

# 质子注入 MBE 碲镉汞 n-on-p 结性能研究<sup>\*</sup>

陈贵宾<sup>1,2)</sup> 李志锋<sup>1)</sup> 蔡炜颖<sup>1)</sup> 何力<sup>1)</sup> 胡晓宁<sup>1)</sup> 陆卫<sup>1)</sup> 沈学础<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室,上海 200083)

<sup>2)</sup>中国科学院上海微系统与信息技术研究所离子束开放研究实验室,上海 200050)

(2002 年 7 月 9 日收到,2002 年 10 月 31 日收到修改稿)

基于中波响应波段的分子束外延碲镉汞薄膜材料成功制备出不同质子注入剂量的大光敏元(500 $\mu\text{m}$  × 500 $\mu\text{m}$ )的 n-on-p 结构的 p-n 结,并对相应的 p-n 结的电流-电压(I-V)特性进行了研究.质子注入剂量为  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  时  $R_0 A$  达  $312.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,低温热处理后达  $490 \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

关键词: I-V 特性,碲镉汞薄膜,质子注入, p-n 结

PACC: 7340L, 6170T, 1420E

## 1. 引 言

碲镉汞( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , MCT)是一种 II-VI 族混晶半导体材料,通过调节其组分值  $x$  可以连续调节这种材料的禁带宽度(0—1.6eV),即选择具有不同  $x$  的该种材料可制成对应于红外波段三个重要大气窗口(1—3 $\mu\text{m}$ , 3—5 $\mu\text{m}$ , 8—14 $\mu\text{m}$ )的红外光子探测器.同时,由于 MCT 材料具有较快的响应速度、高的量子效率且可以在液氮温度以上工作而受到人们的普遍关注,  $\text{HgCdTe}$  已经成为制作高性能红外探测器最重要的半导体材料<sup>[1]</sup>.随着红外成像系统的发展,对碲镉汞红外探测器件的要求也由单元向多元焦平面阵列(FPA)方向发展.目前,分子束外延(MBE)、液相外延(LPE)及金属有机化学气相外延(MOVPE)等多种技术可进行 MCT 薄膜材料的生长,由于 MBE 技术在超高真空环境中进行,这在很大程度上降低界面处的粘污,且生长温度低,可通过改变生长条件(如束流比)以生长不同组分  $x$  的外延薄膜,使以 MCT 薄膜制备为基础的红外焦平面阵列探测器得到了发展<sup>[2,3]</sup>.

MCT 红外探测器主要有两种类型:光导型和光伏型.由于光伏型探测器具有响应速度快、功耗小、便于大规模集成等优点而受到人们的重视.光伏型

探测器的核心结构是 p-n 结,形成 p-n 结的方法有很多种,主要采用离子注入技术<sup>[2,4,5]</sup>、汞扩散法<sup>[6]</sup>等,国外还有采用原位掺杂形成异质结<sup>[3,7]</sup>.制备碲镉汞 n-on-p 结时,采用非掺杂 p 型衬底,用硼离子注入形成平面结,许多研究认为成结是个与离子注入损伤相关的过程, B 离子注入 MCT 并不是因为注入离子作为活性施主形成 n 型区,而主要是由于注入损伤造成电活性缺陷自由 Hg 原子的扩散,导致材料中空位浓度的变化<sup>[8]</sup>.在这种制备工艺中,成结工艺简单,通常不需要高温过程,有时采用低温热退火使 p-n 结区从由注入导致的高损伤区域向损伤相对较小的区域移动,来提高结的性能.近年来的研究还表明,在 MCT 中引入质子后会有效地改善 p-n 结特性<sup>[9]</sup>.为此本文试图直接用质子取代传统工艺中的 B 离子注入,研究由质子注入形成的 p-n 结特性.

## 2. MCT 的 n-on-p 结构 p-n 结制备

实验中所用的 MCT 薄膜材料来自系列样品 Gamet931,它是用(211)GaAs 材料作为衬底,在 Riber 32P 分子束外延系统中生长,其中的碲镉汞薄膜的厚度为 15.4 $\mu\text{m}$ , 碲的组分  $x = 0.303$ .

p-n 结的成结采用了标准的工艺,具体为碲镉汞材料经表面处理(清洗、腐蚀等工艺)后,光刻出

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10074068, 60244002)和国家重点基础研究项目(批准号:G1998061404)资助的课题.

500 $\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  注入区,然后进行质子注入.质子注入选用的参数为注入能量 150keV,剂量(2—6) $\times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ ,质子注入过程在室温完成.为了防止样品损坏和样品温度升高,质子注入时的束流控制在 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下.我们利用 ZnS 膜作钝化膜,蒸镀金薄膜作欧姆接触电极(电极尺寸 220 $\mu\text{m} \times 220\mu\text{m}$ ),并生长 9—10 $\mu\text{m}$  高度的钢柱后即进行 p-n 结的电流-电压 ( $I-V$ ) 性能测试.

### 3. 实验结果及讨论

器件的  $I-V$  特性采用冷探针方法进行测量,数据由计算机采集,获得的数据经一阶微分后可直接得到器件的微分电阻值.测试温度为 77K.

