

HgCdTe-CdTe 异质结构的变频导纳特性

赵军 郭世平[√] 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

A 摘要 采用宽频带导纳测试系统研究了 $\text{Hg}_{0.66}\text{Cd}_{0.34}\text{Te}$ -CdTe 异质结构和 Al-半绝缘 CdTe- $\text{Hg}_{0.66}\text{Cd}_{0.34}\text{Te}$ 结构样品的变频导纳特性, 分析了不同结构样品的测试结果, 表明: 异质结 HgCdTe 表面空穴积累, CdTe 表面空穴耗尽, 界面处的势垒使载流子局限于 HgCdTe 体内. 样品的光伏响应光谱在 2970cm^{-1} 和 3650cm^{-1} 处各有一个响应峰, 前者对应于界面 HgCdTe 的本征光伏效应, 后者对应于 HgCdTe 表面积累层内空穴被激发超过空穴势垒引起的光伏效应, 相应于空穴势垒约为 0.41eV .

关键词 HgCdTe, CdTe, 异质结, 导纳测量.

TN304.26.00

TN213

引言

HgCdTe 光电器件性能及其稳定性、可靠性与器件表面钝化直接相关. HgCdTe 的经典钝化膜采用如阳极氧化膜、阳极硫化膜、ZnS、 SiO_2 等绝缘膜^[1,2], 新型的钝化膜^[3]利用 HgCdTe 异质结形成表面势垒, 以阻挡载流子向表面运动, 降低表面漏电流, 可获得更好的钝化效果. 由于 CdTe 与 HgCdTe 的晶格失配极小 (0.31%), 易形成高质量的异质结, 用 CdTe 作 HgCdTe 光电器件的钝化膜已成为一种发展趋势^[4]. CdTe 钝化及界面性能与异质结的能带结构有关, 因此了解 HgCdTe-CdTe 异质结的性能不仅对异质结器件是必须的, 而且对采用 CdTe 作钝化膜的 HgCdTe 光电器件也非常重要.

HgCdTe 异质结的研究主要集中在两个方面: 一是 HgCdTe 缓变异质结, 主要为了降低光伏器件的反向暗电流, 提高长波光伏器件的性能^[5,6]; 二是异质结钝化膜的研究^[7,8], 国内已用半绝缘 CdTe 作钝化膜, 初步制备出 HgCdTe 光伏器件, 但对于异质结构的界面性质尚缺乏了解. 本文采用宽频带导纳-电压谱结合光电响应光谱, 研究分子束外延技术制备 $\text{Hg}_{0.66}\text{Cd}_{0.34}\text{Te}$ -CdTe 异质结构的特性.

1 实验

采用分子束外延技术制备^[9]HgCdTe 异质结, 用 (211)B 晶向 GaAs 作衬底, 生长前先对衬底进行 580°C 热处理, 然后将 GaAs 衬底降温至 300°C , 生长厚约 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的 CdTe 缓冲层, 调节衬底温度至 190°C , 生长 HgCdTe 薄膜, 标称组分 $x=0.34$, 膜厚约 $10\mu\text{m}$. 然后在 HgCdTe 薄膜上生长一薄层 CdTe 膜, 此时衬底温度升至 250°C , 以保证这层膜为 CdTe 单晶而不是高 x 值的 HgCdTe, CdTe 膜厚为 $0.5\mu\text{m}$. 样品结构见图 1.

最后制成的测试用样品有两种不同的电极结构: 一种是在 CdTe 层上直接蒸 Al 电极,

形成 Al-半绝缘 CdTe-Hg_{0.66}Cd_{0.34}Te 结构样品 (MCT94630-0); 另一种是先蒸 300 Å 的 In, 再蒸上 Au, 以形成 CdTe-Hg_{0.66}Cd_{0.34}Te 异质结构样品 (MCT94630-1). 样品的电极面积为 $8 \times 10^{-3} \text{cm}^2$. HgCdTe 衬底上电极用 In 焊引出.

采用宽频带导纳测量系统对样品进行变频导纳特性测量, 该系统可在 100Hz~100kHz 频带内同时测量样品的微分电容和微分电导. 测量前用标准电容进行系统定标, 消除了电子学系统和样品杜瓦瓶引线的分布电容. 测量系统框图见图 2. 测量时交流小信号幅度小于 10mV, 样品温度为 80K.

