

# 表面电场导致 InGaAs/GaAs 量子阱 子带跃迁选择定则的改变

王小军<sup>a</sup> 刘 伟<sup>b</sup> 胡雄伟<sup>a</sup> 庄婉如<sup>c</sup> 王启明<sup>c</sup>

(a 国家光电子工艺中心 北京 100083)

(b 中国科学院半导体研究所超晶格室 北京 100083)

(c 集成光电子国家重点实验室 中国科学院半导体所区 北京 100083)

**摘要** 本文报道用 MOCVD 方法制作高质量的 InGaAs/GaAs 应变量子阱材料. 单量子阱样品在室温光伏谱中出现清晰的 11H、12H、21H 和 22H 激子吸收峰. 首次用室温光伏方法研究表面自建电场导致 InGaAs/GaAs 量子阱中子带间跃迁选择定则的改变.

PACC: 6855, 7390, 8170C

## 1 引言

合理近似下, 光伏  $V_{op}(\lambda)$  (这里  $\lambda$  为激发光波长) 近似正比于吸收系数  $\alpha(\lambda)$ , 因此可用来研究量子阱中子能级的电子状态分布. 光伏谱方法的检测灵敏度很高, 而且只需要简单的实验设备. 无论在材料生长中量子阱的组分、阱宽等结构参数的确定方面, 还是在一些物理研究方面, 都不失为一种重要而有效的实验方法.

已有许多工作在实验上和理论上对量子阱在电场下的性质进行了广泛研究, 并在这些研究结果的基础上设计了一些应用器件. 然而, 以往的实验大都是研究人为的外加电场对量子阱子能级间跃迁的影响. 本文研究了表面自建电场对 InGaAs/GaAs 量子阱中子能级间跃迁强度的影响. 表面电场固定地存在于每一种材料的样品表面, 研究它对量子阱中子能级跃迁的影响, 对于实际材料的器件应用方面具有重要的指导意义.

## 2 样品制备

所用样品均在法国 ASM 公司的 MOCVD 设备上生长. 生长源采用 TMG、TMI 和

王小军 男, 1968 年生, 博士后, 目前从事光电子材料和器件研究  
刘 伟 男, 1968 年生, 助理研究员, 从事半导体物理与材料测试研究  
王启明 男, 1933 年生, 中国科学院院士, 从事光电子物理与器件研究  
1995 年 11 月 14 日收到初稿, 1996 年 3 月 18 日收到修改稿

AsH<sub>3</sub>, 生长温度为 560℃, 生长压力 1×10<sup>4</sup>Pa.

所有样品均为非故意掺杂样品, 其结构如表 1 所示.

### 3 理论依据

#### 3.1 GaAs 衬底上 In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As 量子阱界面轻重空穴子带排列

铟组分较低时, In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As 量子阱界面轻重空穴价带断裂和导带断裂量的比值  $Q_c$  可认为恒定不变. 若设  $E_{gb}$  为垒层带隙,  $E_{gh}$ 、 $E_{gl}$  分别为阱层材料中重、轻空穴带隙,  $\Delta V_c$ 、 $\Delta V_h$ 、 $\Delta V_l$  分别为导带和重、轻空穴带界面断裂量, 则

$$\Delta V_c = Q_c(E_{gb} - E_{gh}) \quad (1)$$

$$\Delta V_h = (1 - Q_c)(E_{gb} - E_{gh}) \quad (2)$$

$$\Delta V_l = E_{gb} - Q_c(E_{gb} - E_{gh}) - E_{gl} \quad (3)$$

由以上各式可知, In 组分为任意值时, 轻重空穴给定为 I 类超晶格, 而轻空穴则在 In 组分为某个临界值时, 由 I 类超晶格转化为 II 类超晶格.

#### 3.2 III-V 族半导体材料的表面电场

于共价键半导体, 表面态密度和晶体表面原子密度同数量级, 约 10<sup>15</sup>cm<sup>-2</sup>·eV<sup>-1</sup>, 已足

以钉扎表面处的费密能级. 因而引起表面势垒区的产生和表面能带弯曲的出现. 锗、硅及砷化镓等大部分重要的半导体材料中, 都发现表面态电中性费密能级大约位于导带下约 2/3 禁带宽处. 因此, 无论 N 型或 P 型半导体都在表面产生能带弯曲. 一般认为 GaAs 表面费密能级钉扎于导带下 0.81eV, 价带上 0.61eV<sup>[1]</sup>. 图 1 为 GaAs 表面能带弯曲示意图.

