

# 组合离子注入导致非对称耦合双量子阱界面 混合效应光调制反射光谱\*

缪中林<sup>1,2</sup> 陆 卫<sup>1,2</sup> 陈平平<sup>1,2</sup> 李志锋<sup>1,2</sup> 刘 平<sup>1</sup> 袁先漳<sup>1</sup> 蔡炜颖<sup>1</sup>  
徐文兰<sup>1</sup> 沈学础<sup>1</sup> 陈昌明<sup>2</sup> 朱德彰<sup>2</sup> 胡 军<sup>2</sup> 李明乾<sup>2</sup>

(1 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)  
(2 中国科学院上海原子核研究所 核分析技术开放实验室, 上海 201800)

**摘要:** 用分子束外延系统(MBE)生长了 GaAs/AlGaAs 非对称耦合双量子阱(ACDQW), 用组合离子注入的方法, 在同一块衬底上获得了不同注入离子 As<sup>+</sup>、H<sup>+</sup> 和不同注入剂量的 GaAs/AlGaAs 非对称耦合双量子阱单元, 在未经快速热退火的条件下, 于常温下测量了光调制反射光谱, 发现各单元的子带间跃迁能量最大变化范围可达 80meV.

**关键词:** 非对称耦合双量子阱(ACDQW); 组合注入; 光调制反射光谱(PR); 界面混合

**PACC:** 7320; 7360; 7865; 4280K

**中图分类号:** O433.5<sup>+</sup>9 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2001)06-0721-05

## 1 引言

量子阱中子带间跃迁的光电器件如长波长红外探测器、激光器、波导器件近年来发展十分迅速. 制造这类器件过程中一个关键技术就是对材料进行后处理, 按照实际需要改变材料的能带结构, 调节器件的能级位置、光吸收、折射率及迁移率等. 非对称耦合双量子阱(ACDQW)近年来引起人们浓厚研究兴趣<sup>[1-4]</sup>, 当两个量子阱之间的势垒层厚度接近或小于德布罗意波长的时候, 由于电子波函数的耦合会产生一些有趣的特性, 比如在非对称量子阱中可以观察到单个对称量子阱中禁戒的子能带间跃迁<sup>[5]</sup>.

对于 GaAs/AlGaAs 量子阱异质结构, 界面上 As 原子和 Al 原子选择性互扩散可以有效地改变能带结构, 实现这种界面混合效应的技术手段, 有激光诱导<sup>[6-8]</sup>、缺陷诱导<sup>[9-11]</sup>、离子注入诱导<sup>[12, 13]</sup>等. 目前应用比较广泛的离子注入引入界面混合是典型的

改变能带结构的方法, 注入能量在 30—200keV<sup>[14]</sup> 之间, 然后进行快速热退火, 以进一步增强界面原子互扩散. 在本文的实验中, 发现低能离子注入以后没有经过快速热退火也能有效地改变能带结构.

在我们的实验中选取 As 和 H 作为注入离子源, As 在 GaAs/AlGaAs 耦合量子阱中不会成为具有电学活性的掺杂剂, 而 H 的原子半径小, 能够快速扩散到衬底内部, 残留在量子阱层的原子很少, 引入的缺陷也比较少<sup>[15, 16]</sup>. 用组合注入<sup>[17]</sup>的方法在同一块材料上不同区域注入不同剂量的 H<sup>+</sup> 和 As<sup>+</sup>, 获得了 25 个不同发光波长量子阱发光区域. 研究了不同剂量离子注入以及组合注入 H<sup>+</sup> 和 As<sup>+</sup> 对量子阱发光峰位的影响.

## 2 实验

本实验所用的样品是用在 Riber 32 型分子束外延(MBE)系统中生长的. 为了减小应变和缺陷,

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69676014).

缪中林 男, 1973 年出生, 博士生, 当前研究兴趣为 III-V 半导体低维结构生长, 组合注入导致的半导体异质结构界面混合效应, 半导体低维结构的光学性质等.