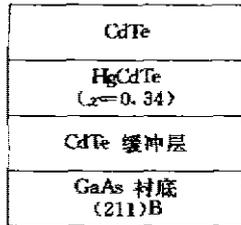


图 1 样品生长结构示意图
Fig 1 Schematic diagram of sample growth structure

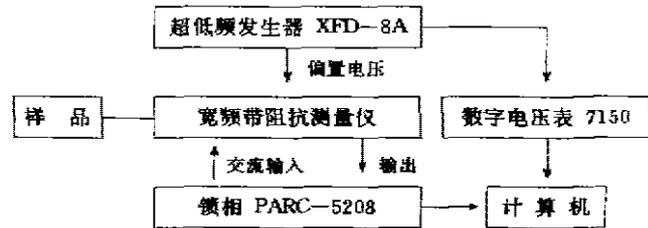


图 2 宽频带导纳测量系统框图
Fig 2 Block diagram of wide-band admittance measurement system

用改进的 BIO-RAD FTS-175 型光谱仪测量样品的响应光谱, 光谱仪的调制光束正入射到样品表面, 样品的光电信号经外接的低噪声放大电路放大后, 送入光谱仪主放大电路进行处理. 该系统可测量 $400 \sim 6000 \text{cm}^{-1}$ 范围的相对光伏响应光谱 (以标准 TGS 探测器的光伏响应为单位 1).

2 实验结果及讨论

2.1 Al-半绝缘 CdTe-Hg_{0.66}Cd_{0.34}Te 结构的导纳特性

样品 MCT94630-0 采用 Al 电极, 样品结构与 MIS 相似, 样品的 $C-V$ 和 $G-V$ 特性曲线见图 3. 由于 CdTe 薄膜是半绝缘膜, 样品的 $C-V$ 、 $G-V$ 特性与理想 MIS 结构有很多不同. 我们用 MIS 结构等效电路方法分析图 3. 按照样品的结构, 它的等效电路图见图 5(a), 图中 C_1 、 G_1 分别表示 CdTe 膜的电容和电导, C_2 、 G_2 分别表示结面处 HgCdTe 结面的电容和电导.

当频率足够低 (或漏电导足够大), 满足 $\omega \ll (G_1/C_1)$ 及 $\omega \ll (G_2/C_2)$ 时,

$$G = G_1 G_2 / (G_1 + G_2), \quad (1)$$

$$C = (G_1^2 C_1 + G_2^2 C_2) / (G_1 + G_2)^2. \quad (2)$$

此时, 电导不随频率变化, 而电容随 G_1 、 G_2 、 C_1 、 C_2 变化. 当 G_1 、 G_2 变化缓慢时, 电容主要随 C_1 、 C_2 变化; 当 G_1 、 G_2 迅速上升时, 电容随之下降.

当频率足够高 (或漏电导足够小), 满足 $\omega \gg (G_1/C_1)$ 及 $\omega \gg (G_2/C_2)$ 时,

$$G = (G_1^2 G_2 + C_1^2 G_2) / (C_1 + C_2)^2, \quad (3)$$

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2). \quad (4)$$

式(4)表明这时的电容 C 与 MIS 的电容特性相同^[10], 式(3)表明电导与电容变化相关.

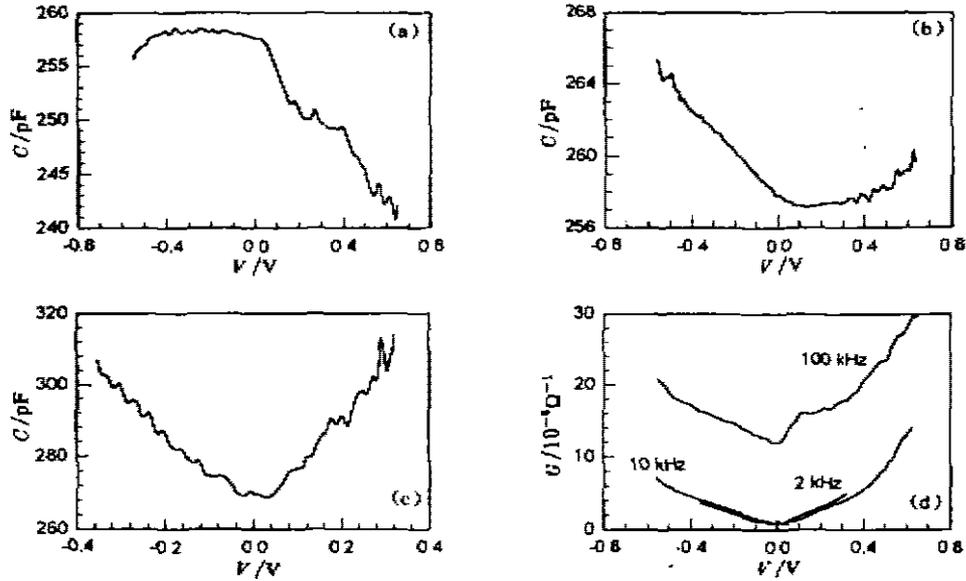


图 3 样品 MCT94630-0 的 C-V 曲线

(a) 100kHz, (b) 10kHz, (c) 1kHz, (d) 变频 G-V 曲线

Fig. 3 Sample MCT94630-0's C-V curves (a) 100kHz, (b) 10kHz, (c) 1kHz and (d) G-V curve

