

文章编号:1001-9014(2005)06-0459-04

激光束诱导电流在 HgCdTe 双色探测器 工艺检测中的应用

叶振华, 胡晓宁, 蔡炜颖, 陈贵宾, 廖清君, 张海燕, 何力
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:报道了激光束诱导电流(LBIC)在碲镉汞(HgCdTe)红外双色探测器工艺检测中的应用. 通过 LBIC 测试, 发现 p 型 HgCdTe 材料由 B⁺ 离子注入损伤形成的 n 区面积大于其注入面积, 并获得 n 区横向的精确分布. 同时, 运用 LBIC, 获得了 p 型 HgCdTe 材料因不同能量的等离子体干法刻蚀诱导的刻蚀台面侧壁工艺损伤形成的 n 区横向分布, 并得到了 n 区横向宽度与等离子体能量的关系.

关键词:激光束诱导电流; HgCdTe; 干法刻蚀; 双色探测器
中图分类号: TN4 **文献标识码:** A

APPLICATION OF LASER BEAM INDUCED CURRENT FOR TECHNOLOGY DETECTING OF HgCdTe TWO-COLOR DETECTOR

YE Zhen-Hua, HU Xiao-Ning, CAI Wei-Ying, CHEN Gui-Bin,
LIAO Qing-Jun, ZHANG Hai-Yan, HE Li

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The application of laser beam induced current(LBIC) for the technology detecting of Mercury-Cadmium-Telluride (HgCdTe) infrared two-color detector was presented. By LBIC test, it was found that the area of n-type region derived from p-type HgCdTe having been implanted by Boron ion was larger than the area to be implanted, and the precise transversal distribution of this n region was also obtained. At the same time, the transversal distributions of plasma etching induced n-type doping HgCdTe from p-type material among the side wall of etched mesa was obtained, and the relation between the transversal width of this n-type region and the energy of etching plasma was also achieved.

Key words: LBIC; HgCdTe; dry etching; two-color detector

引言

近年来, 由于双色探测器在战略和战术上具有重大的意义, 所以集成同时模式的 HgCdTe 红外双色探测器在国内外得到了快速发展^[1-2].

通常的 HgCdTe 双色器件, 其纵向上的第二个 p-n 结是由离子注入获得的, 且各光敏元是由干法刻蚀来分离^[3]. 但是, p 型 HgCdTe 材料在 B⁺ 离子注入后, 由注入损伤形成的 n 区的面积大于注入孔的面积^[4-5]. 干法刻蚀会对 HgCdTe 材料造成损伤, 如刻蚀坑侧壁和底部的 p 型材料会因刻蚀损伤而变成 n 型^[6-8]. 这些都给设计和制备双色探测器带来

很大的困难.

所以, 在制备双色探测器时, 一种能获得因离子注入或干法刻蚀而形成的 n 区精确分布的工艺检测手段, 就显得尤为重要. 而 LBIC (laser beam induced current) 方法作为一种无损伤的测试手段^[9-12], 非常适合于这一应用. 它仅需 2 个远端接触电极, 就能探测材料或器件由工艺损伤而导致的电场不均匀分布, 从而可以判断工艺损伤导致的电学界面位置.

本文作为双色探测器的研制基础, 我们对 p 型 HgCdTe 材料在离子注入和各种干法刻蚀后的样品进行了 LBIC 检测, 得到这两种工艺损伤而引起的 n 区横向分布. 同时, 我们比较了样品在退火前、后的

收稿日期: 2004-12-18, 修回日期: 2005-05-18

Received date: 2004-12-18, revised date: 2005-05-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程(KGCX-SWJG-06)和国家自然科学基金创新群体(60221502)资助项目

作者简介: 叶振华(1977-), 男, 江西玉山人, 博士研究生, 主要从事红外探测器的研究.

LBIC 测试结果,发现这种干法刻蚀导致的电学界面在退火后没有明显移动,而离子注入形成的 n 区则进一步扩大.最后,获得了不同的刻蚀能量、组分与台面侧壁损伤形成的 n 区横向宽度的关系.

