

离子束刻蚀碲镉汞中转型宽度

徐国庆^{1,2*}, 刘向阳¹, 王 仍¹, 储开慧¹, 汤亦聃¹, 乔 辉¹, 贾 嘉¹, 李向阳¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:用 Ar^+ 离子束在 p 型 HgCdTe (碲镉汞) 上刻蚀出不同体积的环孔, 利用激光诱导电流方法测试转型后的 n 区宽度. 研究发现, 在相同的刻蚀条件下, n 区宽度取决于材料的汞空位浓度和被刻蚀 HgCdTe 体积. 当被刻蚀 HgCdTe 体积相同时, n 区宽度随汞空位浓度的增加呈线性减小; 当汞空位浓度一定时, n 区宽度随被刻蚀 HgCdTe 体积的增加呈线性增加.

关键词:激光诱导电流; p 型 HgCdTe; Ar^+ 离子束刻蚀; 转型宽度
中图分类号: TN213 **文献标识码:** A

Conductivity type conversion in ion-beam-milled HgCdTe

XU Guo-Qing^{1,2*}, LIU Xiang-Yang¹, WANG Reng¹, CHU Kai-Hui¹, TANG Yi-Dan¹,
QIAO Hui¹, JIA Jia¹, LI Xiang-Yang¹

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: After different loopholes are produced by Ar^+ ion-beam in p-HgCdTe, width of n-type layer has been defined by the electron beam induced current measurement. It can be observed that under the same milling condition, the width of n-type layer depends on both of the mercury vacancy concentration and the volume of the milled-HgCdTe. Further study shows that the width of n-type layer linearly decreases with an increase of the mercury vacancy concentration if volume of the milled-HgCdTe is equal. Meanwhile, the width of n-type layer will linearly increases with volume of the milled-HgCdTe increasing if the mercury vacancy concentration is kept unchanged.

Key words: laser beam induced current, p-HgCdTe, Ar^+ ion-beam milling, conductivity type conversion
PACS: 81.65.Cf

引言

HgCdTe 焦平面探测器仍是国际上红外焦平面探测器的主流. 其中, 采用环孔互连工艺的 HgCdTe 焦平面探测器由于不需要 In 柱互连, 并在发展多色器件方面有着一定的潜力而倍受关注, 目前, 美国 DRS 技术公司、英国 SELEX Galileo 公司等 HgCdTe 红外焦平面器件均采用这一工艺^[14].

环孔工艺的基本机理是当离子束轰击 P 型 HgCdTe 时, 一部分材料被刻除并产生汞原子, 汞原

子扩散进入 HgCdTe 体内, 被 Hg 空位俘获, 从而没有得到补偿的施主杂质在导电载流子中占据了主导地位, 材料发生反型. 国内外学者^[5-8]在离子束刻蚀 HgCdTe 转型方面开展了许多研究工作, 但主要集中在纵向转型方面, 对横向转型的研究较少. 横向转型作为环孔工艺设计的关键, 决定着 n 区宽度及 pn 结的位置, 是环孔器件研究中不可缺少的环节.

激光诱导电流 (LBIC) 方法仅需 2 个远端的接触电极就能判断 p-n 结电学界面位置, 是一种无损的测试方法. 本文利用 Ar^+ 离子束在 p 型 HgCdTe

收稿日期: 2013-04-20, 修回日期: 2014-06-30

基金项目: 国家自然科学基金 (11304335)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (11304335)

作者简介 (Biography): 徐国庆 (1979-), 女, 山东聊城人, 副研究员, 博士研究生, 主要研究领域是碲镉汞红外探测器. E-mail: xuguoqing@mail.sitp.ac.cn.

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

Received date: 2013-04-20, revised date: 2014-06-30

材料上刻蚀出不同体积的环孔,通过 LBIC 测试研究材料的汞空位浓度和被刻蚀 HgCdTe 体积对 n 区宽度的影响.

