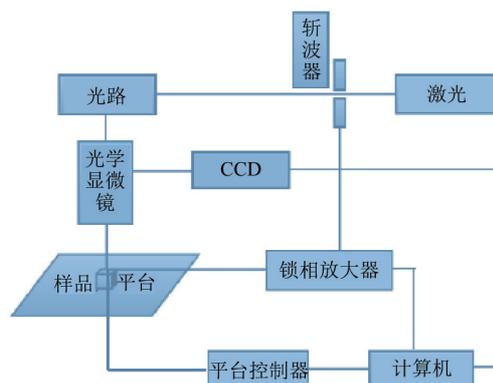


图 2 LBIC 测试系统

Fig. 2 The system of LBIC testing

2 样品制备及测试方式

测试样品均为液相外延(liquid phase epitaxy)技术生长的 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料,由不同的成结工艺加工而成,每个样品都只有一种成结方式:

1. 离子注入样品,由载流子浓度为 $2.98 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,迁移率为 $567.2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,组分 $x=0.22$ 的 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料通过 B^+ 注入形成 n 区,离子注入能量为 120 ~ 150 keV,剂量为 $1 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$;最后对样品进行金属化,制备金属电极.

2. IBM (ion beam milling) 刻蚀样品,由载流子浓度为 $1.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,迁移率为 $261.8 \text{ cm}^2/\text{Vs}$,组分 $x=0.42$ 的 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料通过 IBM 干法刻蚀形成 pn 结,刻蚀条件:用 Ar^+ 离子进行刻蚀,刻蚀能量为 180 ~ 200 eV,刻蚀时间 10 min;最后完成金属化电极的制备.

图 3 所示,碲镉汞材料的表面结构设计,主要由三部分组成:①电极:a 区和 d 区为引出的 p 型区欧姆接触电极;② $I-V$ 测试部分:b 区特殊排列的光敏元,光敏元大小为 $50 \times 50 \mu\text{m}$,并在每个光敏元上引出 n 型区欧姆接触电极;③ LBIC 测试部分:c 区光敏元,光敏元大小为 $50 \times 50 \mu\text{m}$ 和 $50 \times 100 \mu\text{m}$,不制备电极.

$I-V$ 测试方法:在液氮温度下,一方面连接单个光敏元与电极,测试 pn 结的 $I-V$ 曲线;另一方面连接同行的光敏元对,测试其 $I-V$ 曲线,通过判断是否

存在 pn 结的 $I-V$ 特性曲线来判断光敏元对的连通性,从而获得有效结区的实际大小.表 1 给出的是 b 区每行光敏元对之间的间距.

LBIC 测试方式:引出 a 区和 d 区的两个电极,在液氮温度下,用激光沿着两个电极之间的方向单向扫描 c 区光敏元,收集每个位置的 LBIC 信号,从而获得 c 区每个光敏元的 n 区分布,扫描激光光斑大小约为 $5\ \mu\text{m}$,扫描步进为 $1\ \mu\text{m}$.

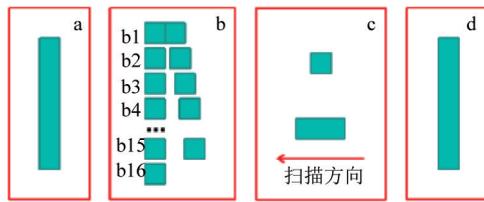


图 3 样品结构示意图
Fig. 3 The structure of the samples

表 1 b 区各行光敏元对间距

Table 1 The space between two n-regions in area b

| 行数 | 间距/ μm | 行数 | 间距/ μm |
|----|-------------------|-----|-------------------|
| b1 | 0 | b9 | 8 |
| b2 | 1 | b10 | 9 |
| b3 | 2 | b11 | 10 |
| b4 | 3 | b12 | 11 |
| b5 | 4 | b13 | 12 |
| b6 | 5 | b14 | 13 |
| b7 | 6 | b15 | 14 |
| b8 | 7 | b16 | 单个光敏元 |