耗尽层近似下, 空间电荷区宽度:

$$X_n = 4.91 \times 10^{-5} V_s^{1/2} \quad (\text{cm}) \quad (4)$$

这里  $V_s$  为表面势大小. 以表面为  $x$  轴原点, 电场分布为

$$E(x) = 0.083 \times 10^{10} (x_n - x) \quad (\text{V/cm}) \quad (5)$$

MOCVD 生长的材料中背景掺杂为 N 型, 施主浓度  $N_D$  约取 5×10<sup>15</sup>cm<sup>-3</sup>, 则 GaAs 材料中费密能级约在导带下 0.2eV, 因而表面势可取 0.61V. 由式(4)、(5)知, 电荷区宽度约 380nm, 最大电场强度约 2.1×10<sup>4</sup>V·cm<sup>-1</sup>.

#### 3.3 弱电场作用下量子阱中波函数变化及带间跃迁矩阵元的变化

阱宽较大时, 量子阱中电子态和空穴态寿命较大, 弱场作用下, 近似地可作稳态处理. 夏建白<sup>[2]</sup>等系统地计算了电场作用下量子阱中价带、导带中子带间光跃迁矩阵元的变化规律. 他们的计算表明, 随着电场的增大,  $\Delta n=0$  (这里  $\Delta n$  是量子阱中电子子带指数和空穴子带指数之差) 的光学跃迁选择定则将逐渐被  $\Delta n=\pm 1$  所代替, 这种转变发生在中等大小的电场强度时. 根据他们的计算, 阱宽为 10nm 左右的量子阱, 在电场强度为 2×10<sup>4</sup>V·cm 时, 电场导致的子能级间跃迁能量的变化可以忽略. 但是所谓的 1E-2H, 2E-1H 禁戒跃迁的强度

表 1 样品结构

样品编号	InGaAs 阱		垒宽	结构说明
	阱宽	In 组分		
No. 120	9.7nm	0.18	86nm	SQW
No. 090	5nm	0.16	33nm	MQW

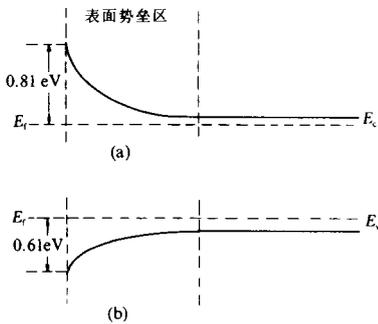


图 1 N 型(a)P 型(b)GaAs 表面能带弯曲示意图

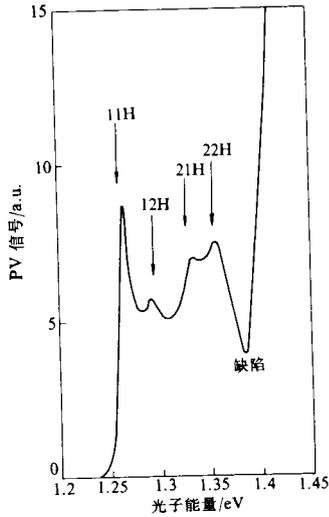
已经很大.

## 4 实验结果及讨论

光伏谱测量采用电容耦合方式,室温测量,单色仪驱动和数据采集都由计算机控制.两个电极板感生的电信号经 EG&G Model 5210 锁相放大器放大后由计算机采集.

### 4.1 实验结果

对 GaAs 衬底上, InGaAs/GaAs 量子阱的室温光伏谱进行测量. 编号为 No. 120 的 InGaAs/GaAs 单量子阱样品的室温光伏谱如图 2 所示. 样品的结构在表 1 中给出. 图 2 中, 位于 1.38~1.39eV 能量位置处的负的吸收峰, 与某种缺陷能级的吸收有关, 存在于我们测试的绝大多数 InGaAs/GaAs 量子阱样品中. Cerdeira<sup>[3]</sup>也曾发现过类似的能级.



为了对图 2 中各峰给予指认, 用 Kronig-Penney 模型对量子阱的子能级结构进行计算. 结果如表 2 所示.