图 1 为  $I-V$  特性.我们测量了制备在同一片材料上的标记为 H1 $\#$ 、H2 $\#$  和 H3 $\#$  的单元,三个单元的质子注入剂量分别为  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 、 $4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 、 $6 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ ,如图 1(a)(c) 分别给出了 H1 $\#$  和 H2 $\#$  的  $I-V$  特性曲线,同时我们还测量用白炽灯对器件作正面照射条件下的  $I-V$  曲线,如图 1(b)(d) 所示.

由于测量采用冷探针法直接测量,测量得到的  $I-V$  数据不非常光滑,所以直接通过一阶微分得到的动态电阻值会较敏感地受噪声扰动.为了避免或减小对噪声扰动的敏感性,在数据处理上利用二次函数

$$I = a + bV + cV^2. \quad (1)$$

对  $-0.04\text{V}$  到  $0.06\text{V}$  范围内的  $I-V$  曲线进行拟合.根据拟合结果可以获得器件的微分电阻值  $R_0$  为  $b^{-1}$ .由于在  $-0.04$  到  $0.06\text{V}$  范围内有 50 个数据点,也就是说采用拟合方法所得到的  $R_0$  是同时参考了零电压附近 50 个实验数据而得出的值,所以受到测量噪声的影响相对直接微分获得  $R_0$  的方法要小得多.另外,通过分别对有与无白炽灯对器件正面照射条件下测量的  $I-V$  曲线数据进行拟合,可以得到在白炽灯照明下  $I-V$  曲线向负电流方向移动的量,即可获得器件的红外响应的相对大小(可由(1)式中  $a$  定出).从表 1 可以看出,随注入剂量增大, $R_0$  值从  $10^5$  减小到  $10^3$  量级,相应的优值因子  $R_0 A$  从  $312.5\Omega \cdot \text{cm}^2$  变为  $13.6\Omega \cdot \text{cm}^2$ .

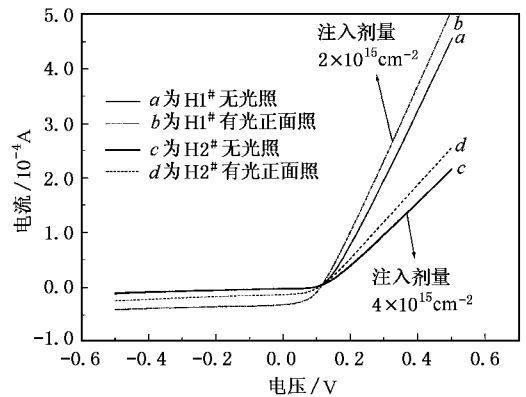


图 1 不同质子注入剂量的 n-on-p 结  $I-V$  特性(77K)(a)  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ , (b)  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  光照, (c)  $4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ , (d)  $4 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  光照

表 1 不同质子注入剂量的形成 p-n 结的性能

单元编号	质子注入剂量 / $10^{15} \text{cm}^{-2}$		$R_0$ (直接测量) / $\Omega$	$R_0$ (拟合) / $\Omega$	光响应	$n$
H1 $\#$	2	退火前	$1.25 \times 10^5$	$1.682 \times 10^5$	$3.02 \times 10^{-5}$	1.41
		退火后	$1.96 \times 10^5$	$3.345 \times 10^5$	$3.11 \times 10^{-5}$	1.11
H2 $\#$	4	退火前	$8.35 \times 10^4$	$1.022 \times 10^5$	$1.03 \times 10^{-5}$	3.88
		退火后	$4.18 \times 10^4$	$4.46 \times 10^4$	$1.08 \times 10^{-5}$	2.51
H3 $\#$	6	退火前	$5.90 \times 10^3$	$5.795 \times 10^3$	$9.90 \times 10^{-5}$	—
		退火后	$5.43 \times 10^3$	$5.273 \times 10^3$	$1.02 \times 10^{-4}$	—

将样品在  $50^\circ\text{C}$  高纯氮气保护下进行 24h 低温热处理,热处理后重新进行了  $I-V$  测量,单元 H1 $\#$  热处理前后的  $I-V$  特性如图 2 所示.热处理后的拟合结果也在表 1 给出,注入剂量为  $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  的 p-n 结  $R_0$  值得到了明显的提高( $R_0 A$  达  $490\Omega \cdot \text{cm}^2$ ),其

他两种注入剂量单元的  $R_0$  值均退化.但热处理后各单元的光响应在测量误差范围内未发生明显变化.

