

1-3 μm 硼注入碲镉汞光伏器件的 C-V 和 G-V 特性研究

赵军 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 利用自制的阻抗测量系统研究了碲镉汞光伏器件的 C-V 和 G-V 特性. 实验结果表明: 器件有着复杂的内在结构, 可能是 npn⁺ 三层结构中的 pn⁺ 结起主导作用. 此外, 所有器件的 C-V 特性都表现出相似的反常特性, 室温下这种效应比低温下更为明显.

关键词 碲镉汞, 光伏探测器, 硼注入, C-V 特性.

引言

目前最成熟的碲镉汞 pn 结的制备工艺有离子注入和汞扩散工艺^[1]. 离子注入工艺通常是在 p 型衬底上注入施主杂质形成 n-on-p 结, 也有在 n 型衬底上注入受主杂质形成 p-on-n 结的报道^[2]. 但是, 离子注入引起的损伤通常为 n 型掺杂, 注入形成 p 区需要高温退火以消除注入损伤.

硼离子注入^[3]近年来被广泛用以制备 n⁺-on-n 结, 但人们实际上无法确认在碲镉汞中起掺杂施主作用的主要是 B⁺ 离子, 还是注入引起的损伤.

C-V 测量是研究 pn 结特性常用的手段之一, 同时测量 C-V 和 G-V 特性, 将更方便于分析处理. 通过对 pn 结反偏压 C-V 特性的分析^[4], 可以得到 pn 结的有效掺杂浓度 N^* ($N_A \times N_D / (N_A + N_D)$).

1 样品及实验装置

1.1 样品制备

样品采用淬火再结晶生长的 n 型体材料, 组分 x 约为 0.5, 衬底载流子浓度约为 $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$. 样品经减薄抛光, 溴乙二醇溶液腐蚀后, 蒸发一层 ZnS 膜, 厚约 2000 Å, 作为离子注入时的阻挡层. 光刻出离子注入区, 硼离子注入能量为 130 keV, 剂量为 $3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$. 注

入后再蒸发 ZnS 膜,光刻电极孔,加引线. 通常,衬底和注入区各引出一个电极.

1.2 宽频带阻抗测量系统^[5]

宽频带阻抗测量系统的设计基于能够在宽频带(100 Hz~100 kHz)同时测量样品的微分电容和微分电导,为此采用了半桥电路和鉴相技术. 系统的核心是宽频带阻抗测量仪,它将阻抗信号转换成电信号. 交流小信号由 PARC 5208 型锁相放大器产生,超低型信号发生器 XFD-8A 提供样品偏置电压,阻抗测量仪的信号输出到锁相放大器,利用锁相的鉴相功能区分电容和电导信号,并把交流信号转变为直流信号. 锁相的信号输出到 X-Y 记录仪或计算机记录 $C-V$ 和 $G-V$ 信号. 测量前需用标准电容进行定标. 测量系统工作频带为 100 Hz~100 kHz,交流小信号幅度小于 10 mV. 考虑系统的影响,包括系统引线引入的零点,以及 PARC 5208 型锁相放大器的鉴相的垂直性误差 $90^\circ \pm 0.5^\circ$,电容测量精度高于 0.02 pF,电导精度(G/ω)可高于 0.2 pF,即 100kHz 的频率下测量 G 的精度高于 2×10^{-7} s.

测量系统框图如图 1 所示. 测量时,系统采用 100 kHz 的交流小信号,其振幅为 7.5 mV,测量结果必须减去系统和杜瓦引线的分布电容.