3 实验结果与讨论

图 4、图 5 给出了 B^+ 注入成结的 p 型 HgCdTe 材料样品液氮温度下微分电阻与偏压的关系,即 $R-V$ 曲线,由 $I-V$ 测试结果计算得来.图 4(a) 给出的是样品 b 区中 pn 结以及 b15 行右边光敏元跟 b16 行光敏元之间的 $R-V$ 曲线,其中 b15 行右边光敏元跟 b16 行光敏元之间的间距大于 $50\ \mu\text{m}$,两个光敏元的有效结区范围没有重叠,因此从图中可以得到 b 区的光敏元形成正常的 pn 结,以及两个未连通的光敏元之间的 $R-V$ 特性曲线.图 4(b) 为碲镉汞材料各行两个光敏元之间的 $R-V$ 特性曲线,从图中可以看出,第 b1、b2 行光敏元之间的 $R-V$ 特性曲线为典型的恒定电阻的 $R-V$ 特性曲线,而从第 b3 行开始,光敏元对之间的 $R-V$ 曲线呈现出如 b15-b16 未连通的 $R-V$ 特性.这是因为第 b1 行的光敏元对本身是连通的,可以等效地看成一个恒定电阻;而第 b2 行光敏元对之间的间距约为 $1\ \mu\text{m}$,由 B^+ 注入损伤引起的

有效结区单侧扩展大于 $0.5\ \mu\text{m}$,使得第 b2 行光敏元对的 n 区分布出现重叠,所以第 b2 行光敏元对也可等效看成恒定电阻;第 b3 行之后的光敏元对之间间距的一半大于由 B^+ 注入损伤引起的有效结区单侧扩展,使得两个 n 区的实际分布并没有互相重叠.因此可以得到 B^+ 注入成结的 p 型 HgCdTe 材料有效结区单侧扩展了 $0.5 \sim 1.0\ \mu\text{m}$,有效结区宽度约为 $51 \sim 52\ \mu\text{m}$ ^[13].

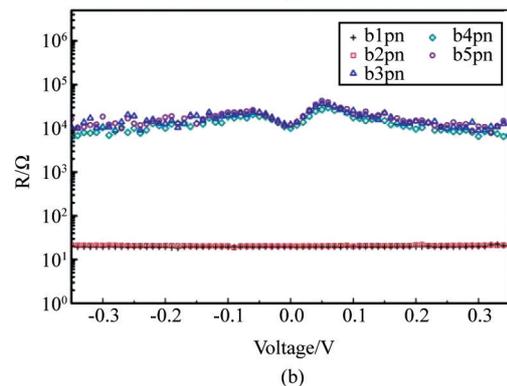
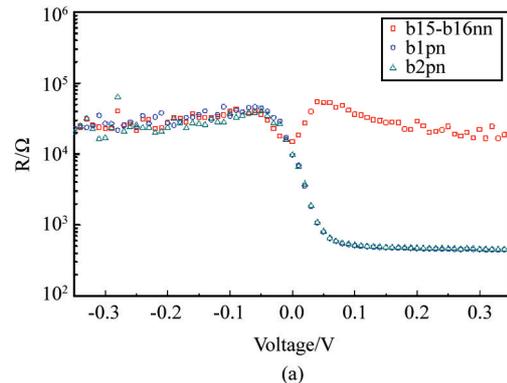


图 4 注入成结样品的 $R-V$ 测试结果 (a) pn 结及 n-p-n 测试结果; (b) 各行光敏元间的测试结果
Fig. 4 The $R-V$ of the implanted samples, (a) the pn junction and photosensitive units, and (b) the photosensitive units

图 5 给出的是 B^+ 注入成结的 p 型 HgCdTe 材料的 LBIC 测试结果.如图 5 所示, $84\ \mu\text{m}$ 处的波谷和 $135\ \mu\text{m}$ 处的波峰对应的是由注入损伤形成的 n 区两个侧面 p-n 结界面,两个 p-n 结界面间距为 $51\ \mu\text{m}$,因此可以得到 B^+ 注入成结的 p 型 HgCdTe 材料有效结区比注入孔扩大的范围约为 $1\ \mu\text{m}$.

$I-V$ 测试结果显示 B^+ 注入成结的 p 型 HgCdTe 材料有效结区宽度约为 $51 \sim 52\ \mu\text{m}$. LBIC 测试结果精度受最小步进影响,显示的有效结区宽度约为 $51\ \mu\text{m}$.通过对比,两种表征方法的结果基本一致,同时,在精度上也相差不大,其中 LBIC 方法可以通过多次测量取平均值来提高测量结果的准确度.