2000-07-28 收到, 2000-10-09 定稿

©2001 中国电子学会

GaAs(100) 衬底脱氧后先生长了 500nm 的过渡层, 再生长 50nm  $\text{Al}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  势垒层, 然后依次为 3nm GaAs 势阱层、2nm AlAs 势垒、7nm GaAs 势阱、50nm  $\text{Al}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  势垒层, 最后是 20nm GaAs 表面保护层. 外延生长在量子阱和垒的界面处都中断 10s, 以使界面恢复得更平整, 外延生长的速率和 Al 的组分由 RHEED 振荡来测定. 样品结构如图 1 所示.

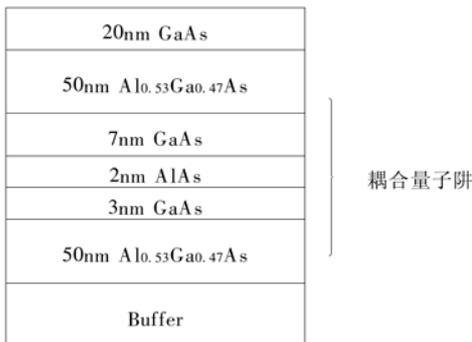


图 1 样品结构

FIG. 1 Structure of Sample

对界面进行混合的典型方法是先离子注入, 然后对样品进行快速热退火. 而我们选择不经过热退火, 研究由于离子注入引入缺陷并在离子注入过程中的自然升温, 导致界面混合而引起的耦合量子阱能带结构的变化. 室温下用一块厚度为 0.5mm 的铝制掩模板控制  $\text{As}^+$  和  $\text{H}^+$  对样品不同区域的注入. 一块掩模板上分布有直径为 2mm、中心间距为 3mm 的小孔列阵, 在注入过程中, 这块掩模板与样品接触并且保持不动. 另外一块无图案的掩模板在注入过程中沿固定掩模板顺序移动, 使得固定掩模板上的小孔逐行或逐列顺序暴露在离子束中, 以获得不同注入剂量和组分的单元. 在实际注入过程中, 先逐列顺序注入  $\text{As}^+$ , 得到四种  $\text{As}^+$  注入剂量, 分别为  $5 \times 10^9$ 、 $5 \times 10^{11}$ 、 $5 \times 10^{13}$  和  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ . 注入剂量的多少根据时间来控制, 每列标为  $\text{As}_1$ 、 $\text{As}_2$ 、 $\text{As}_3$ 、 $\text{As}_4$ , 注入能量为 80keV, 选择这样的注入能量, 目的是使质子注入的分布峰处于耦合量子阱中的 AlAs 势垒层上. 然后再逐行注入  $\text{H}^+$ , 得到  $\text{H}^+$  的注入剂量为  $5 \times 10^9$ 、 $5 \times 10^{11}$ 、 $5 \times 10^{13}$  和  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ , 每行分别标为  $\text{H}_1$ 、 $\text{H}_2$ 、 $\text{H}_3$ 、 $\text{H}_4$ , 注入能量为 40keV. 这样标为  $\text{As}_i$  的一行没有  $\text{H}^+$  只有  $\text{As}^+$  注入, 注入剂量分别为  $0$ 、 $5 \times 10^9$ 、 $5 \times 10^{11}$ 、 $5 \times 10^{13}$  和  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ , 标

为  $\text{H}_i$  的一列只有  $\text{H}^+$  而没有  $\text{As}^+$  注入, 注入剂量分别为  $0$ 、 $5 \times 10^9$ 、 $5 \times 10^{11}$ 、 $5 \times 10^{13}$  和  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ . 而处于掩模板对角线区域为两种离子混合注入的区域, 如图 2 所示. 由于注入而引起的样品温度升高不超过  $100^\circ\text{C}$ , Oshinowo 等人的研究表明, 在此温度下的界面混合主要是由于注入引起的<sup>[18]</sup>.

