

研究快报

# 量子阱中 $\delta$ 掺杂的光谱特性\*

徐仲英 谢茂海 徐 强 郑宝真 孔梅影

(中国科学院半导体研究所,国家超晶格微结构实验室,北京)

1989年7月11日收到

用  $\delta$  掺杂的方法实现了 Be 受主在量子阱边界和阱中央的分布,并用光致发光实验证实了这种掺杂的实际效果。第一次用人为的实验方法证实了量子阱中杂质态密度分布的有关理论计算结果。

主题词  $\delta$  掺杂, 光谱特性

自从 1980 年 Wood<sup>[1]</sup> 等人为改善分子束外延 GaAs 的杂质分布, 提出  $\delta$  掺杂概念以来, 由于它在二维器件和物理研究中的重要性, 越来越受到人们的广泛关注。人们已经研制成功  $\delta$  掺杂二维电子气 GaAs FET<sup>[2]</sup>, 发展了新型锯齿形掺杂超晶格<sup>[3]</sup>, 选择  $\delta$  掺杂 HEMT, 并实现了  $\delta$  掺杂非合金化 GaAs 欧姆接触<sup>[4]</sup>。另一方面, 有关量子阱中的杂质行为也开展了广泛的讨论, 理论分析<sup>[5]</sup>和实验<sup>[6-8]</sup>表明: 对一个均匀掺杂(或残留杂质)的量子阱来说, 杂质带简并解除, 态密度可具有两个极大值, 一个位于阱中心, 另一个位于阱边缘, 相应的杂质束缚能表现为阱宽和杂质位置的函数, 从杂质光谱特性可以区分阱边缘杂质发光或阱中心杂质发光。

本工作用  $\delta$  掺杂的方法有意把杂质掺在量子阱边界或阱中央, 并用光致发光实验证实这种掺杂的实验效果。第一次用人为的掺杂方法, 实验证实量子阱中杂质态密度有关的理论计算结果。

实验样品采用单量子阱结构, 从而避免了生长多量子阱结构过程中可能引入的其他误差。样品由 MBE 生长, 具体工艺过程如下: 衬底材料为半绝缘 (100) GaAs, 生长温度 580°C, 首先生长一层 GaAs 缓冲层, 厚度 1 μm, 接着生长 1000 Å 的 Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As 势垒层, 100 Å 的 GaAs 量子阱层, 最后生长 1000 Å 厚的 Ga<sub>0.7</sub>Al<sub>0.3</sub>As 限制层。 $\delta$  掺杂是通过中断 GaAs 基质材料, 关闭 Ga 挡板, 并让 As 挡板开启以形成稳定的 As 表面。与此同时打开 Be 炉, 炉温为 800°C, 开启数秒钟\*\*, 掺杂浓度大约为  $\sim 10^{17}/\text{cm}^3$ , 要继续生长 GaAs, 关闭 Be 炉, 打开 Ga 炉。GaAs 生长速率为 1 μm/h。生长过程用 RHEED 监测。