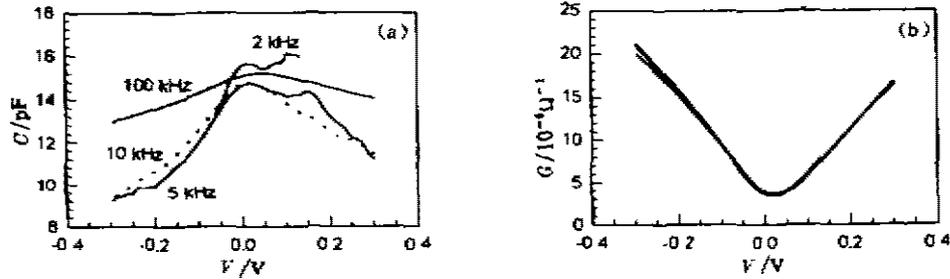


图 4 MCT94630-1 的 (a) 电容特性曲线和 (b) 电导特性曲线

Fig. 4 (a) Capacitance curves and (b) conductance curves of sample MCT94630-1 with varying frequency

图 3(b) 中, 10kHz 和 1kHz 的电导曲线基本重合, 说明这时样品满足低频条件, 电容曲线可由式(2)描述. 100kHz 的电导特性与电容的变化明显相关, 说明该频率样品满足高频条件, 电容特性与 MIS 的电容相同, 可由式(4)描述. 图 3 的实验结果与 HgCdTe MIS 结构 C-V 曲线相比^[11], 样品在零偏压附近的电容特性与 p 型 $Hg_{0.66}Cd_{0.34}Te$ MIS 结构的电容曲线相同. 样品在 100kHz 时电容随偏压的变化见图 3(a), 电容曲线可分成几个区域: 零偏压附近, HgCdTe 表面电荷积累, CdTe 膜耗尽, 负偏压使 HgCdTe 表面进入强积累, CdTe 表面由耗尽逐渐转为反型; 正偏压增大, HgCdTe 表面由积累转为耗尽, 进而转为反型, CdTe 由耗尽逐渐变为积累; 由于大电压区漏电流的显著增大, 导致样品电容下降.

2.2 Hg_{0.44}Cd_{0.56}Te-CdTe 异质结的导纳特性

样品 MCT94630-1 电极采用 300 Å In 加上 3000 Å Au, In 在 CdTe 中的掺杂使电极与 CdTe 形成了欧姆接触, 样品的 C-V 和 G-V 曲线见图 4. 样品 MCT94630-1 的等效电路见图 5(b), 图中 G_s 是 CdTe 的体电导, G_j 是异质结的电导, 而 C_j 表示异质结的结电容, 是 CdTe 和 HgCdTe 的电容 C_1 和 C_2 的串联.

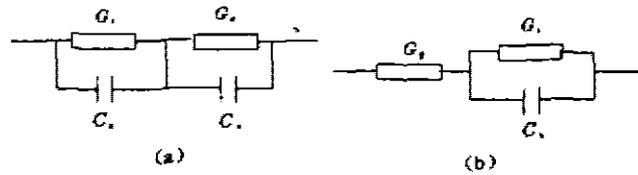


图 5 样品(a) MCT94630-0 和(b) MCT94630-1 的等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit for the sample of (a) MCT94630-0 and (b) MCT94630-1