1 实验

实验中三个组分 $x=0.283$ 的 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料是采用富碲熔区移动法生长,并在汞气氛下退火获得,汞空位浓度分别为 $2.13 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $7.02 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $2.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. 样品经过粗抛、精抛和溴腐蚀之后,热蒸发 1000 \AA 的 ZnS 膜作为钝化层,刻蚀前样品厚度均大于 600 \mu m . 对样品进行 Ar^+ 离子束刻蚀,刻蚀区域为 $\phi 50 \text{ \mu m}$ 、 $\phi 20 \text{ \mu m}$ 和 $\phi 15 \text{ \mu m}$ 的圆形区域,呈周期性分布,周期为 800 \mu m ,刻蚀能量为 400 eV ,束流密度为 0.8 mA/cm^2 ,刻蚀时间为 40 min . 刻蚀结束后,用 HCl 去除样品两端的 ZnS,并离子束溅射 5000 \AA 的 Au 层作为欧姆接触电极. 样品置于液氮制冷的测试杜瓦中,并与测试系统相连,数据采集后由计算机输出.

图 1 是 LBIC 测试系统,它由激光器、斩波器、X—Y 移动台、样品测试位置的 CCD 监控系统、锁相放大器和信号采集、处理与显示的计算机系统等组成. 激光器通过斩波器调制后,入射到样品上,由 CCD 监控系统确定扫描的具体位置,通过 X—Y 移动台控制器控制扫描范围,产生的 LBIC 信号通过锁相放大器放大后,由计算机进行数据采集、图象分析和显示. 其中,氦氖激光器是 632.8 nm 激光线,光斑直径约为 0.5 \mu m ;斩波器采用 EG&G Model 650 系列,斩波频率为 1000 Hz ;X—Y 移动台的步进精度可达 0.1 \mu m . 锁相放大器采用的是 SR830,必要时还需加上低噪声的电流放大器进行初级放大.

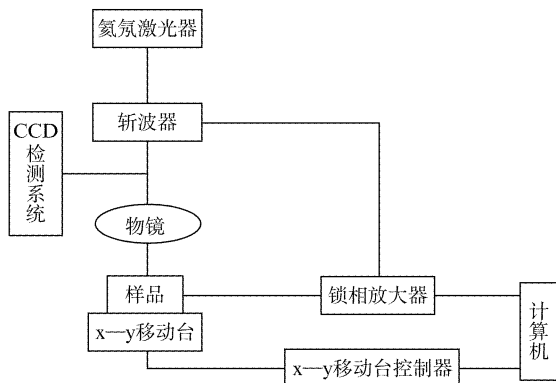


图 1 LBIC 测试系统
Fig. 1 LBIC system

实验采用 OLYMPUS 公司的 OLS 3000 型激光共

聚焦扫描显微镜 (CSLM) 获得环孔三维图像,并测量被刻蚀 HgCdTe 的体积. 该显微镜采用 UV 激光光源,最高分辨率可达 0.12 \mu m ,最大观察范围可达 $2560 \times 2560 \text{ \mu m}$,不仅可以获得二维或三维形态图像,还可进行亚微米级线宽、面积、体积等测量,是一种非破坏性、非接触、无须制样、无须真空的测试方法.

2 结果与讨论

Ar^+ 离子束在 p 型 HgCdTe 上刻蚀环孔的同时,产生汞原子,汞原子向内扩散与材料中剩余施主杂质共同作用,在刻蚀环孔周围形成一个近圆柱形 p-n 结,所以,环孔周围近表面的横向电场强度分布是不均匀的. 进行 LBIC 测试时,让激光沿着刻蚀环孔的直径方向做单向扫描,采集各个位置的 LBIC 信号. 当激光入射到横向电场强度最大的 p-n 结界面时,光生载流子直接被该处的内建电场分开产生最大的 LBIC 信号. 当激光偏离 p-n 界面时,产生的光生载流子只有在扩散到该位置两侧的 p-n 结界面后才能被内建电场分开,而两侧界面处的电场强度方向相反,产生的 LBIC 信号因为方向不同而部分被抵消,采集的 LBIC 信号相对较小. 因此, LBIC 曲线中峰值位置对应的是 p-n 结界面,即 n 区宽度.