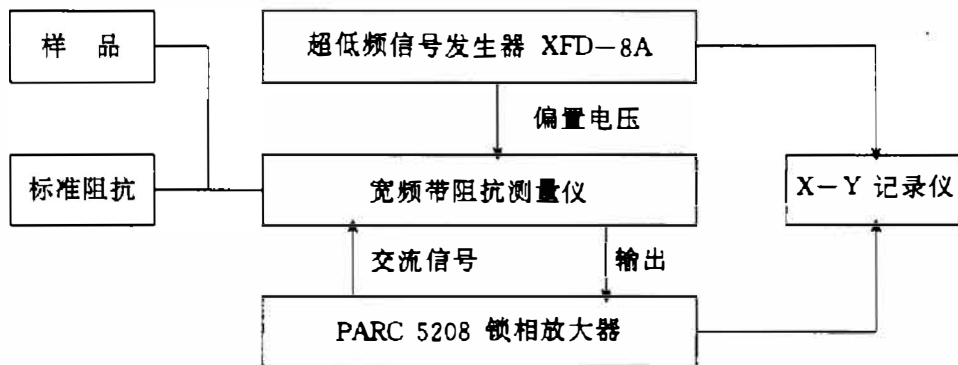


图 1 测量系统框图

Fig. 1 Diagram of measurement system

2 实验结果及讨论

2.1 实验结果

样品测试时,n 型衬底接偏压正极,注入区接偏压负极. 样品典型的 $C-V$ 和 $G-V$ 特性如图 2 所示,样品编号为 Dh9304-4-6.

由图 2 可见,样品的微分电导曲线类似于单个 pn 结的 $G-V$ 特性,微分电容 $C-V$ 曲线相对比较复杂,反偏区的 $C-V$ 性能与单结相似,正偏区则有比较复杂的结构. 300 K 下电容在 0.1 V 处有一个峰值,而 110 K 下电容峰退化为一个肩,而且位置移动到 0.4 V 处. 总体上说,110 K 时的 $C-V$ 和 $G-V$ 特性更接近单个 pn 结的性能.

样品 Dh9304-2-2 的测试结果见图 3,该样品表现出与样品 Dh9304-4-6 (见图 2) 相似的反常 $C-V$ 特性,但是 300 K 时电容峰位于 -0.15 V 处,110 K 时,电容峰退化为 0.2 处的一个肩.

2.2 npn⁺三层模型

B^+ 离子注入近年来被广泛用于形成 n^+ 区,以制备 n^+p 结(p 型衬底)或 n^+n 结(n 型衬

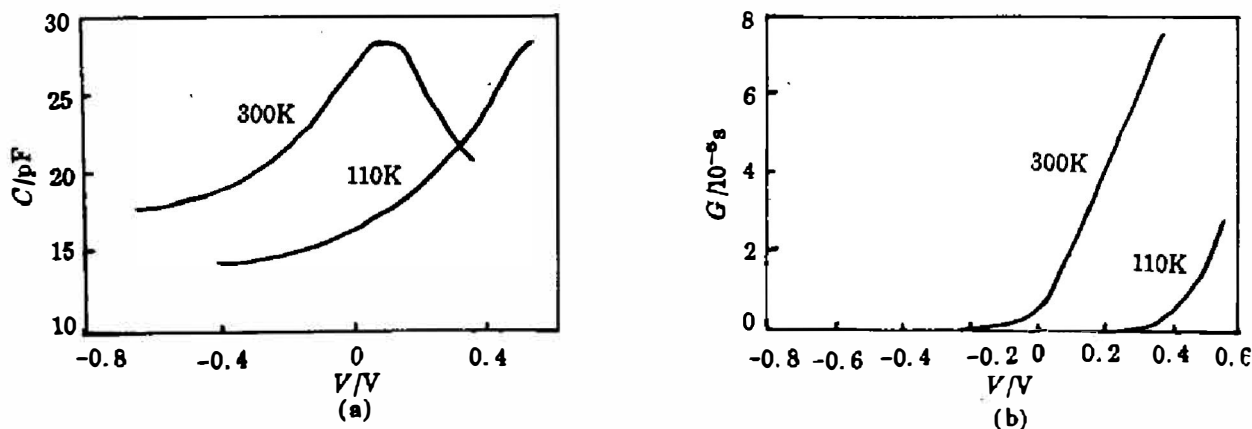


图 2 样品 Dh 9304-4-6 的导纳-电压特性
(a) C-V 曲线 (b) G-V 曲线

Fig. 2 Admittance-Voltage characteristic of sample Dh9304-4-6
(a) C-V curve (b) G-V curve