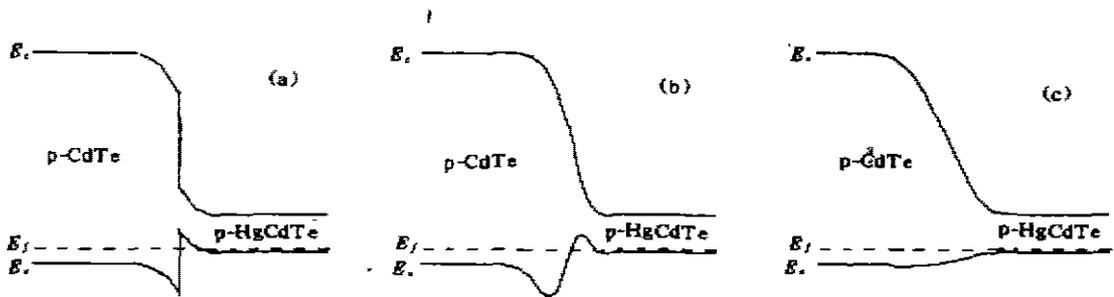


图 6 HgCdTe-CdTe 异质结能带结构图

Fig. 6 Energy band structure of HgCdTe-CdTe heterojunction

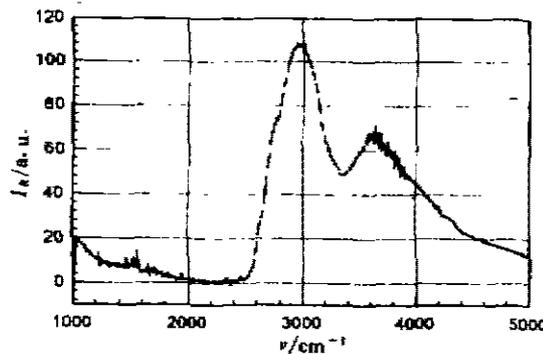


图 7 样品 MCT94630-1 光伏响应光谱

Fig. 7 Photovoltaic response spectrum of sample MCT94630-1

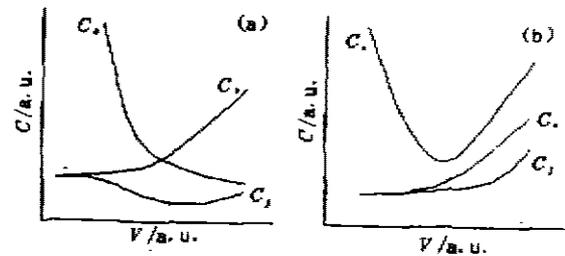


图 8 异质结电容 C_j 变化趋势示意图 (a) 高频 (b) 低频

Fig. 8 Schematic diagram of capacitance C_j varying with frequency (a) high frequency (b) low frequency

当频率足够低(或漏电导足够大)、满足 $\omega \ll (G_j/C_j)$ 时, 导纳公式可写为

$$G = G_s G_j / (G_j + G_s), \quad (5)$$

$$C = C_j G_s^2 / (G_j + G_s)^2. \quad (6)$$

这时, 样品电导与频率无关, 而电容则是 G_j 、 G_s 和 C_j 变化的综合体现.

样品的电导特征如图 4(b) 所示, 不随频率变化, 可用公式 (5) 和 (6) 来描述. 由式 (6) 可知, 当 C_j 的变化比电导更快时, 样品电容表现出电容 C_j 的特征; 反之, 表现为电导倒数的特征. 100kHz 时, 电容仅有一个峰, 表现出电导倒数的特征, 说明这时电容 C_j 变化缓慢. 随着频率的下降, 电容曲线出现双峰. 其中零偏压附近的电容峰与电导极小值相对应, 峰位随频率基本没有变化; 另一个电容峰随着频率下降, 向电压零点靠近. 这表明: 在零偏压及负偏压区, 电容 C_j 随频率变化不大; 而在正偏压区, 随频率下降, C_j 明显上升.

2.3 HgCdTe-CdTe 异质结能带结构

由于界面 Hg 和 Cd 的互扩散, HgCdTe 异质结界面存在一个缓变过渡区. 除了 HgCdTe 和 CdTe 的导电类型和掺杂浓度以外, 界面缓变过渡区的宽度也对 HgCdTe-CdTe 异质结有很大影响^[5]. 半绝缘 CdTe 导电类型为弱 p 型, 参照 F. L. Madarasz 等对 HgCdTe 异质结能带结构的研究^[12,13,14], p-HgCdTe-半绝缘 CdTe 异质结可能有如图 6 所示的几种能带结构. 图 6(a) 为 HgCdTe-CdTe 突变异质结构的能带结构图, (b) 表示缓变过渡区的存在使界面势垒变得更平缓, 足够宽的缓变区使界面空穴势垒消失, 如图 6(c).