表 2 No. 120 样品的能级结构计算及实验测试结果

能级标称	10K (PL)		300K (PV)	
	理论 (eV)	实验 (eV)	理论 (eV)	实验 (eV)
11H	1.351	1.350	1.265	1.265
12H	1.368		1.282	1.291
21H	1.431		1.343	1.334
22H	1.447		1.359	1.358
11L	1.404		1.326	

图 2 No. 120 样品的室温光伏谱

根据计算结果结合谱图指认, 将有两个问题需要解释: 为什么 12H、21H 激子吸收峰强度很大; 为什么不出现 11L 的激子吸收峰?

为此, 对 No. 090 样品进行了类似的测量. No. 090 样品与 No. 120 样品生长条件相近. 但前者阱宽设计较窄、铟组分略低, 因而阱中子能级数量较少, 便于能级指认. 且有十二个重复周期, 易于特性测量. No. 090 样品的室温光伏谱如图 3 所示. 为共同完成对 No. 090 样品的光伏谱图指认, 在图 4 中, 给出了 No. 090 样品的室温光调制谱.

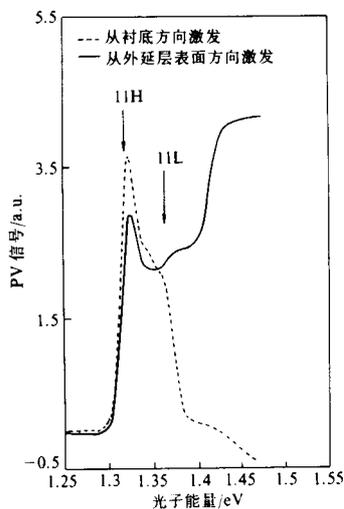


图 3 No. 090 样品的室温光伏谱

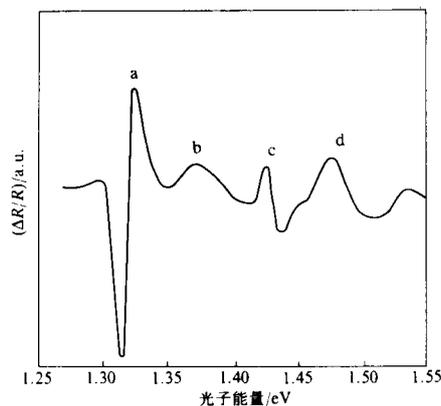


图 4 No. 090 样品的室温光调制谱

## 4.2 实验结果讨论

表 3 给出了 No. 090 样品的子能级理论计算结果及光学方法测试结果.

对照表 3 的计算结果可知,在图 4 中给出的 No. 090 样品的 PR 谱中, a 结构对应 InGaAs/GaAs 量子阱中的 11H 跃迁, b 结构对应 11L 跃迁. c 结构为标准的 GaAs 带边吸收, d 结构为 Franz-keldysh 振荡, 表明空间电场为中等强度<sup>[3]</sup>. 参

考江德生<sup>[4]</sup>关于子带间跃迁和激子跃迁的 PR 谱形计算, 根据图 3、图 4 可知, 对于 InGaAs/GaAs 量子阱, Seraphin coefficients  $\alpha \ll \beta$ , 即激子吸收对应的谱形为正负双峰结构, 带带吸收对应的谱形为单峰结构. 这与 GaAs/GaAlAs 量子阱的情况刚好相反. 由此可知, 在上述结构的 InGaAs/GaAs 量子阱中, 重空穴的跃迁为激子吸收, 而轻空穴跃迁类似于带带吸收. 这与图 3 中 No. 090 样品在 11L 跃迁能量位置不出现激子吸收峰而只出现类似于带带跃迁的台阶状结构的结果相符合. 我们认为, 其本质原因在于, 当 In 组分为  $x=0.16$  时, InGaAs/GaAs 量子阱中的重空穴子带属 I 类超晶格, 轻空穴子带属 II 类超晶格<sup>[5]</sup>. 因此, 电子束缚于 InGaAs 层而轻空穴束缚于宽度为 33nm 的 GaAs 层. 由于宽度很大, 量子效应很小, 故 11L 跃迁类似于带带吸收.