\* 本工作得到国家科委超晶格课题重大基金和中国科学院超晶格重点基金的资助。

\*\* 本实验中炉温较高, 因此开启时间很短, 为便于控制, 应降低炉温, 增长开启时间。

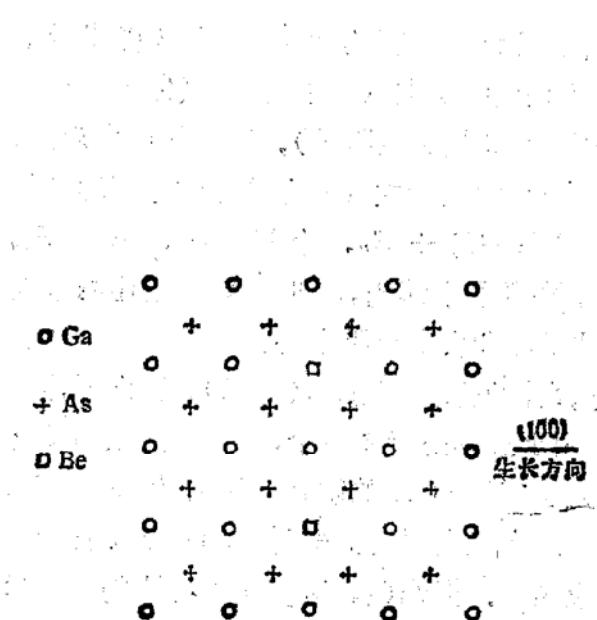
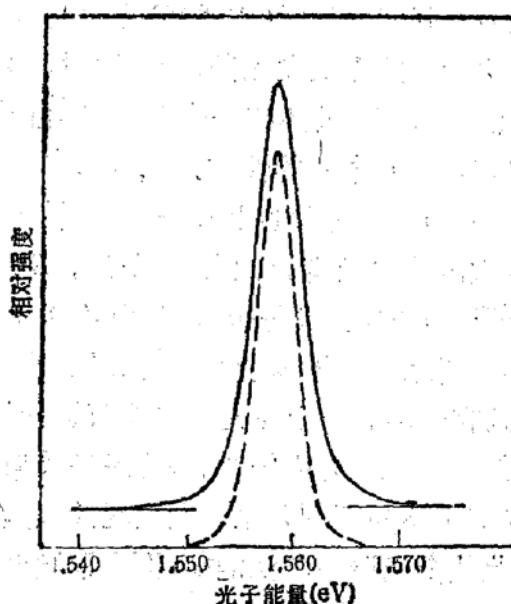
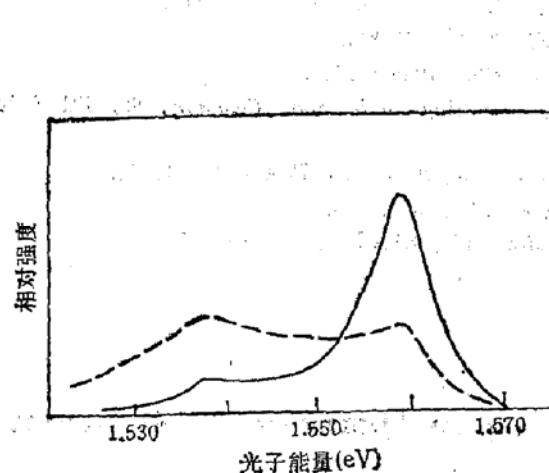
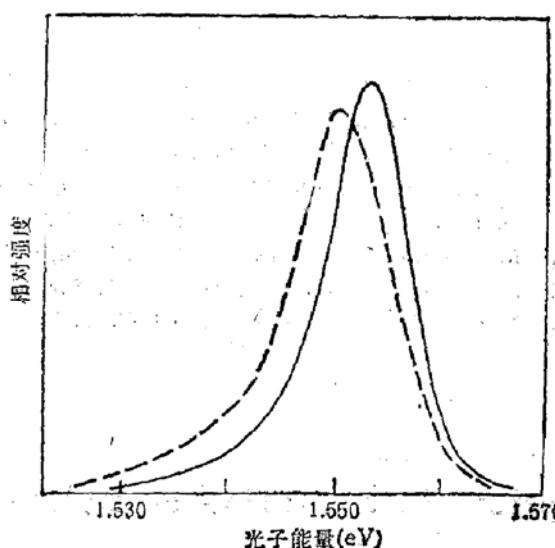
图1  $\delta$ 掺杂示意图图2 不掺杂样品(样品1)的光致发光谱  
实线: 激发强度  $10 \text{ W/cm}^2$ ; 虚线: 激发强度  $1 \text{ W/cm}^2$ 图3 阵中央掺杂样品(样品2)的低温光致发光谱  
激发强度: 虚线为  $1 \text{ W/cm}^2$ , 实线为  $10 \text{ W/cm}^2$ 图4 界面附近掺杂样品(样品4)的低温光  
致发光谱, 激发强度: 实线为  $10 \text{ W/cm}^2$ ,  
虚线为  $1 \text{ W/cm}^2$ 