1 LBIC 的基本原理及其测试系统

LBIC 测试是通过获取激光诱导电流与样品空间位置的关系,来确定样品电场的空间分布情况^[9-12].入射激光聚焦到样品的某位置就会产生光生载流子,而它们快速地扩散且被不均匀分布的电场分开,于是在 2 个远端电极间就能检测到该位置的 LBIC 信号电流.所以,它是一种无损伤的、高分辨率的、方便的且能获取整个样品电场的空间分布的测试方法.

图 1 所示是 LBIC 测试系统,它由激光器、斩波器(chopper)、X-Y 可动平台、样品测试位置的 CCD 监控系统、LBIC 信号的锁相放大器和信号采集、处理与显示的计算机系统等组成.其中,激光器是 CW He-Ne 的 632.8nm 激光线,光斑直径约为 0.5 μm ;斩波器采用 EG&G Model 650 系列,斩波频率为 1000Hz;X-Y 移动平台的步进精度可达 0.1 μm .在测试时,采用锁相(SR830 DSP lock-in amplifier,探测灵敏度达 fA 量级)检测技术,必要时还需加上低噪声的电流放大器进行初级放大.

2 测试样品的制备

本文的 LBIC 测试样品都是由分子束外延(Molecular Beam Epitaxy)技术生长的 p 型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料加工而成的,它们共有三类:

1. 离子注入的样品,其单元剖面如图 2(a)所示.它由 p 型 HgCdTe 材料,经 B^+ 注入形成 n 区,再

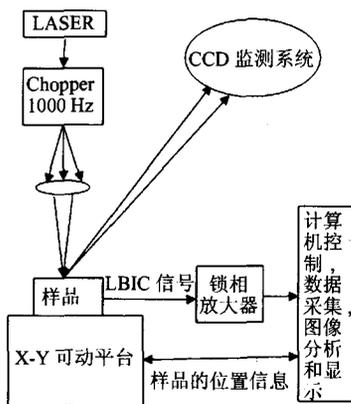


图 1 LBIC 测试系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of LBIC test system

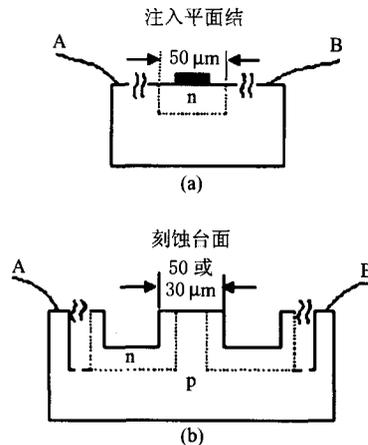


图 2 LBIC 测试样品示意图

(a) 注入的样品;(b) 刻蚀的样品

Fig. 2 The structure configuration of the test samples

(a) implanted sample (b) etched sample

在注入孔中间的一个边长为 40 μm 的正方形区域内,镀一层金,然后在样品边缘未注入的 p 型材料的上表面,引出两个远端的 LBIC 测试电极 A、B 后得到的.在电极 A 和 B 之间,是周期排列的、间距为 42 μm 、边长为 50 μm 的正方形注入孔.

2. IBM (ion beam milling) 干法刻蚀的样品,其单元剖面如图 2(b)所示.它由 p 型 HgCdTe 材料,经 IBM 干法刻蚀,然后在样品边缘未刻蚀的 p 型材料的上表面,引出 2 个远端的 LBIC 测试电极 A、B 后得到的.在电极 A 和 B 之间,是周期排列的、间距为 42 μm 、边长为 50 μm 的正方形刻蚀台面.

3. ICP (inductively coupled plasma) 反应离子刻蚀的样品,其结构与 IBM 干法刻蚀的样品类似,单元剖面如图 2(b)所示.它由 p 型 HgCdTe 材料,经 ICP 反应离子刻蚀,然后在样品边缘未刻蚀的 p 型材料的上表面,引出两个远端的 LBIC 测试电极 A、B 后得到的.同样,在电极 A 和 B 之间,是周期排列的,间距为 26 μm 边长为 30 μm 的正方形刻蚀台面.