如图 2 所示,刻蚀出 $\phi 20 \text{ \mu m}$ 环孔后形成的 p-n 结截面图及对应的 LBIC 曲线,其中,样品汞空位浓度为 $2.13 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. 刻蚀出 $\phi 20 \text{ \mu m}$ 环孔后,对应的 LBIC 曲线中有两个明显的峰值,分别在 100 \mu m 和 225 \mu m . 由于 p-n 结界面处电场强度最大, LBIC 信号最强,所以这两个峰值位置对应的是环孔两侧 p-n 结界面,其差值 (125 \mu m) 即为刻蚀后形成的 n

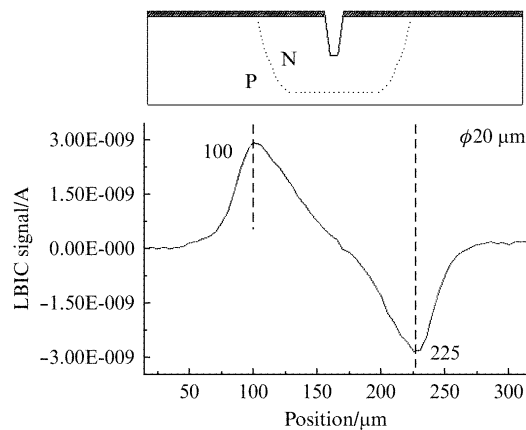


图 2 刻蚀出 $\phi 20 \text{ \mu m}$ 环孔后的 p-n 结截面图及对应的 LBIC 曲线
Fig. 2 Cross sectional view of p-n junction for the loop-hole of $\phi 20 \text{ \mu m}$ and the corresponding LBIC profile

区宽度. 本实验在相同组分,不同汞空位浓度的 p 型 HgCdTe 材料上刻蚀出不同体积的环孔,研究材料的汞空位浓度和被刻蚀 HgCdTe 体积对 n 区宽度的影响.

2.1 n 区宽度与汞空位浓度的关系

p 型 HgCdTe 的转型是由于刻蚀出的汞原子向体内扩散,被体内的 Hg 空位俘获而发生的. 所以,转型后 n 区宽度的大小与扩散进入体内的汞原子数以及材料的汞空位浓度密切相关.

为了分析 n 区宽度与汞空位浓度的关系,实验在相同刻蚀条件下进行,并在相同组分、不同汞空位浓度的材料上刻蚀出相同体积的 HgCdTe,可认为刻蚀出的汞原子数是相同的,假设向体内扩散的有效汞原子系数相同^[9],则扩散进入体内的汞原子数是相同的. 为确保数据的准确性,在材料的不同位置对相同体积的环孔进行 LBIC 测试,并统计 n 区宽度. 图 3 给出了不同体积的环孔对应的 n 区宽度随汞空位浓度的变化曲线. 从图中可以观察到,刻蚀出相同体积的 HgCdTe, n 区宽度随汞空位浓度的增加而减小,说明 p 型 HgCdTe 汞空位浓度越大,发生转型需要的汞原子数就越多,因此,当进入体内的汞原子数一定时, n 区宽度会随着汞空位浓度的增加而减小. 另外,从 $\phi 50 \mu\text{m}$ 、 $\phi 20 \mu\text{m}$ 和 $\phi 15 \mu\text{m}$ 环孔对应的 n 区宽度来看,尽管被刻蚀 HgCdTe 体积不同,但 n 区宽度随汞空位浓度的变化趋势是基本一致的,说明尽管刻蚀的 HgCdTe 汞空位浓度不同,但 n 区宽度与被刻蚀 HgCdTe 体积之间存在着相同的比例关系.