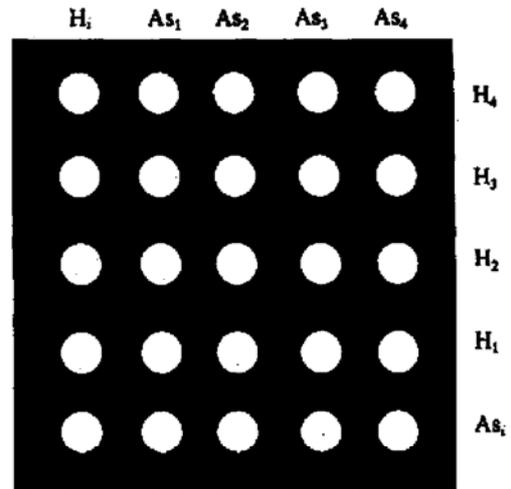


图 2 组合注入以后得到不同掺杂剂量和组分的单元示意图

FIG. 2 Area Diagram After Combinatorial Implant Different Ion Doses and Different Ions

在室温下测量光调制反射光谱 (PR) 来研究样品的能带间复合跃迁性质. 光调制反射光谱的探测光源为溴钨灯, 调制光为 He-Ne 激光器的 632.8nm 线, 通过单色仪分光后由硅光二极管探测器探测. 探测信号由锁相放大器放大后经过 A/D 转换由计算机记录.

### 3 结果及讨论

图 3 为注入不同剂量  $\text{H}^+$  时耦合量子阱室温 PR 谱, 曲线 a 为没有注入之前的 PR 谱, b、c、d、e 分别为注入离子剂量  $5 \times 10^9$ 、 $5 \times 10^{11}$ 、 $5 \times 10^{13}$  和  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$  的 PR 谱. 1.53eV 处的跃迁峰认为是第一重空穴子带到第一电子子带的跃迁峰 (hh1- $\epsilon_1$ ), 1.56eV 处为第一轻空穴子带到第一电子子带的跃迁峰 (lh1- $\epsilon_1$ ), 1.71、1.74eV 处的两个峰指认为 hh4- $\epsilon_2$  和 lh2- $\epsilon_2$  的跃迁. 1.78eV 处指认为 GaAs 衬底的  $E_0 + \Delta_0$  能谷跃迁, 在注入过程中, 该跃迁峰移动量较小并且峰形基本保持不变.

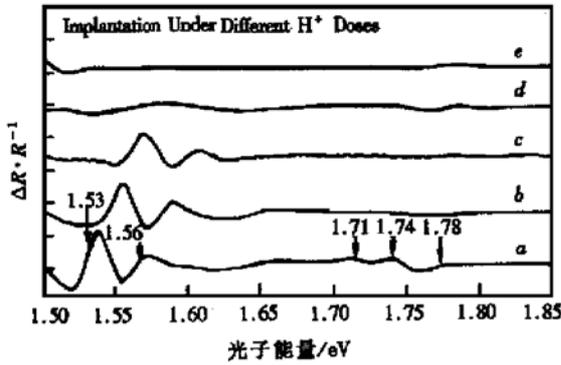


图3 注入不同剂量  $H^+$  的 PR 谱 曲线 a: 无; 曲线 b:  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ; c:  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ; d:  $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ; e:  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

FIG. 3 PR Spectra with Different  $H^+$  Doses Implanted Curve a: none; b:  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ ; c:  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ; d:  $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ; e:  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

采用有效质量近似理论计算注入之前的耦合量子阱能带结构. 对于组分  $x = 0.53$  的 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  非直接带隙体系, 带隙与 Al 组分的关系为:

$$E_g^\Gamma = 1.424 + 1.247x + 1.147(x - 0.45) \quad (1)$$

GaAs 电子与空穴有效质量分别为:

$$m_n^\Gamma = 0.067m_0 \quad m_p^\Gamma = 0.48m_0$$

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  有效质量随组分线性变化:

$$m_n^\Gamma = (0.067 + 0.083x)m_0$$

$$m_p^\Gamma = (0.48 + 0.31x)m_0$$

导带带阶取为  $0.6\Delta E_g$ , 势阱和势垒的宽度取生长过程中 RHEED 监控得到的值. 表 1 为有效质量理论计算值和实验值的比较, 从表 1 可看出实验值与理论值比较吻合.