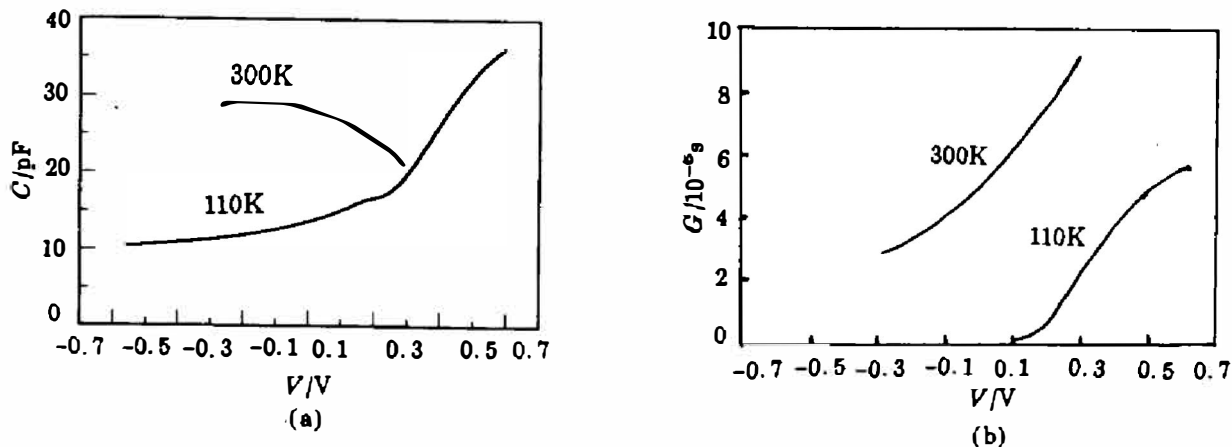


图 3 样品 Dh9304-2-2 的导纳-电压特性
(a) C-V 曲线 (b) G-V 曲线

Fig. 3 Admittance-Voltage characteristic of sample Dh9304-2-2
(a) C-V curve (b) G-V curve

底). 我们的工艺为: 硼离子动能为 130 keV, 剂量为 $3 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$, 未经退火, 注入掺杂浓度可达 $10^{18} - 10^{19} \text{cm}^{-3}$. 样品采用 N 型衬底, 实验表明, 注入并非形成简单的 n^+n 高低结. 高低结的自建电势可以写成:

$$V_d = (k_B T / e) \times \ln(N^+ / N)$$

由上式可见, 高低结的自建电势很小而且随温度下降而减小, 这些与 G-V 曲线反映出的自建电势随温度下降而增大完全相反. 因此与高低结相比, npn^+ 三层模型是一个更为合理的解释.

npn^+ 三层模型中的 p 区可以认为是硼注入的产物. 有一种看法认为: 硼注入形成高浓度的损伤区, 即 n^+ 区, 损伤区会吸引 N 型衬底中的汞来填充损伤空位, 从而在 n^+ 区和 n 区之间形成一个过渡区^[6]. 过渡区内汞空位的密度大小决定了它的导电类型是 n^- 型还是 p 型. 由于样品的衬底掺杂浓度很低, 因此更可能形成 p 型过渡区.

n_pn⁺三层模型可以看成是两个 pn 结背向背的串联,但是这两个结并非相互独立,而是相互关联. p 区的少子扩散长度 L_n 为:

$$L_n = \sqrt{D_n \times \tau_n} = \sqrt{(KT/e) \times \mu_n \times \tau_n}, \tag{1}$$

式(1)中取 $T=80K$, $\mu_n=2000\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, $\tau_n=100\text{ns}^{[7]}$, 则 L_n 为 $12\mu\text{m}$, 显然, p 区的厚度远小于这个值. 两个 pn 结通过少子扩散而相互关联.

