

3~5 微米双势垒量子阱红外探测器结构 在不同偏压下的光伏响应*

崔丽秋^{1,2} 江德生¹ 张耀辉¹ 刘 伟¹ 吴文刚¹ 王若桢²

(1 半导体超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

(2 北京师范大学物理系 北京 100875)

摘要 首次采用不同偏压下的光伏谱方法无损测量到双势垒量子阱红外探测器结构的量子阱带间跃迁光伏谱响应. 分析结果支持探测器有源区存在内建电场的说法: 量子阱区存在由生长不对称引起的指向衬底的内建电场, 同时势垒区存在相反的内建电场.

PACC: 0762, 7240, 6865

近年来, 随着分子束外延技术的发展和量子阱超晶格材料质量的提高, GaAs/GaAlAs 量子阱带间跃迁红外探测器已经引起人们的高度重视和广泛关注. 量子阱红外探测器具有响应速度快, 探测率与 HgCdTe 探测器接近, 探测波长可以通过改变量子阱参数调节等优点^[1~6]. 3~5 微米波长的量子阱红外探测器的有源区是共面结构, 存在很厚的 GaAs 衬底和顶盖层. 因此, 很难用一般的透射光谱等测量方法得到量子阱的带间跃迁信息. 我们没有给样品表面开窗口或是做半透明肖特基结电极, 而是采用入射光以 45° 角从侧面入射的方法(见图 1 小插图), 成功地测量了线列探测器结构在不同偏压下的光伏谱, 得到了与量子阱带间跃迁相应的光谱响应. 光伏谱的光谱响应反映了不同偏压下双势垒量子阱中载流子的空间分离效应和电场在样品中的分布情况, 首次为探测器有源区内建电场的分布情况提供了实验依

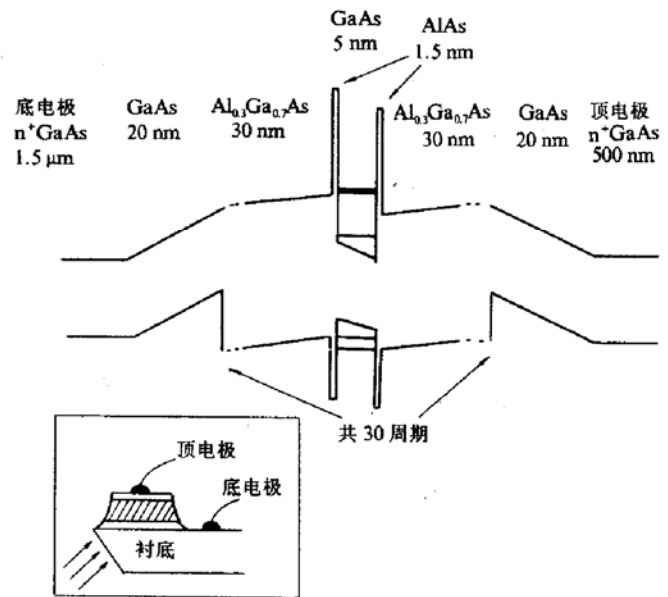


图 1 样品生长序列及能带结构图

* 中国科学院院长基金资助项目

崔丽秋 女, 1972 年生, 硕士研究生, 目前从事量子阱红外探测器研究工作

江德生 男, 1940 年生, 研究员, 博导, 主要从事超晶格微结构和半导体光谱研究工作

1995 年 12 月 18 日收到初稿, 1996 年 4 月 10 日收到修改稿

据,对探测器的结构参数的分析提供了直接的信息.

样品生长序列及能带结构见图 1. 光生伏特(PV)谱测量中样品温度 77K, 激发光源为碘钨灯经单色仪分光, 斩波频率 182Hz. 偏压用恒流源加上. PV 谱结果见图 2(a)及(b).

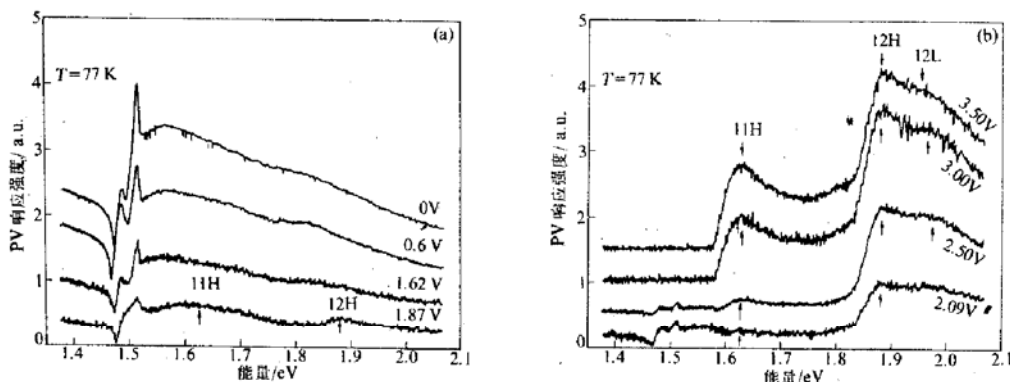


图 2 红外探测器在不同偏压下的光伏谱

偏压方向由顶层指向衬底, 各曲线相对于前一曲线向上平移 0.5.