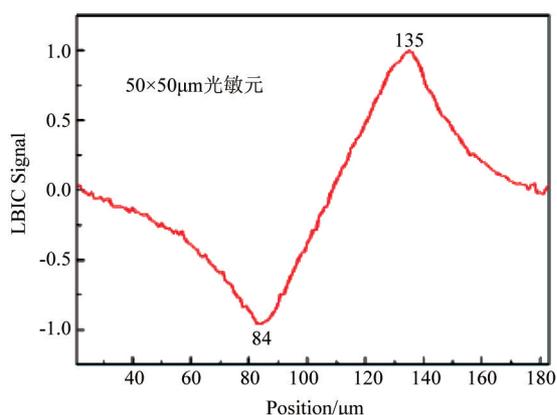


图5 注入成结样品的 LBIC 测试结果
Fig. 5 The LBIC testing result of the implanted sample

图6是通过IBM(ion beam milling)干法刻蚀成结样品的剖面扫描电子照片,图7是样品由液氮温度下 $I-V$ 测试结果计算得来的微分电阻与偏压的关系,即 $R-V$ 曲线. 如图6所示, p 型 HgCdTe 材料经过 Ar^+ 等离子体刻蚀了 10 min, 刻蚀区域是边长为 $50 \mu m$ 的正方形, 形成一个刻蚀坑, 深度约为 $1.8 \mu m$, 刻蚀侧壁倾斜角约为 15.3 度, 刻蚀侧壁附近略有残留. 如图7(a)所示, 刻蚀成结样品的光敏元形成了 pn 结. 图7(b)为碲镉汞材料各行光敏元对之间的 $R-V$ 特性曲线, 第 b1、b14 以及 b15 行光敏元对的 $R-V$ 曲线都表现为典型的恒定电阻 $R-V$ 特性曲线. 因此可以得到每行光敏元对之间的 n 区分布都相互重叠, 而光敏元对之间的最大间距为 $14 \mu m$, 所以由刻蚀损伤造成的有效结区扩大范围大于 $7 \mu m$. 由于结构上设计的光敏元对最大间距为 $14 \mu m$, 因此未能通过 $I-V$ 测试得到刻蚀样品 pn 结结区扩展的精确范围.

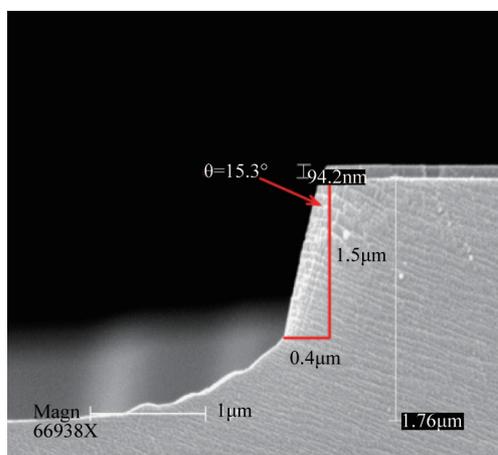


图6 刻蚀成结样品刻蚀边缘
Fig. 6 The etching edges of the etched sample

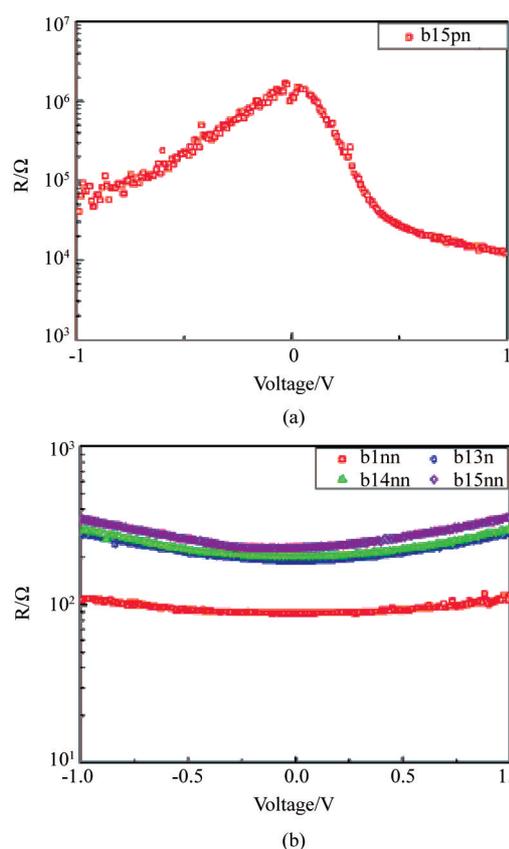


图7 刻蚀成结样品的 $R-V$ 测试结果 (a) pn 结的测试结果 (b) 光敏元之间的测试结果
Fig. 7 The $R-V$ of etched samples, (a) the pn junction and (b) photosensitive units