根据 p-n 结的一般理论,在小电流近似下, p-n 结的  $I-V$  曲线可用一指数形式表达:

$$I = A \exp(eV/nkT) + B, \quad (2)$$

其中  $I$  和  $V$  是电流与电压,  $T$  为测量温度,  $A, B$  为常数.  $n = 1$  时是理想 p-n 结, 扩散电流机制占主导地位;  $n = 2$  时为产生复合机制主导的暗电流,  $n$  为很大数时便表示不再存在 p-n 结而趋向一个欧姆电阻. 所以器件的  $n$  越靠近 1 越好, 且只有  $n$  小于或等于 2 时, 器件改善问题才落到了消除产生复合电流的范畴. 利用 (2) 式对  $I-V$  曲线的 0.006V 到 0.06V 范围内进行了拟合, 获得了单元的  $n$  值, 如表 1 所示. 也就是说在  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  的质子注入剂量时,  $n$  值为 1.41, 扩散电流机制已经占主导地位, 低温热处理后  $n$  值优化到 1.11, 已形成较为理想的 p-n 结. 同时, 从图 2 可以看出 p-n 结仍然存在较大的暗电流, 热处理前后相应的暗电流大小分别为  $4.5 \mu\text{A}$  和  $3.0 \mu\text{A}$ , 这是由于在  $I-V$  测量过程中存在一定的背景辐射引起的. 对于注入剂量增大到  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  和  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  时, p-n 结的  $n$  值均快速上升, 特别是当注入剂量达到  $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  时,  $n$  值变得非常大, 使  $I-V$  曲线接近欧姆电阻行为, 说明当注入剂量大于  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  后, 质子在 MCT 材料中已引起了很多缺陷, 导致 p-n 结区出现高密度的深能级辅助电流在 p-n 结区的隧穿, 形成极大的漏电流, 使得在  $I-V$  曲线上 p-n 结势垒的二极管效应明显衰退, 这与观察到  $R_0$  值大小也是一致的, 注入剂量为  $4 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

时单元 H2# 的  $R_0$  值为单元 H1# 的 0.6 倍, 而单元 H3# 则进一步衰退到 0.3 倍.

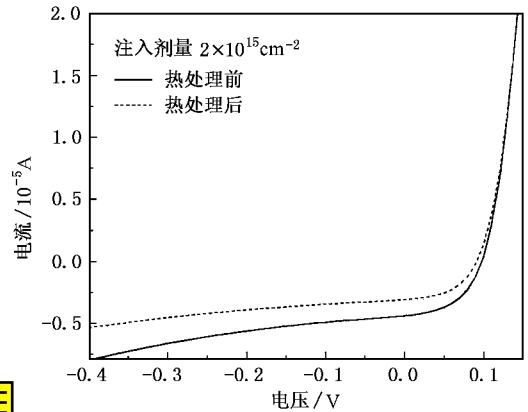


图 2 质子注入剂量  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  的 n-on-p 结热处理前后  $I-V$  特性

## 4. 结 论

我们利用 MBE 碲镉汞薄膜成功制备出不同的质子注入剂量的 n-on-p 结构的 p-n 结, 对几种不同质子注入剂量制备的 n-on-p 结电流-电压特性进行了研究. 结果表明质子注入可以形成性能较理想的 p-n 结, 但其性能与质子注入剂量有较明显的依赖关系.

- [1] Shen S C 1993 *Semicond. Sci. Technol.* **8** S443  
 [2] He L *et al* 1999 *Adv. Mater.* **11** 1115  
 [3] Wu O K *et al* 1995 *J. Electron. Mater.* **24** 423  
 [4] Liu J L *et al* 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 47 [in Chinese] [刘家璐等 1999 物理学报 **47** 47]

- [5] Johnson E S and Schmit J L 1977 *J. Electron. Mater.* **6** 25  
 [6] Spears D L 1977 *Infrared Phys.* **17** 5  
 [7] Bajaj J *et al* 1995 *J. Electron. Mater.* **24** 1067  
 [8] Dewames R E *et al* 1988 *J. Crystal Growth* **86** 849  
 [9] Kim Y *et al* 2000 *J. Electron. Mater.* **29** 859

# Study of the current-voltage characteristics of n-on-p junction fabricated by proton-implanted molecular beam epitaxial $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}^*$

Chen Gui-Bin<sup>1,2)</sup> Li Zhi-Feng<sup>1)</sup> Cai Wei-Ying<sup>1)</sup> He Li<sup>1)</sup> Hu Xiao-Ning<sup>1)</sup> Lu Wei<sup>1)</sup> Shen Xue-Chu<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>*National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*

<sup>2)</sup>*Joint Open Laboratory for Ion Beam, Shanghai Institute of Microsystem and Information Techniques, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*

( Received 9 July 2002 ; revised manuscript received 31 October 2002 )

## Abstract

Large area n-on-p structures of p-n junction with different proton implantation doses are fabricated on the molecular beam epitaxial grown HgCdTe films for mid-infrared wavelength region. Current-voltage characteristics of the p-n junction are measured at 77K. The zero-bias resistance-area product ( $R_0 A$ ) of  $312.5\Omega\cdot\text{cm}^2$  is obtained when the proton implantation dose is  $2 \times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ , and  $R_0 A$  increases to  $490\Omega\cdot\text{cm}^2$  after annealing at low temperatures.

**Keywords** : current-voltage characteristic , HgCdTe film , proton implantation , p-n junction

**PACC** : 7340L , 6170T , 1420E

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10074068 , 60244002 ) and State Key Project for Basic Research ( Grant No. G1998061404 ).