(a) 偏压 0~1.87V; (b) 偏压 2.09~3.50V.

为了和 PV 谱分析对照, 我们还进行了样品在 77K 温度下的红外光电流响应测量, 光电流谱结果见图 3.

在光伏谱测量中入射光以 45° 角从样品侧面入射. 外加偏压方向由顶层指向衬底. 如图

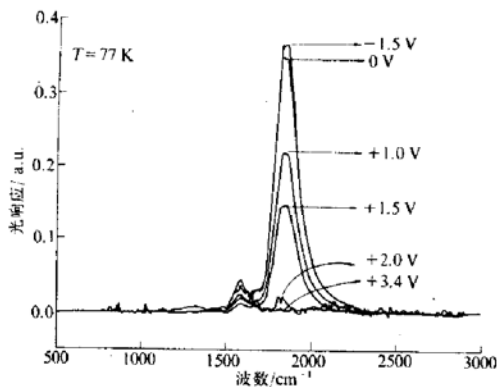


图 3 探测器在不同偏压下的
红外光电流响应谱

2, PV 谱中看到阈值能量在约 1.5eV, 1.63eV 和 1.85~1.95eV 范围的信号. 1.5eV 处的信号在零偏压下很强, 它随偏压的增加逐渐减小至消失, 光伏线形基本不发生变化. 它主要来自靠近衬底端的 n^+ GaAs 层及 GaAs 间隔层. 光吸收产生的电子空穴对主要是在 GaAs 间隔层电场的作用下空间分离. 正偏压与这一层的内建电场方向相反, 所以在正偏压下 PV 信号逐渐减小. 复杂的光伏信号线形可能是由于入射光在 GaAs 衬底及缓冲层中产生吸收之后才入射到间隔层而引起的, n^+ 层中杂质吸收也可能对线形产生影响, 本文对此不做重点讨论.

下面重点讨论分析探测器有源区的内建电场问题.

双势垒型量子阱红外探测器具有光伏型的红外光电流响应(见图 3). 零偏压下, 探测器的暗电流为零, 正反偏压下暗电流不对称. 分析表明探测器的量子阱区有指向衬底的内建电场, 势垒区有反向内建电场^[7]. 当 AlAs 势垒足够薄时, 光生载流子在双势垒多量子阱结构中的纵向漂移及最终被电极所收集的过程主要受 AlGaAs 层电场影响. 从图 3 可以看到, 不加偏压时, 红外光电流谱有很强的信号, 表明 AlGaAs 层存在很强的内建电场; 负偏压(相对于顶电极)使 AlGaAs 层的电场增强, 光电子在 AlGaAs 层中的输运速度^[2,8]饱和导致光电流的饱和; 正偏压则削弱 AlGaAs 中的电场, 相应地, 光电流随偏压增加而逐渐减小. 正偏压大约 2V 时, 光电流截止. 可见正偏压足够大时, AlGaAs 层的能带从向衬底端倾斜往平带转化, 但没有翻转过来. 这表明: 正偏压首先降在 AlGaAs 势垒层, 至接近平带时, 开始加在量

子阱区. 下面将分析有源区的带间跃迁 PV 信号, 能够为上面对有源区电场情况的估计提供旁证.

PV 谱中, 能量阈值在 1.63eV 的信号经理论分析和光荧光测量验证被指认为对应量子阱的 11H 吸收(图 2(a)及(b)中箭头所示). 它在偏压加到 1.87V 时开始出现, 并随偏压而递增. 在目前所加偏压范围内, 量子阱基态电子的运动主要是从量子阱到相邻 AlGaAs 层的隧穿辅助热发射过程. 这正是暗电流的形成机制. 因而, 11H 光电子与形成暗电流的电子一样在所加正偏压的作用下向顶层方向运动. 对价带而言, 光空穴隧穿通过 AlAs 势垒层, 进入右侧 AlGaAs 层的空穴在 AlGaAs 层电场作用下能继续向右漂移; 而进入左侧 AlGaAs 层的空穴则积累在量子阱的左侧. 因而, 当外偏压很小时, 11H 吸收产生的电子和空穴的运动方向一致, 不会产生显著的空间分离, PV 谱上看不到明显信号; 偏压加到 1.87V 时, AlGaAs 能带变平, 光空穴不能向右漂移, 与在偏压下向右运动光电子产生空间分离, 形成光伏响应. 继续增大偏压时, AlGaAs 层保持平带, 量子阱区的电压降增大, 光电子向右的运动继续呈增强趋势, 因此电子空穴的空间分离更大, 11H 光伏响应增强.