3 实验结果和讨论

在采用 LBIC 方法测试如图 2 所示的样品时,让激光束沿着 2 个远端电极 A、B 之间的直线作单向扫描,并实时采集各个位置的激光束诱导电流信号.

离子注入损伤能使 p 型 HgCdTe 材料变成 n 型;IBM 和 ICP 干法刻蚀,也会造成工艺损伤,从而诱导 p 型 HgCdTe 材料变成 n 型^[6-8],并出现应用该机理制备的 HgCdTe 光伏探测器^[13].所以,离子注入和干法刻蚀的样品,其近表面的横向电场强度分布都是不均匀的.如图 2(a) 和图 2(b) 所示,在注

入的 n 区或刻蚀的台面,其两侧的 p-n 结界面处电场强度绝对值最大,但方向相反,而其它位置的电场强度为零.当激光束入射到横向电场强度最大的界面时,光生载流子直接被该处的内建电场分开而产生最大的 LBIC 信号.若 p-n 结界面的横向电场强度方向相反,则它们的 LBIC 信号的符号也正好相反.而当激光束入射位置偏离侧向 p-n 结界面时,光生载流子只有在扩散到该位置两侧的 p-n 结界面后才能被样品的内建电场分开.但两侧界面处的电场强度方向相反,产生的 LBIC 信号因符号不同而部分被抵消,这样采集到的 LBIC 信号就相对会较小,并且 LBIC 信号的正负是由离入射位置较近的界面横向电场强度方向决定的.又因为注入 n 区和刻蚀台面在 A、B 之间是周期排列的,所以,我们样品的 LBIC 信号与位置的关系,都类似于周期变化的正弦曲线,峰值位置对应于侧面 p-n 结界面,周期等于样品注入孔或刻蚀台面在 AB 方向上的出现周期.

图 3 是组分为 $x=0.3059$ 的 p 型 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料,在离子注入后的 LBIC 测试结果.如图 3 所示,它类似于正弦曲线,且周期约为 $92\mu m$,正好等于注入孔的边长与注入孔的间距之和. $2255\mu m$ 处的波峰和 $2310\mu m$ 处的波谷对应着一个由 B+ 注入形成的 n 区的 2 个侧面 p-n 结界面,在它们中间且 LBIC 信号为零的部分,正好对应于镀有金的区域.这是因为激光照射在镀有金的区域时,其能量都被金属吸收,而没有在 HgCdTe 材料上产生电子-空穴对,所以不产生 LBIC 信号. n 区 2 个侧面 p-n 结界面的间距平均值约为 $54.5\mu m$,而注入孔的边长只有 $50\mu m$,所以,由离子注入损伤形成的 n 区边长比注入孔的大,并有 $4\sim 5\mu m$.其它 MBE 技术或 LPE 技术生长的、不同组分的 HgCdTe 样品,也得到近似的结果.

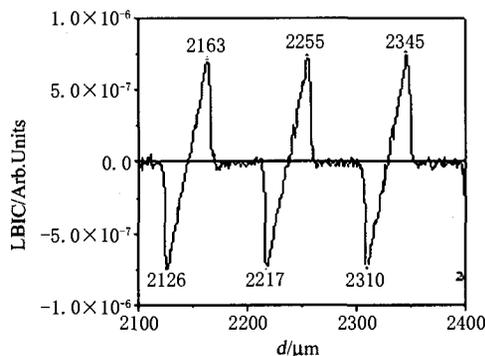


图 3 离子注入后样品的 LBIC 测试结果
Fig. 3 The LBIC testing result of the ion implanted sample