由于 $n^+ \gg n$, pn⁺结的自建电势及阻抗都比 pn 结大得多,当结正偏(n 型衬底接正)时, pn 结反偏, pn⁺结正偏. n⁺端大量的电子扩散到 p 区成为非平衡少子,少子扩散到 pn 结处,被 pn 结电场扫出到 n 区. 因此,正向性能主要由 pn⁺结决定, pn 结的反向漏电流也有一定影响. 结反偏时(n 型衬底接负), pn 结正偏而 pn⁺结反偏. 由于 pn⁺结阻抗远大于 pn 结的阻抗,偏压主要降在 pn⁺上. 若 $N_A \gg N$, 则 pn 结正偏时,电流主要是 p 区空穴向 n 区扩散,然后由 n⁺区的少子来补充 p 区的空穴. 由于空穴 p 区的扩散长度 $L_p \ll L_n$, 这时可近似认为两个结相互独立,即反偏时主要由 pn⁺的反偏性能决定. 因此,器件的 G-V 特性大体趋势与单 pn 结相似,而 C-V 呈复杂的特性.

2.3 利用反偏区 C-V 曲线分析 pn⁺结的有效载流子浓度

n_pn⁺三层模型认为,样品 C-V 曲线的反偏性能基本由 pn⁺结决定. 因此,可以采用单个 pn⁺结的理论来进行定量处理^[8].

若耗尽层假设成立,有效载流子浓度 N^* 和耗尽层宽度 W 可表示为:

$$N^* = \frac{C^3}{q \epsilon_0 \epsilon_s A_j^2} \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1}, \tag{2}$$

$$W = A_j \epsilon_0 \epsilon_s / C; \tag{3}$$

式(2)、(3)中, A_j 为结面积, ϵ_s 为介电常数,对于 $x=0.5$ 的 HgCdTe, ϵ_s 可取 14.2.

若 pn⁺结是突变结,则式(2)可简化为:

$$C^{-2} = \frac{2}{q \epsilon_0 \epsilon_s N^* A_j^2} (V_d - V). \tag{4}$$

样品 Dh9304-4-6 的 C^{-2} -V 特性见图 4. 图中的点为实验值,线为理论拟合结果. 样品的 C^{-2} -V 线性关系良好,说明样品 pn⁺结近似为突变结,可用式(4)来计算各样品的有效载流子浓度 N^* . 各样品的计算结果见表 1.

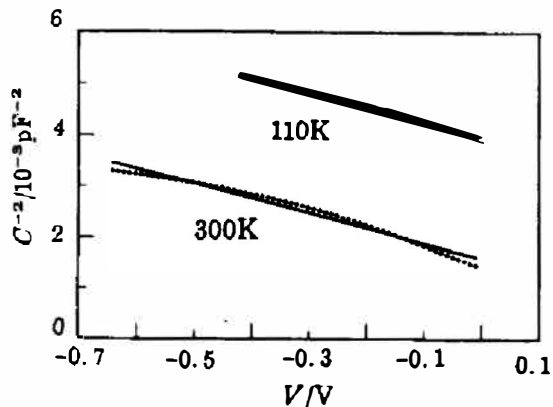


图 4 样品 Dh9304-4-6 的 C^{-2} -V 曲线
Fig. 4 Reciprocal of the capacitance squared versus reverse-bias voltage sample Dh9304-4-6

表 1 样品 pn⁺ 结的有效掺杂浓度
Table 1 Effective doping concentration of pn⁺ junction

| 编 号 | Dh9304-4-6 | | Dh9304-2-2 | Dh9215-10-2 | Dh9215-10-7 | Dh9215-10-16 |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| T(K) | 300 | 110 | 110 | 80 | 80 | 80 |
| N ⁺ (cm ⁻³) | 1.35×10 ¹⁵ | 1.35×10 ¹⁵ | 4.80×10 ¹⁴ | 3.72×10 ¹⁴ | 2.68×10 ¹⁴ | 3.12×10 ¹⁴ |

结果表明: 样品 pn⁺ 结有效掺杂浓度 N⁺ 满足 N⁺ ≫ N^{*} ≫ N, 符合 npn⁺ 模型的 N⁺ ≫ N_A ≫ N 的假设. C⁻²-V 关系的线性符合良好, 可认为 pn⁺ 结类似于突变结.