表 1 有效质量理论计算值和实验值比较

Table 1 Comparison of Theoretical Values Calculated with Effective Mass Approximation Theory and Experimental Values

子带间跃迁/eV	hh1-e1	lh1-e1	lh2-e2
实验值	1.53	1.56	1.74
理论值	1.49	1.53	1.72

从图 3 中可以看到, 耦合量子阱的跃迁峰随注入剂量的增加向高能方向移动, 同时跃迁峰的峰形也不断展宽, 而高能激发态的跃迁峰在注入剂量达到  $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时就发生淬灭. 注入剂量达到  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  时, 基态跃迁峰消失.

在质子注入的过程中, 尽管自加热温度较低, 但在此温度环境下 III 族原子或空位获得能量已开始相互扩散. 经过扩散以后, Ga 原子与 Al 原子, Ga 空位与 Al 空位互换, Al 原子在界面上的分布不再陡峭, 导致势阱和势垒的组分发生了变化, 呈高斯分布<sup>[17]</sup>. 采用有效质量近似理论得到图 4, 势阱由原来的方形势阱转为由误差函数决定的形状, 电子子带在导带中的位置被抬高, 同样, 空穴子带距离价带顶的距离也增加. 所以注入以后, 随着注入剂量的增加, 受限态跃迁峰向高能方向移动.

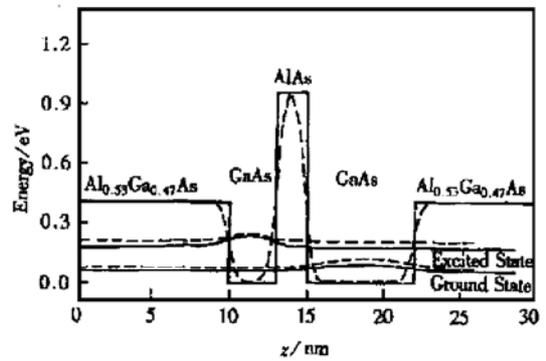


图 4 理想 GaAs/AlGaAs 方耦合量子阱在注入质子以后导致界面混合的势分布 实线为理想方势阱中的电子子带能级位置, 虚线为界面混合以后电子子带能级位置.

FIG. 4 Ideal Schematic Conduction Band Energy Profile of the GaAs/AlGaAs Square Coupling Double Quantum Well and Potential Distribution Before (Solid Line) and After (Dotted Line) Intermixing

离子注入引起的缺陷使材料中载流子的迁移率大大下降, 为此光调制中光生载流子通过向表面与界面迁移构成空间电场能力也随之下降, 从而导致了随着注入剂量的增加调制光谱结构的强度下降, 最终来自量子阱中的跃迁峰消失.

在注入  $\text{As}^+$  和组合注入两种离子的谱中(见图 5、6), 也有相同的变化规律, 在注入  $\text{As}^+$  的 PR 谱中, 当注入剂量为  $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  时, 基态跃迁峰消失, 而在组合注入谱中, 当离子剂量达到  $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  时, 基态跃迁峰消失.

图 7 为注入剂量为  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  时  $H^+$ 、 $\text{As}^+$  和组合注入  $H^+$ 、 $\text{As}^+$  时的 PR 谱, 从图中看到, 组合注入引起的跃迁峰的移动量最大. 这种现象解释为, 组合注入以后的注入剂量总大于单独注入的剂量.