图1为 $\delta$ 掺杂示意图, Be原子位于(100)GaAs晶体的单原子层内, 代替Ga位, 作为受主。在同样的工艺条件下, 共外延生长四个样品: 样品1为非掺杂单量子阱, 样品2在阱中央处 $\delta$ 掺杂, 即当阱宽生长一半时, 打开Be炉进行 $\delta$ 掺杂。另外两个样品在界面附近进行 $\delta$ 掺杂, 其中样品3是在GaAs阱层长完之后掺杂, 接着生长GaAlAs限制层, 而样品4则在 $\delta$ 掺杂后再继续生长10 Å GaAs, 再生长GaAlAs顶层。光谱测量表明, 后两种情况在光谱上区别不大, 从掺杂效果上, 样品4更明显一些。

图2到图4分别为样品1、2、4在10 K下的光致发光光谱。对不掺杂样品(图2), 发光是尖锐单峰, 位于1.558 eV, 对应重空穴激子发光, 光谱结构中没有观察到杂质发

光。光激发强度增加时(实线)除光谱略有展宽外,光谱特征没有发生变化。图3虚线所示为阱中央掺杂的光致发光谱,低激发时,除观察到相应的重空穴激子发光峰(位于1.559)之外,在1.537 eV处还有一个低能峰,当激发强度增加时(实线所示),该峰呈饱和趋势,表现出有限杂质中心的性质。该峰为 $n=1$ 电子与中性受主Be上的空穴之间的发光跃迁( $e-A^0$ ),相应杂质电离能 $E(A^0)=E_{1h}-E(e-A^0)+E_B$ ,为30 meV,其中 $E_{1h}$ 为重空穴激子发光能量,由实验得到, $E_B$ 为量子阱激子束缚能,取8 meV。上述结果与Bastard<sup>[5]</sup>的理论计算符合甚好,说明 $\delta$ 掺杂的结果使杂质位于阱中心。

图4所示是边界掺杂的情况,光谱明显增宽,当激发强度减弱时(虚线)光谱向低能移动,并且有所增宽。上述光谱特性可解释如下:由于边界附近 $\delta$ 掺杂,使对应的杂质发光增强,但由于整个光谱较宽,阱边缘杂质束缚能较小(对100 Å的阱宽理论值为13 meV),因此光谱上不易区别开来,而表现为较宽的光谱。当激发强度减弱时,相应杂质发光增强,因此整个光谱移向低能端;而光谱宽度也相应增加。很明显,这些光谱特性与中央掺杂样品相比明显不同。

总之,我们用人为控制的方法进行 $\delta$ 掺杂实现了杂质在量子阱中(或其他结构中)的精确分布,本工作还进一步验证了量子阱中杂质带态密度分布的有关理论计算结果。

### 参 考 文 献

- [1] C. F. C. Wood, G. Metze, J. Berry and L. F. Eastman, *J. Appl. Phys.*, **51**, 383 (1980).
- [2] E. F. Schubert, A. Fischer and K. Ploog, *IEEE, ED33*, 625 (1986).
- [3] E. F. Schubert, Y. Horikoshi and K. Ploog, *Phys. Rev.*, **B32**, 1085 (1985).
- [4] M. Zachau, F. Koch, K. Ploog, P. Roentgen and H. Beneking, *Solid State Commun.*, **59**, 591 (1986).
- [5] G. Bastard, *Phys. Rev.*, **B24**, 4714 (1981).
- [6] R. C. Miller, A. C. Gossard, W. T. Tsang and O. Munteanu, *Phys. Rev.*, **B25**, 3871 (1982).
- [7] Z. Y. Xu, Z. G. Chen, D. Teng et al., *Surface Science* **174**, 216 (1986).
- [8] R. C. Miller, A. C. Gossard, and W. T. Tsang, *Physica* **117B & 118B**, 714 (1983).

## Optical Investigation of Delta-doping in Quantum Well Structures

Xu Zhongying, Xie Maohai, Xu Qiang, Zheng Baozhen and Kong Meiyng

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing, China, and National Laboratory for  
Superlattices and Related Microstructures)

### Abstract

Using delta-doping technique, the precise location of Be acceptors both in the center of quantum well and near the interface has been obtained. The photoluminescence measurement has been used to demonstrate the effect of  $\delta$ -doping. We have artificially verified for the first time the theory of the density distribution of hydrogenic impurity states in quantum well structures.

**Key words**  $\delta$ -doping, Spectral behavior