2.4 反常电容特性的探讨

对照电容和电导曲线, 可发现: 当电导开始显著上升时, 电容相应地开始出现反常效应. 理想 pn⁺ 结 (N_D ≫ N_A) 的电导 G 可表示为:

$$G = \frac{e^2 A_j D_n n_i^2}{k T L_n N_A} \exp\left(\frac{-eV}{kT}\right) \quad (5)$$

式(5)中 D_n 是电子扩散系数, L_n 是电子扩散长度, n_i 是本征载流子浓度, k 为 Boltzmann 常数, T 为温度, A_j 为结面积. 式(5)表明电导与 p 区掺杂浓度 N_A 直接相关, 即反常电容效应与 p 区的形成机制有直接联系.

林和^[9]在汞扩散台面 Hg_{0.725}Cd_{0.275}Te pn 结上观察到了相似的反常电容曲线, 他用深能级隧道电容的理论解释了这一现象. 然而对于带宽 E_g 为 0.6 eV 的样品, 隧穿几率大大下降, 形成如图 2(a) 所示的电容峰要非常高的深能级密度, 这不大可能.

引起反常电容特性的原因可能是器件结构, 也可能是器件物理特性, 有待进一步研究确定. 在 npn⁺ 三层结构中, 两个结相互作用是个很复杂的问题, 也有待进一步研究.

3 结语

对 1~3 μm 硼注入碲镉汞光伏器件的 C-V 和 G-V 特性的分析表明: 器件可能具有 npn⁺ 三层结构, 其中 pn⁺ 结起了主导作用. 这个三层模型可以定性地解释器件的 C-V 和 G-V 特性, 对器件反偏电容的定量处理也令人满意. 电容反常特性与 p 区的形成机制相关, 但其原因有待进一步深入的研究.

致谢 司承才同志提供了样品, 苗勇、徐春华在工作中给予了有益的帮助, 在此表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 Reine M B, Sood A K, Tredwell T J. *In Semiconductor and Semimetals*, Academia, New York 1981, 18: 247
- 2 Bubulac L O, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1987, A5(5): 3166
- 3 Kumer R, et al. *J. Appl. Phys.* 1990, 68(11): 5564

- 4 孙恒慧,包宗明. 半导体物理实验,北京:高等教育出版社,1985,52
- 5 Boudry M R. *J. Phys. E. Sci. Instrum.* 1978, 11: 237
- 6 Syz J, et al. *J. Vac. Sci. Technol.* 1989, A7(2): 396
- 7 吉 航. 离子注入 HgCdTe pn 结深能级的研究,中科院上海技术物理研究所硕士论文,1994
- 8 Sze S M. *in Physics of Semiconductor Devices* (John Wiley & Sons, Inc. USA) 2nd. Edition 1984,74
- 9 林 和. Hg_{1-x}Cd_xTe 光伏探测器研究,中科院上海技术物理所博士论文,1985

C-V AND G-V CHARACTERISTICS OF 1~3 μm HgCdTe PV DETECTORS FABRICATED BY BORON IMPLANTATION

Zhao Jun, Fang Jiexiong

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

Abstract C-V and G-V characteristics of HgCdTe photovoltaic detectors were studied by using a self-made ac-impedance measurement system. The devices were fabricated on n-type HgCdTe ($x=0.5$) by using the boron implantation technology. The experimental results show that some complex structures exist in the devices. A possible structure is the npn⁺ trilayer structure, in which the pn⁺ junction determines the characteristic. Besides, similar anomalous C-V characteristics were observed in all devices. This effect is more obvious at 300K than at low temperatures.

Key Words mercury cadmium telluride, photovoltaic detectors, boron implantation, C-V characteristic