图8是IBM(ion beam milling)干法刻蚀成结样品的 LBIC 测试结果. 如图8所示, $47 \mu m$ 处波谷和 $117 \mu m$ 处波峰分别对应的是由刻蚀损伤形成的 n 区两个侧面 pn 结界面, 因此刻蚀成结的有效 pn 结宽度约为 $70 \mu m$. 同时, 图8的 LBIC 测试结果在 $57 \mu m$ 处和 $108 \mu m$ 处出现了一对波峰波谷, 宽度约为 $51 \mu m$, 与刻蚀光敏元尺寸一致. 通过与图5对比发现, 干法刻蚀成结与离子注入成结两种方法得到的 pn 结的 LBIC 信号在设计图形边缘区域有明显差异. 而 LBIC 信号的峰值以及轮廓形状是受结深、激光功率和光斑大小等因素影响的^[11]. 因此推论在刻蚀区域边缘的 LBIC 信号大小以及轮廓的变化主要是由三方面原因造成的: 首先是在 IBM 干法刻蚀成结中, 会形成刻蚀坑, 在刻蚀坑、刻蚀侧壁和表面处的结深存在差异, 导致 LBIC 信号和斜率的差异; 其次是根据图6可以发现干法刻蚀样品在图形侧壁上, 由于非选择型刻蚀, 形成了 15.3 度角的倾斜侧壁, 同时在侧壁和底部形成一个弧形过渡区域, 因此激光照射在侧壁和过渡区域时, 由正入射变为斜入

射,被反射的光增加,激光入射到材料内的能量变小,所吸收的能量会有一定减小;再次,激光光斑直径约 $5\ \mu\text{m}$,而底部隆起部分约 $2\ \mu\text{m}$,所以在扫描过程中光斑会部分或全部覆盖该区域,被吸收的激光出现变化,因此 LBIC 信号随覆盖区域不同而变化. 由于结深的变化导致刻蚀坑、侧壁和表面处的 LBIC 信号斜率发生变化,同时,光斑大小、刻蚀侧壁的倾斜以及底部过渡区域的存在,使得在刻蚀侧壁附近约 $5.0\ \mu\text{m}$ 范围内的 LBIC 信号发生不同程度的变化.

根据 LBIC 测试结果计算,刻蚀成结的 p 型 HgCdTe 材料有效结区宽度约为 $70\ \mu\text{m}$,由刻蚀损伤造成的单侧有效结区扩大范围约为 $10\ \mu\text{m}$,大于 I - V 测试设计的结构尺寸. 而根据 I - V 测试结果可以得到样品每行的光敏元对都显示为连通状态,由刻蚀损伤造成的单侧有效结区扩大范围是大于 $7\ \mu\text{m}$.

表 2 给出的是不同尺寸大小的光敏元多次 LBIC 测试的平均值.

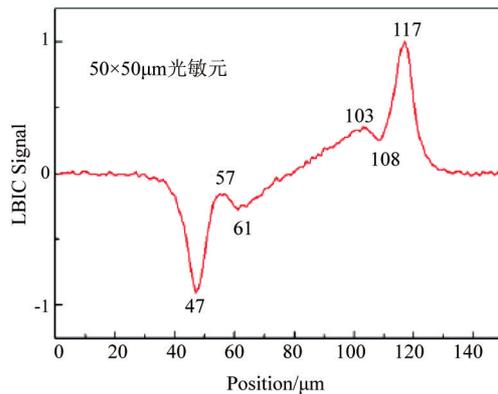


图 8 刻蚀成结样品的 LBIC 测试结果

Fig. 8 The LBIC testing result of the etched sample

表 2 不同光敏元大小的 LBIC 测试结果

Table 2 The LBIC testing result of the different photosensitive units

| 光敏元尺寸/ μm | 有效结区大小/ μm |
|----------------------|-----------------------|
| 50 × 50 | 70 |
| 50 × 100 | 119 |

4 结论

设计了特殊的器件结构,通过 I - V 测试和 LBIC 方法,分别对 B 离子注入和干法刻蚀两种方法形成 n 结的结宽进行了表征. I - V 测试和 LBIC 结果均表明,B 离子注入形成 pn 结的有效结区横向扩展了约 $1.0 \sim 2.0\ \mu\text{m}$. 同时,对干法刻蚀成结进行了表征, I -

V 测试结果表明 pn 结的有效结区横向扩展大于 $7\ \mu\text{m}$,而 LBIC 测试结果表明刻蚀损伤引起的有效结区横向扩展约为 $10\ \mu\text{m}$;同时发现了干法刻蚀成结方法形成的 pn 结在刻蚀区域边缘附近 LBIC 信号出现一对波峰波谷,这可能是由于刻蚀区域结深较浅、刻蚀侧壁倾角、底部堆积以及激光光斑较大等因素使 LBIC 信号减小,但不影响对 pn 结有效结区宽度的判断. 通过对比两种表征方法和两种成结方法的结果,可以发现得到的结果一致,而两种测试方法的测量精度都为 $1\ \mu\text{m}$,因此这两种表征方法在测量 HgCdTe 器件 pn 结结区扩展方面都是可行的,并相互印证.