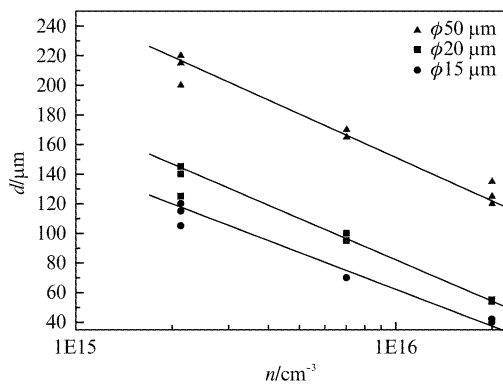


图3 n 区宽度与汞空位浓度的关系
Fig. 3 Relationship between the width of n-type layer and the mercury vacancy concentration

2.2 n 区宽度与被刻蚀 HgCdTe 体积的关系

被刻蚀 HgCdTe 体积决定着扩散进入体内的汞原子数,从而影响转型后 n 区宽度. 在同一片材料

上,利用激光共聚焦显微镜扫描环孔轮廓,并借助自带软件计算体积,分析 n 区宽度与被刻蚀 HgCdTe 体积之间的关系.

图 4 是激光共聚焦显微镜测得的环孔轮廓图,样品的汞空位浓度为 $2.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$. 其中,图 4 (a)、(b)和(c)分别是 $\phi 50 \mu\text{m}$ 、 $\phi 20 \mu\text{m}$ 和 $\phi 15 \mu\text{m}$ 的环孔轮廓.

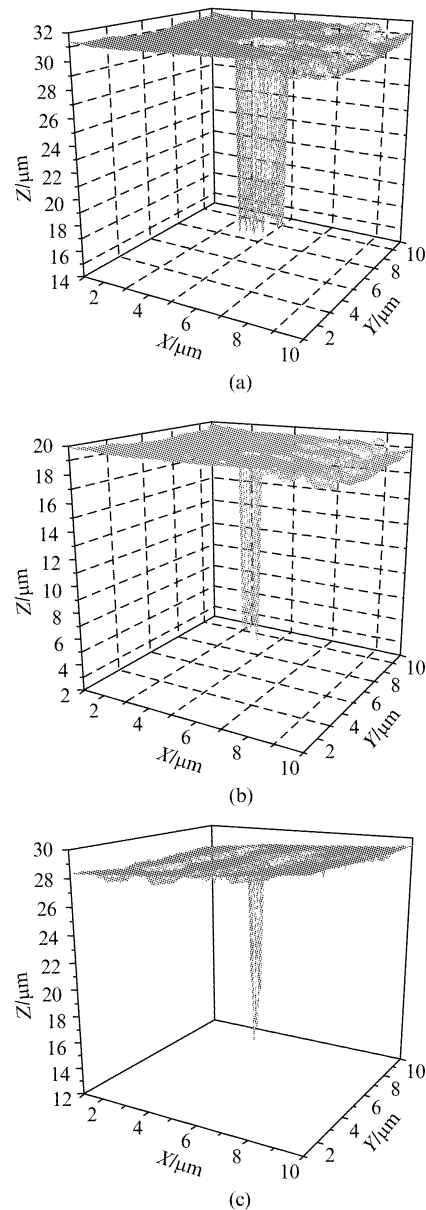


图4 刻蚀出的环孔轮廓图 (a) $\phi 50 \mu\text{m}$ (b) $\phi 20 \mu\text{m}$ (c) $\phi 15 \mu\text{m}$
Fig. 4 Outline drawing of the milled-loop-hole, (a) $\phi 50 \mu\text{m}$, (b) $\phi 20 \mu\text{m}$, and (c) $\phi 15 \mu\text{m}$