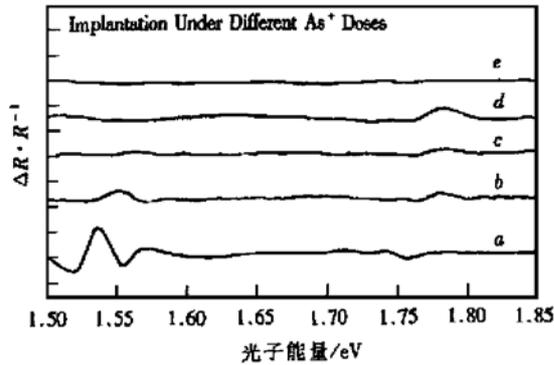


图 5 注入不同剂量  $\text{As}^+$  的 PR 谱 曲线  $a$ : 无;  $b$ :  $5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ ;  $c$ :  $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ;  $d$ :  $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ;  $e$ :  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$

FIG. 5 PR Spectra with Different  $\text{As}^+$  Doses Implanted Curve  $a$ : none;  $b$ :  $5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ ;  $c$ :  $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ;  $d$ :  $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ;  $e$ :  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$

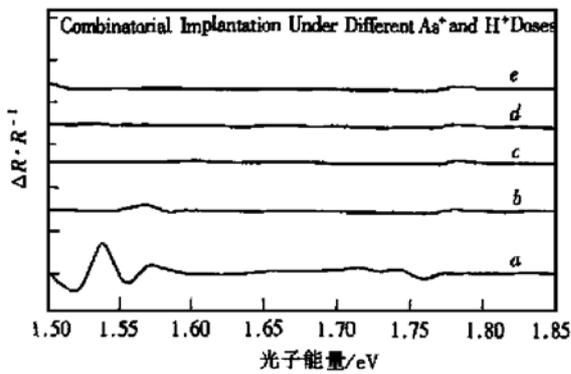


图 6 不同剂量  $\text{H}^+$ 、 $\text{As}^+$  组合注入时的 PR 谱  $\text{H}^+$  与  $\text{As}^+$  离子注入浓度分别为曲线  $a$ : 无;  $b$ :  $5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ ;  $c$ :  $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ;  $d$ :  $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ;  $e$ :  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$

FIG. 6 PR Spectra with Combinatorial Implantation with Different  $\text{H}^+$  and  $\text{As}^+$  Doses,  $\text{H}^+$  and  $\text{As}^+$  Doses Curve  $a$ : none;  $b$ :  $5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ ;  $c$ :  $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ ;  $d$ :  $5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ;  $e$ :  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$

## 4 结论

用 MBE 的方法生长了 GaAs/AlGaAs 非对称耦合量子阱, 组合注入  $\text{As}^+$  和  $\text{H}^+$ , 在同一块样品上获得了不同注入剂量和不同注入离子的单元. 在常温下测量了不同单元的光调制反射光谱 (PR), 在没有经过快速热退火的条件下, 子带间跃迁能量最大达到 80meV 的蓝移.

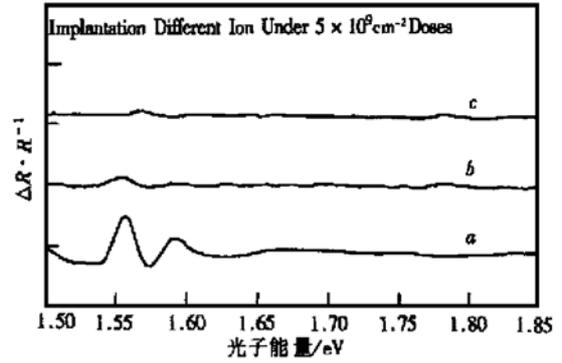


图 7 注入剂量为  $5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$  PR 谱 曲线  $a$ :  $\text{H}^+$ ;  $b$ :  $\text{As}^+$ ;  $c$ :  $\text{H}^+$ ,  $\text{As}^+$

FIG. 7 PR Spectra with Implanting Different ion Under  $5 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$  Doses Curve  $a$ :  $\text{H}^+$ ;  $b$ :  $\text{As}^+$ ;  $c$ :  $\text{H}^+$ ,  $\text{As}^+$