能量阈值在 1.85eV 及 1.95eV 左右的 PV 信号被指认为分别对应量子阱的 12H, 12L 吸收, 图 2a 及 2b 中箭头所示. 量子阱中带间跃迁几率对量子阱的电场有很强的依赖关系, 在电场的作用下, 允许跃迁的几率减小, 禁戒跃迁的几率增大^[9]. 我们的样品中, 偏压很小时, 12H, 12L 跃迁几率很小; 正偏压加到 1.87V 时, AlGaAs 层接近平带, 开始有偏压降到量子阱区使阱区电场增强, 本来跃迁几率很小的 12H, 12L 跃迁几率增大. 光伏谱($V_b = 1.86\text{V}$)上首先出现 12H 信号, 12L 的光伏信号在 $V_b = 2.09\text{V}$ 谱线上开始出现但不明显. $V_b = 2.50\text{V}$ 及 3.00V 的光伏谱上 12H 和 12L 的光伏信号清晰可辨. 当 $V_b = 3.50\text{V}$ 时, 由于 12L 信号向低能方向移动与 12H 信号发生部分重叠, 使 12L 光伏信号的轮廓变得不明显. 对 12H, 12L 跃迁来说, 光空穴在量子阱中, 没有 AlGaAs 层电场的作用不能产生漂移; 光电子处于激发态, 量子阱右侧的 AlAs 势垒比左侧的 AlAs 势垒低, 电子很容易经 Γ -X 级联隧穿通过右侧 AlAs 势垒进入 AlGaAs 势垒层. 而 AlGaAs 层能带很平, 不阻碍电子的运动, 所以在阱区强电场的作用下, 光电子向右侧 AlGaAs 层中移动一定距离, 与光空穴发生空间分离, 产生光伏.

从 PV 谱还可以明显看到量子阱电场强度的变化对能级移动所产生的影响. 外偏压从 1.87V 增大到 3V 的过程中, 11H 和 12H 的光伏信号能量位置基本不动, 12L 的光伏信号红移大约 30meV . 理论上按量子限制 Stark 效应估算, 在中强场范围内, 电子能级 CB1, CB2 和重空穴基态能级 HH1 在变化电场中的能级移动很小, 而轻空穴基态 LH1 的能级移动很大. 实验结果与理论非常符合, 这进一步说明我们对光伏响应信号的指认和分析是正确的.

参 考 文 献

- [1] 徐士杰,江德生,红外与毫米波学报,1992,11:317.
- [2] B. F. Levine, C. G. Bethea, G. Hasnain *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1990, **56**: 851.
- [3] H. C. Liu, Jianmeng Li, J. R. Thompson *et al.*, IEEE Electron Devices Lett., 1993, **14**:NRC 37315.
- [4] H. Schneider J. Appl. Phys., 1993, **74**:4789.
- [5] K. L. Tsai, K. H. Chang, C. P. Lee *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1993, **62**: 3504.
- [6] Y. H. Wang, Jung-chi Chiang, Sheng S. Li *et al.*, J. Appl. Phys., 1994, **76**:2538.
- [7] H. Schneider, E. C. Larkins, J. D. Raiston *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1993, **63**:782.
- [8] 张耀辉,江德生,夏建白,等,半导体学报, 1996, **17**:151.
- [9] 夏建白,黄昆,物理学报, 1988, **37**: 1.

Photovoltaic Response under Varied Bias in 3~5 μ m Double Barrier Quantum Well Intersubband Photodetectors

Cui Liqiu^{1,2}, Jiang Desheng¹, Zhang Yaohui¹, Liu Wei¹,
Wu Wengang¹ and Wang Ruozhen²

(1 *National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

(2 *Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875*)

Received 18 December 1995, revised manuscript received 10 April 1996

Abstract Using photovoltaic spectra technique we investigated band-to-band photoreponse under different bias in double barrier quantum well IR photodetectors. The results support the assumption that during MBE growth some asymmetry may be introduced and a built-in electric field pointing to the substrate in the well regions is induced and has an opposite polarity across the AlGaAs barrier regions.

PACC: 0762, 7240, 6865