2.1 中的分析表明: 零偏压平衡时, HgCdTe 表面空穴积累, CdTe 表面空穴耗尽. 当分子束外延生长时, 界面 Hg 和 Cd 的互扩散通常形成的界面缓变过渡区比较窄, p-HgCdTe-半绝缘 CdTe 异质结的能带结构应与图 6(b) 相似, 这种能带结构使 HgCdTe 中的载流子向表面运动的同时受到电子势垒和空穴势垒的阻挡. 参照能带结构图, (b) 考虑 HgCdTe 和 CdTe 反型时不同的频率响应特性, 则不同频率下, 结电容 C_j 随偏压的变化见示意图 8, 其变化趋势与 2.2 中的分析完全一致.

我们测量了样品 MCT94630-1 的光伏响应光谱 (见图 7), 在 2970 和 3650 cm^{-1} 处各有一个光伏响应峰. 我们发现位于 2970 cm^{-1} 的响应峰正对应于衬底 HgCdTe 的本征吸收峰. 按图 8(b), 3650 cm^{-1} 处的光伏响应峰应是 HgCdTe 表面积累的空穴被光激发越过空穴势垒形成的. 由光伏响应半峰高估算空穴势垒高度 E_{Ba} , 有 $E_{Ba} \approx 3300\text{cm}^{-1}$ (即 0.41eV).

3 结论

对 $\text{Hg}_{0.66}\text{Cd}_{0.34}\text{Te}$ -CdTe 异质结和 Al-半绝缘 CdTe- $\text{Hg}_{0.66}\text{Cd}_{0.34}\text{Te}$ 结构样品进行了变频导纳特性研究, 用等效电路分析了实验结果. 结果表明: $\text{Hg}_{0.66}\text{Cd}_{0.34}\text{Te}$ -CdTe 异质结的 HgCdTe 表面空穴积累, CdTe 表面空穴耗尽, HgCdTe 中的载流子在界面处同时受到电子势垒和空穴势垒的阻挡. 光伏响应谱表明空穴势垒约为 0.41eV. 若采用这种结构的异质结作碲镉汞表面钝化, 可有效地将载流子限制在 HgCdTe 体内, 降低表面复合, 提高光电器件的性能.

致谢 陈新禹帮助测量光伏响应光谱, 样品制备得到宣荣伟等人的协助, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 Nemirovsky Y, Bahir G. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1989, **A7**(2):450
- 2 Nemirovsky Y. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **A8**(2):1185
- 3 Zimmermann P H, Reine M B, Spignese K, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **A8**(2):1182
- 4 Tennant W E, Cockrum C A, Gilpin J B, et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1992, **B10**(4):1359
- 5 Bratt P R. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1983, **A1**(3):1687
- 6 Kosai K, Radford W A. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1990, **A8**(2):1254
- 7 Ghandhi S K, Parat K K, Ehsani H, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(8):828
- 8 Yuan S, He L, Yu J, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(9):914
- 9 郭世平, MBE 生长碲镉汞的砷掺杂工艺及 p-on-n 光伏器件研究, 博士论文, 中国科学院上海技术物理研究所, 1994
- 10 刘文明. 半导体物理学, 长春: 吉林科学技术出版社, 1982: 317~328
- 11 黄河, 碲镉汞 MIS 结构的研究, 博士论文, 中国科学院上海技术物理研究所, 1985
- 12 Madarasz F L, Szmulowicz F. *J. Appl. Phys.*, 1987, **62**(8):3267
- 13 Madarasz F L, Szmulowicz F. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(11):6373
- 14 Madarasz F L, Szmulowicz F. *J. Appl. Phys.*, 1989, **66**(7):3082

VARIABLE-FREQUENCY ADMITTANCE SPECTRA OF HgCdTe-CdTe HETEROSTRUCTURE

Zhao Jun Guo Shiping Fang Jiexiong

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

Abstract Admittance-voltage characteristics of $\text{Hg}_{0.66}\text{Cd}_{0.34}\text{Te-CdTe}$ heterostructures were studied by using a wide-band admittance measurement system. HgCdTe heterostructures were grown by MBE technology. An energy-band structure was established according to the analysis of $C-V$ and $G-V$ results. It was shown that, holes are accumulated at the HgCdTe surface while depleted at the CdTe surface and the barriers formed at the interface make the carriers confined in HgCdTe. The photovoltaic response spectrum shows two peaks, which are located at 2970cm^{-1} and 3650cm^{-1} respectively. The former peak is due to the intrinsic photovoltaic effect of HgCdTe, and the latter peak is due to the effect that holes in the accumulation layer are excited by photons and then overpass the hole barrier at the interface, i. e., the hole barrier height is about 0.41eV.

Key words HgCdTe, CdTe, heterostructure, admittance measurement.