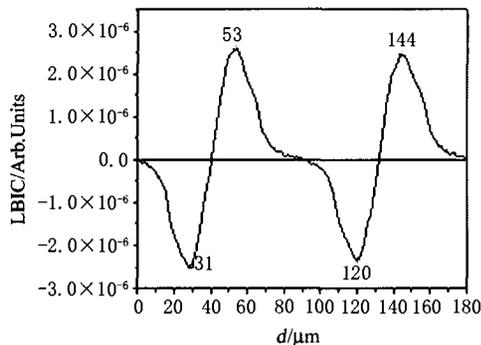


图 4 IBM 刻蚀后样品的 LBIC 测试结果
Fig. 4 The LBIC testing result of the IBM etched sample

图 4 是 IBM 刻蚀后样品的 LBIC 测试结果.该样品是 p 型 HgCdTe 材料,经能量为 $156eV$ 的 Ar^+ 等离子体刻蚀了 $40min$ 获得的.如图 4 所示, $144\mu m$ 处的波峰和 $120\mu m$ 处的波谷正好为一个台面上由刻蚀损伤而形成的 2 个侧面 p-n 结界面,即如图 2 (b)所示的一个台面的 2 个侧面虚线位置.由于台面的边长为 $50\mu m$,而 2 个侧面 p-n 结界面间的距离约为 $24\mu m$,所以在上述条件下刻蚀损伤造成了台面的每一侧有 $13\mu m$ 宽的 n 区.

图 5 是台面侧壁 n 区宽度与等离子体能量的关系,这些样品都是由组分相同的材料,在不同 Ar^+ 能量的 IBM 刻蚀后得到的.台面侧壁 n 区宽度是由 Ar^+ 能量决定的,等离子体能量大,台面损伤致使的 n 层就越宽.不同组分的 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料,在相同的条件下(如 Ar^+ 能量为 $350eV$,束流 $51mA$,中和束流 $68mA$,束流密度 $0.19mA/cm^2$,相同的刻蚀时间)进行了 IBM 刻蚀,发现随着组分 x 的增大,台面侧壁 n 区宽度略有减少.同时,这种台面侧壁损伤导致的 n 层厚度,在刻蚀 $1min$ 以后,基本上不再变化了.

图 6 是 ICP 反应离子刻蚀后的 LBIC 测试结果,样品是由 p 型 HgCdTe 材料,经刻蚀后得到的.刻蚀采用了 Oxford ICP 180 反应离子刻蚀仪器,反应气体为 $CH_4/H_2/N_2/Ar$,等离子体能量为 $45eV$,刻蚀 $50min$.如图 6 所示, $160.6\mu m$ 处的波峰和 $139.6\mu m$ 处的波谷正好为一个台面上由刻蚀损伤而形成的 2 个 p-n 结界面,且它们之间的距离约为 $21\mu m$.由于台面的边长为 $30\mu m$,所以台面在上述条件下刻蚀造成了台面每一侧有 $4.5\mu m$ 宽的 n 区.

为了考察离子注入和干法刻蚀导致材料损伤是否可修复或减少,我们进行了退火实验.在氮气气氛下高温退火后,再进行 LBIC 测试,发现离子注入的样品,其 n 区边长又增加了 $2\sim 3\mu m$;而干法刻蚀

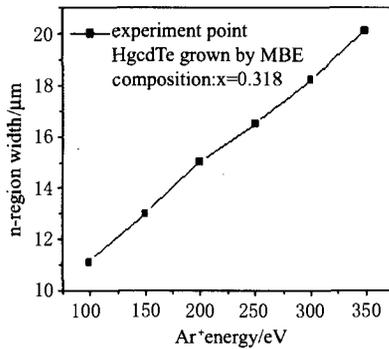


图5 不同离子能量的 IBM 刻蚀后样品的 n 区宽度
Fig. 5 The n-region width after IBM etching with different plasma energy