图 3 中给出的光伏曲线中规定, 激发光从外延层一边入射时为正面入射, 从衬底一边入射时为反面入射. 由于外延层和衬底均为非故意掺杂, 因此可以认为在样品的正面和反面存在着类似的表面能带弯曲, 但电场的方向相反. 所以在较低能位置 (小于 1.36eV), 正反入射和反面入射的光伏曲线形状类似; 而在入射光能量较大时, 对入射光来说, 衬底不再是透明的. 一方面, 到达外延层表面的入射光强度下降, 另一方面在反面, 产生与正面符号相反的

表 3 No. 090 样品中量子阱能级计算及测试结果

能级标称	10K (PL)		300K (PV 和 PR)	
	理论 (eV)	实验 (eV)	理论 (eV)	实验 (eV)
11H	1.410	1.412	1.322	1.322
11L	1.450		1.367	1.369

光伏信号. 因此反面入射时, 样品的光伏信号在高端下降甚至变为负值. 这进一步表明光伏信号主要产生于表面电场.

根据上述讨论, 便可对图 2 中 No. 120 样品的光伏曲线给予很好解释. No. 120、No. 090 样品生长条件相同, 因而可认为其表面状况相似. No. 120 样品中阱层 In 组分为 0.18, 同样其重空穴限制于 InGaAs 层. 轻空穴限制于 GaAs 层中. 由于 GaAs 层较厚, 类似于 No. 090 样品, 11L 跃迁类似带带吸收而非激子吸收. 因此光伏谱中 11L 跃迁能量位置处不出现激子吸收峰.

参考文献[2]中的计算结果, 我们认为表面电场导致了 No. 120 样品中 12H, 21H 禁戒的解除. 上边的讨论表明与重空穴相关的跃迁为激子吸收, 因此光伏谱出现了很强的 12H, 21H 激子吸收峰.  $\Delta n=0$  的子能级间跃迁强度随着电场增大而减小,  $\Delta n=\pm 1$  的子能级间跃迁强度随着电场的增大而增大. 这一点不难理解. 因为量子阱的势垒相对于原点是偶对称的, 而电场势是奇对称的. 加上电场后, 原来的偶(奇)对称态中必然混入奇(偶)对称的态, 致使  $\Delta n=\pm 1$  的跃迁禁戒解除. 电场越大, 这种混合就越强, 使得  $\Delta n=\pm 1$  的跃迁强度甚至超过  $\Delta n=0$  的跃迁.

## 4 结 论

本文报道了用 MOCVD 方法生长出高质量的 InGaAs/GaAs 量子阱材料. 单量子阱样品室温光伏谱中可观察到清晰的 22H 激子吸收峰. 发现表面自建电场即可引起 InGaAs/GaAs 量子阱中跃迁选择定则的变化. 用最简单的光伏测试方法, 在室温得到了强而清晰的 12H、21H 激子吸收峰.

**致谢** 感谢国家光电子工艺中心 MOCVD 组郑联喜、肖智博和邓力生同志在生长样品时给予的大力帮助. 感谢中国科学院半导体所超晶格室张耀辉博士的有益讨论.

## 参 考 文 献

- [1] C. Van Hoof *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1989, **54**: 608.
- [2] 夏建白, 黄昆, 物理学报, 1988, **37**: 1.
- [3] F. Cerdeira *et al.*, Phys. Rev., 1990- I, **B42**: 9480.
- [4] D. S. Jiang *et al.*, Chinese J. of infrared and Milimeter Waves., 1988, **8**: 18.
- [5] S. C. Shen *et al.*, ICPS-20, 1990, **2**: 921.

## Change of Selection Rule in InGaAs/GaAs QWs Caused by Surface Electric Field

Wang Xiaojun<sup>a</sup>, Liu Wei<sup>b</sup>, Hu Xiongwei<sup>a</sup>, Zhuang Wanru<sup>c</sup> and Wang Qiming<sup>c</sup>

*(a National Research Center for Optoelectronic Technology, Beijing 100083)*

*(b National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductor, CAS, Beijing 100083)*

*(c National Integrated Optoelectronic Lab., Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)*

Received 14 November 1995, revised manuscript received 18 March 1996

**Abstract** InGaAs/GaAs quantum well material with high quality is grown by MOCVD. The PV spectra of a single quantum well sample at room temperature shows sharp, strong 11H, 12H, 21H, 22H exciton absorption peaks. For the first time, the change of selection rule in InGaAs/GaAs quantum wells caused by surface electric field is investigated by a simple PV method.

**PACC:** 6855, 7390, 8170C