References

- [1] Hu W D, Chen X S, Ye Z H, *et al.* A hybrid surface passivation on HgCdTe long wave infrared detector with in-situ CdTe deposition and high-density hydrogen plasma modification[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(9):091101-3.
- [2] Hu W D, Chen X S, Yin F, *et al.* Analysis of temperature dependence of dark current mechanisms for long-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(10):104502-104502-8.
- [3] Terterian S, Chu M, Mesropian S, *et al.* A comparative study and performance characteristics of ion-implanted and heterojunction short-wave infrared HgCdTe focal-plane arrays[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2002, **31**(7):720-725.
- [4] Haakenaasen R, Colin T, Steen H, *et al.* Electron beam induced current study of ion beam milling type conversion in molecular beam epitaxy vacancy-doped $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(6):849-852.
- [5] White J, Pal R, Dell J M, *et al.* p-to-n type-conversion mechanisms for HgCdTe exposed to H₂/CH₄ plasmas [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6):762-767.
- [6] Musca C A, Siliquini J F, Smith E P G, *et al.* Laser beam induced current imaging of reactive ion etching induced n-type doping in HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, **27**(6):661-667.
- [7] Hu, W. D. Chen X. S., Ye Z. H., *et al.* Polarity Inversion and Coupling of Laser Beam Induced Current in As-doped Long-wavelength HgCdTe Infrared Detector Pixel Arrays: Experiment and Simulation [J], *Applied Physics Letters*, 101, 181108 (2012).
- [8] Hu, W. D. Chen X. S., Ye Z. H., *et al.*, Dependence of ion-implant-induced LBIC novel characteristic on excitation intensity for Long-wavelength HgCdTe-based Photovoltaic Infrared Detector Pixel Arrays[J], *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 19, 4100107(2013).
- [9] Redfern D A, Smith E P G, Musca C A, *et al.* Interpretation of current flow in photodiode structure using laser beam-induced current for characterization and diagnostics [J]. *IEEE Trans. electron. dev.*, 2006, **53**(1):23-31.
- [10] Musca C A, Redfern D A, Dell J M, *et al.* Laser-beam-induced current technique as a quantitative tool for HgCdTe

photodiode characterization[J]. *Proc Spie*, 1999, 334 - 343.

- [11] Musca C A, Redfern D A, Smith E P G, *et al.* Junction depth measurement in HgCdTe using laser beam induced current (LBIC) [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6): 603 - 610.
- [12] Qiu W. C, Hu W. D.. Laser beam induced current microscopy and photocurrent mapping for junction character-

ization of infrared photodetectors[J]. *Science China Physics Mechanics & Astronomy*, 2014, **58**(2): 1 - 13.

- [13] Qiu W. C, Hu, W. D. Lin T, *et al.*, Temperature-sensitive junction transformations for mid-wavelength HgCdTe photovoltaic infrared detector arrays by laser beam induced current microscope [J]. *Applied Physics Letters*, 105, 191106 (2014)

(上接 53 页)

了 50 mm × 50 mm × 3 大尺寸碲镉汞液相外延材料的批量化生长. 采用这一技术后, 外延材料的面积增大了一倍, 单次生长的材料总面积增加了 50%. 外延工艺采用的 CdZnTe 衬底采用了 Φ120 mm 大直径晶锭生长单晶技术, 衬底缺陷通过后续退火技术进行了改善, 并采用检测技术进行了筛选. 外延工艺加强了对母液的温度均匀性和组分均匀性的控制, 生长出的 HgCdTe 材料的组分和厚度均匀, 组分均方差达到了 0.000 4; 厚度均方差达到了 0.4 μm; 为了实现批量生产, 同一轮次生长的 3 片材料之间的组分偏差 < 0.000 4, 厚度偏差 < 0.1 μm, 不同生长轮次之间材料的组分之间的波动在 ±0.002 左右, 厚度之间的波动在 ±2 μm 左右; 外延材料的晶体双晶衍射半峰宽 (FWHM) < 30", 位错腐蚀坑密度 < 1 × 10⁵ cm⁻², 表面缺陷密度 < 5 cm⁻², X 光貌相显示出的晶格完整性良好. 在 77 K 温度下, Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te 材料的载流子浓度被控制在 8 ~ 20 × 10¹⁵ cm⁻³, 空穴迁移率在 600 cm²/Vs 以上. 材料整体性能和批生产能力已能满足大规模碲镉汞红外焦平面探测器的研制需求.