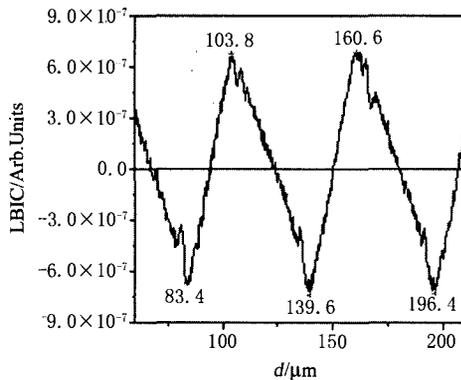


图6 ICP 反应离子刻蚀后样品的 LBIC 测试结果
Fig. 6 The LBIC testing result of the ICP reactive ion etched sample

样品的 LBIC 曲线形状基本不变,且峰值位置没有任何变化,这说明损伤导致的 p-n 结界面没有明显的移动.所以仅通过退火,不能消除这类的干法刻蚀导致的工艺损伤.

4 结语

通过 LBIC 测试,发现 p 型材料在离子注入后形成的 n 区边长要比注入孔的大 $4 \sim 5 \mu\text{m}$,且在高温退火后,n 区边长再增加 $2 \sim 3 \mu\text{m}$.得到了各种干法刻蚀工艺侧壁损伤而形成的 n 区分布,但干法刻蚀的样品即使在高温退火后,台面侧壁损伤的电学界面位置依然不变.所以,在设计双色器件时,第二个注入区面积必须小于预期的 n 区面积.为了得到低损或无损的台面,必须进一步改进工艺,尽量减少等离子体的能量.在研究干法刻蚀工艺时,还获得了台面侧壁的 n 区宽度与刻蚀的等离子体能量的关系.

所以, LBIC 技术作为一种无损而又极其方便的测试手段,在研制 HgCdTe 双色探测器时,将会发挥很大的作用.

REFERENCES

- [1] Antoni Rogalski. Dual-band infrared focal plane arrays [J]. *SPIE*, 2000, **4340**:1—14.
- [2] YE Zhen-Hua, WU Jun, HU Xiao-Wing, *et al.* Study of integrated MW1/MW2 two-color HgCdTe infrared detector arrays [J]. *J. Infrared Millim Waves* (叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 集成式 HgCdTe 红外双色探测器阵列. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3):193—196.
- [3] Zanatta J P, Ferret P, Loyer R, *et al.* Single and two color infrared focal plane arrays made by MBE in HgCdTe [J]. *SPIE*, 2000, **4130**:441—451.
- [4] Terterian S, Chu M, Mesropian M, *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.
- [5] Ebe H, Tanaka M, Miyamoto Y. Dependency of p-n junction depth on ion species implanted in HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6):854—857.
- [6] Haakenaasen R, Colin T, Steen H. 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.
- [7] White J, Pal R, Dell J M, *et al.* P-to-n type-conversion mechanisms for HgCdTe exposed to H_2/CH_4 plasmas [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, **30**(6):762—767.
- [8] Musca C A, Siliquint J F, Smith E P G, *et al.* Laser beam induced current image of reactive ion etching induced n-type doping in HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1998, **27**(6):661—667.
- [9] Fynn K A, Faraone L. Laser beam induced current(LBIC) spatial imaging as a characterization tool for infrared HgCdTe materials and devices [J]. *SPIE*, 1995, **2552**:134—145.
- [10] Bajaj J, Tennant W E, Zucca R, *et al.* Spatially resolved characterization of HgCdTe materials and devices by scanning layer microscopy [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1993, **8**:872—887.
- [11] JIA Jia, CHEN Gui-Bin, GONG Hai-Mei, *et al.* Study on the junctions of swir HgCdTe photo diodes at room temperature with laser vean ubdyced cyrrrent [J]. *J. Infrared Millim waves* (贾嘉, 陈贵宾, 龚海梅, 等. 室温短波碲镉汞结区的 LBIC 方法研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1):11—14.
- [12] Musca C A, Redfern D A, *et al.* Junction depth measurement in HgCdTe using laser beam induced current(LBIC) [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1999, **28**(6):603—610.
- [13] Antoszewski J, Musca C A, Dell J M. Characterization of HgCdTe n on p-type structures obtained by reactive ion etching induced p-to-n conversion [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(6):837—840.