## 参考文献

- [ 1 ] Y. W. Suen, D. C. Hall, L. J. Guido *et al.*, Phys. Rev. Lett., 1992, **68**: 1379.
- [ 2 ] K. Moon, G. J. Dolan, S. J. Pearton *et al.*, Phys. Rev., 1995, **B51**: 5138.
- [ 3 ] H. Akera, B. E. Maile, G. Mayer *et al.*, Physica, 1994, **B201**: 255.
- [ 4 ] R. J. Radtke, H. Asahi, S. Jae Yu *et al.*, Phys. Rev., 1996, **B54**: 13832.
- [ 5 ] Y. Takagaki, K. Muraki and S. Tarucha, Phys. Rev., 1997, **B56**: 1057.
- [ 6 ] D. Kirillov, J. L. Merz, P. D. Dapkus *et al.*, J. Appl. Phys., 1984, **55**: 1105.
- [ 7 ] J. E. Epler, R. D. Burnham, R. L. Thornton *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1986, **49**: 1447.
- [ 8 ] J. Ralston, A. L. Moretti, R. K. Jain *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1987, **50**: 1817.
- [ 9 ] W. D. Laidig, N. Holonyak, Jr., M. D. Camras *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1981, **38**: 776.
- [ 10 ] M. D. Camras, N. Holonyak, Jr., J. M. Brown *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1983, **42**: 185.
- [ 11 ] K. Meehan, N. Holonyak, Jr., J. M. Brown *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1984, **45**: 549.
- [ 12 ] P. Gavrilovic, D. G. Deppe, K. Meehan *et al.*, Appl. Phys. Lett., 1985, **47**: 130.
- [ 13 ] Y. Hirayaman, Y. Suzuki and H. Okamoto, Jpn. J. Appl. Phys., 1985, **24**: 1498.
- [ 14 ] S. Charbonneau, P. J. Poole, P. G. Piva *et al.*, J. Appl. Phys., 1995, **78**: 3697.
- [ 15 ] D. Kirillov, P. Ho and G. A. Davis, Appl. Phys. Lett., 1986, **48**(1): 53.
- [ 16 ] Redinbo G. F., Craighead H. G. and Hong J. M., J. Appl.

Phys., 1993, **74**: 3099.

Science, 1995, **268**: 1738.

[17] Xiang X. D., Sun X. D., Briceno G., Lou Y. L. *et al.*,

## Intermixing of Asymmetrical Coupling Double Quantum Well via Combinatorial Ion Implantation with Photo-Modulated Reflectance Spectrum\*

MIAO Zhong-lin<sup>1,2</sup>, LU Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Ping-ping<sup>1,2</sup>, LI Zhi-feng<sup>1,2</sup>, LIU Ping<sup>1</sup>,  
YUAN Xian-zhang<sup>1</sup>, CAI Wei-ying<sup>1</sup>, XU Wen-lan<sup>1</sup>, SHEN Xue-chu<sup>1</sup>,  
CHEN Chang-ming<sup>2</sup>, ZHU De-zhang<sup>2</sup>, HU Jun<sup>2</sup> and LI Ming-qian<sup>2</sup>

(*1 National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

(*2 Joint Open Laboratory of Nuclear Analysis Techniques, Shanghai Institute of Nuclear Research,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

**Abstract:** GaAs/AlGaAs asymmetrical coupling double quantum well (ACDQW) has been grown with molecule beam epitaxy (MBE). With combinatorial implantation methods, several areas with different implantation ion of As<sup>+</sup> and H<sup>+</sup> and different ion doses have been obtained on only a single substrate. Without rapid thermal annealing procedure, the maximum difference of transition energy in sub-bands is found to be 50meV from the photo-modulated reflectance spectra.

**Key words:** asymmetrical coupling double quantum well (ACDQW); combinatorial implantation; photo-modulated reflectance spectrum; intermixing

**PACC:** 7320; 7360; 7865; 4280K

**Article ID:** 0253-4177(2001)06-0721-05

---

\* Project Supported by National Natural Science Foundation of China Under Grant No. 69676014.

MIAO Zhong-lin was born in 1973, doctoral candidate. His current research interests include III-V low-dimension semiconductor growth, studies on the intermixing of semiconductor heterostructures via combinatorial implantation and semiconductor heterostructures characteristics, etc.