致谢

作者衷心感谢为衬底生长工艺做出贡献的张诚、沈灏、陆丞、周梅华、王云和储远洋, 为液相外延工艺做出贡献的张娟、陈倩男和朱明星, 以及为工艺设备维护方面做出贡献的祝海彬等人.

References

- [1] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2011, **54**: 136 - 154.
- [2] Yang Jian-Rong. Physics and technology of HgCdTe materials[M], Beijing: National Defense Industry Press (杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术, 北京: 国防工业出版社), 2012: 3 - 7.
- [3] Reibel Y, Rouvie A, Nedelcu A, *et al.* Large format, small pixel pitch and hot detectors at SOFRADIR[J]. *Proc. of SPIE*, 2013, 8896: 88960B - 1 - 11.
- [4] Hanold B J, Figer D F, Lee J, *et al.* Large format MBE HgCdTe on silicon detector development for astronomy[J].

Proc. of SPIE, 2015, **9609**: 96090Y - 1 - 15.

- [5] Becker L. Current and future trends in infrared focal plane array technology[J]. *Proc. of SPIE*, 2005, 5881: 588105 - 1 - 15.
- [6] Gravrand O, Destefanis G, Bisotto S, *et al.* Issues in HgCdTe research and expected progress in infrared detector fabrication[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11): 3349 - 3358.
- [7] Castelein P, Baier N, Gravrand O, *et al.* Latest developments on p-on-n HgCdTe architectures at DEFIR[J]. *Proc. of SPIE*, 2014, **9070**: 90702Y - 1 - 14.
- [8] Wenisch J, Bitterlich H, Bruder M, *et al.* Large-format and long-wavelength infrared mercury cadmium telluride detectors[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, **42**(11): 3186 - 3190.
- [9] Wei Yan-Feng, Chen Xin-Qiang, Cao Wu-Mei. Growth and defects characterization of HgCdTe film grown by LPE method[J]. *Infrared and Laser Engineering* (魏彦锋, 陈新强, 曹妩媚. HgCdTe 液相外延材料生长及缺陷表征. *红外与激光工程*), 2006, **35**(3): 294 - 296.
- [10] Yang Jian-Rong, Zhang Chuan-Jie, Fang Wei-Zheng, *et al.* Te-rich dipping technique of HgCdTe liquid phase epitaxy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (杨建荣, 张传杰, 方维政, 等. 碲镉汞富碲垂直液相外延技术. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(5): 325 - 329.
- [11] Cui Xiao-Pan. Defects in CdZnTe substrates and its effects on the performances of the HgCdTe epilayers[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS (崔晓攀. 碲镉汞衬底缺陷及其对碲镉汞外延材料性能的影响. 上海: 中科院上海技术物理研究所), 2012.
- [12] Sheng F F, Yang J R, Sun S W, *et al.* Influence of Cd-rich annealing on defects in Te-rich CdZnTe materials[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(7): 2702 - 2708.
- [13] Sheng Feng-Feng. Study of characteristics of defects in CdZnTe materials and the annealing technique [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, CAS (盛锋锋. CdZnTe 材料缺陷特性及热处理技术研究. 上海: 中科院上海技术物理研究所), 2014.
- [14] Tobin S P, Smith F T J, Norton P W, *et al.* The relationship between lattice matching and crosshatch in liquid phase epitaxy HgCdTe on CdZnTe substrates[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, **24**(9): 1189 - 1199.
- [15] Rhiger D R, Sen S, Peterson J M, *et al.* Lattice mismatch induced morphological features and strain in HgCdTe epilayers on CdZnTe substrates[J]. *Journal of Electronic Materials*, 1997, **26**(6): 515 - 523.
- [16] Yang Jian-Rong. Annealing technology of HgCdTe epilayers in open chamber(杨建荣. 开管式碲镉汞外延材料热处理方法)[P]. 中国发明专利, 2001, 01131924.0.