从轮廓上看, $\phi 50 \mu\text{m}$ 和 $\phi 20 \mu\text{m}$ 的环孔开口宽度略大于底部沟槽宽度,整体轮廓似倒立圆台,

$\phi 15 \mu\text{m}$ 环孔中沟槽的剖面呈 V 字形, 整体轮廓似圆锥, 且每个环孔的深度基本都为 $14 \mu\text{m}$, 说明在同一刻蚀条件下, 刻蚀速率相同. 利用激光共聚焦显微镜多点扫描, 计算各个环孔的体积, 并进行 LBIC 测试, 提取 n 区宽度. 图 5 是 n 区宽度与被刻蚀 HgCdTe 体积的关系曲线. 随着被刻蚀 HgCdTe 体积的增加, n 区宽度呈线性增加, 推测是由于被刻蚀 HgCdTe 体积与扩散进入体内的汞原子数之间存在比例关系, 而扩散至体内的汞原子数又与 n 区宽度线性相关, 使被刻蚀 HgCdTe 体积与 n 区宽度之间呈线性变化关系.

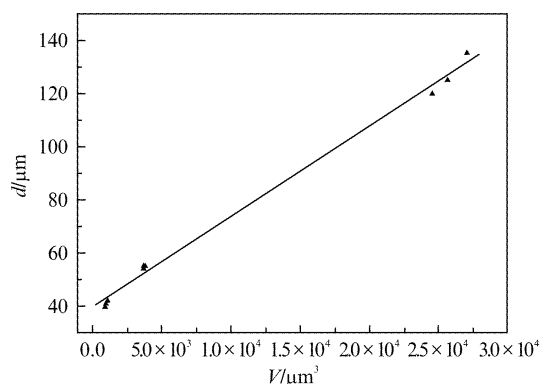


图 5 n 区宽度与被刻蚀 HgCdTe 体积的关系
Fig. 5 Relationship between the width of n-type layer and the volume of the milled-HgCdTe.

3 结论

借助 LBIC 测试, 研究了转型后 n 区宽度与材料的汞空位浓度和被刻蚀 HgCdTe 体积的关系, 发现

在相同的刻蚀条件下, p 型 HgCdTe 的汞空位浓度和被刻蚀 HgCdTe 体积是影响转型的关键因素, 并分别给出了 n 区宽度与 p 型 HgCdTe 的汞空位浓度以及被刻蚀 HgCdTe 体积的线性对应关系.

References

- [1] BAKER I M, CRIMES G J, PARSONS J E, *et al.* CdHgTe-CMOS hybrid focal plane arrays—a flexible solution for advanced infrared systems [J]. *SPIE*, 1994, **2269**: 636–647.
- [2] AQARIDEN F, DREISKE P D, KINCH M A, *et al.* Development of molecular beam epitaxially grown $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ for high-density vertically-integrated photodiode-based focal plane arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, **36** (8): 900–904.
- [3] DREISKE P D. Development of two-color focal-plane arrays based on HDVIP [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, **5783**: 325–330.
- [4] DSOUZA A I, STAPELBROEK M G, YONEYAMA C, *et al.* SWIR HgCdTe HDVIP detectors MTF monte carlo modeling and data [J]. *Proc. of SPIE*, 2010, **7660**: 76600Q1–76600Q6.
- [5] IVANOV-OMSKII V I, MIRONOV K E, MYNBAEV K D, *et al.* $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ doping by ion-beam treatment [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**: 634–637.
- [6] IZHININ I I, IZHININ A I, KURBANOV K R, *et al.* P-to-n ion beam milling conversion in specially doped $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [J]. *SPIE*, 1993, **2269**: 636–647.
- [7] HAAKENAASEN R, MOEN T, COLIN T, *et al.* Depth and lateral extension of ion milled pn junctions in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ from electron beam induced current measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91** (1): 427–432.
- [8] BERCHENKO N N, BOGOBOYASHCHYY V V, IZHININ I I, *et al.* Conductivity type conversion in p-CdxHg1-xTe [J]. *Opto-Electronics Review*, 2003, **11** (2): 93–98.
- [9] Yao Ying. Mechanism analysis of P-HgCdTe ion milling junction [J]. *Infrared Technology* (姚英. P 型 HgCdTe 离子刻蚀成结机理分析. *红外技术*), 2007, **29** (2): 71–75.