

# $\delta$ 掺杂 GaAs 超晶格的辐射跃迁\*

程文超 夏建白 李国华 谭平恒 郑厚植

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

**摘要** 低温下观察了弱耦合  $\delta$  掺杂 GaAs 超晶格的辐射复合发光. 实验结果表明: 除观察到基态的复合发光外, 还观察到激发态的复合发光. 基于有效质量近似理论, 计算了能带结构和发光光谱, 理论结果与实验结果符合得很好.

**关键词**  $\delta$  掺杂, 超晶格, 辐射跃迁.

## 引言

近年来, 随着 MBE 和 MOCVD 生长技术的进展,  $\delta$  掺杂结构在光电器件的研制中广泛地被采用, 尤其是红外探测器和光电开关<sup>[1,2]</sup>. 因此, 大大增强了人们对  $\delta$  掺杂结构光学特性研究的兴趣. 一些光学现象, 如微带的辐射跃迁<sup>[3]</sup>、费密边畸变<sup>[4]</sup>、二维到三维的转变<sup>[5]</sup>等研究文章先后发表.

对于单层  $\delta$  掺杂样品, 由于不存在对空穴的限制, 光产生空穴将被静电势扫走, 电子和空穴波函数的交迭变得很小, 不可能获得光荧光的的有效信息. 因此人们只能测量  $\delta$  掺杂超晶格和中心  $\delta$  掺杂量子阱的 PL 谱. 如果我们适当选择掺杂浓度和量子阱的宽度, 减少阱间耦合, 使得微带的展宽变得很少, 这样就可以使用  $\delta$  掺杂超晶格样品获得与单层  $\delta$  掺杂结构相似的发光光谱和复合特性.

在这篇文章中, 我们报道了弱耦合  $\delta$  掺杂 GaAs 超晶格的 PL 谱. 理论上采用有效质量近似方法计算了能带结构和 PL 谱, 理论结果与实验结果比较, 峰值位置和形状均获得令人满意的符合.

## 1 实验

实验中使用的样品是由 MBE 技术制备的. 首先在  $n^+$ -GaAs 衬底上生长  $1\mu\text{m}$  厚的缓冲层, 然后在其上生长光激活层, 由 40 个周期  $\delta$  掺杂超晶格组成, 厚度为  $5\text{nm}$ 、浓度为  $1 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$  的 Si- $\delta$  掺杂层是嵌在厚度为  $22.5\text{nm}$  不掺杂 GaAs 层之间, 作为一个超晶格周期. 样品被安装在 APD 闭循环制冷器的样品架上, 测量温度冷却到  $11\text{K}$ , 用  $\text{Ar}^+$  离子激光器的  $488\text{nm}$  谱线作为激发源, 激发强度小于  $20\text{mW}$ , 激发谱是由带有 GaAs 光电倍增管的 JY 双光栅单色仪探测.

\* 国家自然科学基金(编号 19734002)资助项目  
稿件收到日期 1997-12-22, 最后修改稿收到日期 1998-10-12

16

59-92

TN304.23

0471.4

砷化镓 MBE

## 2 结果和讨论

为了更好地了解该样品的辐射跃迁过程,在给出测量结果以前,需要考虑它的能带结构,图1简要地表示了该结构的有效势、电子和空穴的能级.从图1可以看到它属于Ⅱ类超晶格,电子和空穴分别位于空间的不同区域,不需要满足选择定则 $\Delta n=0$ ,因此能观察电子激发态的跃迁.在这个样品中,微带展宽是非常小的,基态微带展宽小于1meV,第一激发态微带展宽不超过3meV和第二激发态展宽约为8meV,使得它可能提供与单层 $\delta$ 掺杂结构相似的结果.

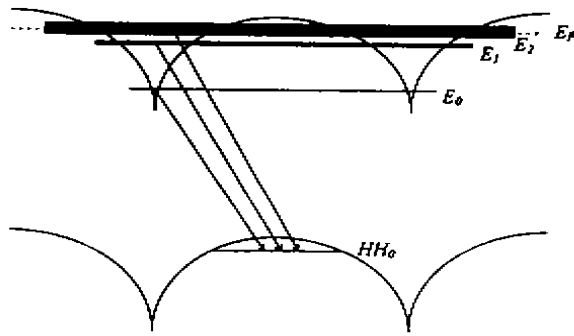


图1  $\delta$ 掺杂GaAs样品(A067)能带结构  
Fig. 1 Schematic diagram of the energy band structure of the  $\delta$ -doped GaAs superlattice A067

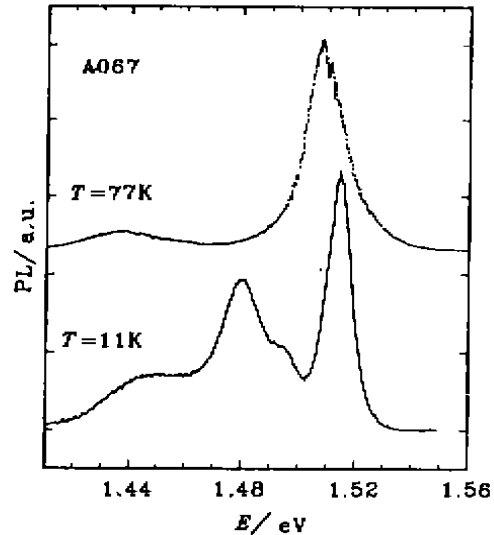


图2 11K下样品A067的PL谱  
Fig. 2 The measured and calculated PL spectra of Sample A067 at 11K.

图2中的实线表示了样品A067在温度为11K和低激发功率下,测得的PL谱.它有4个峰,能量分别为1.455、1.480、1.496和1.514eV,能量为1.455eV的低能峰是一个弱峰,而能量为1.480eV是一个强峰,前者是由势阱中的电子基态到重空穴的跃迁产生,由于较强的局域化和较小的波函数重叠,因此它是弱的,而后者是第一激发态到重空穴态的跃迁,它的峰值强度较基态强,是因为有较大波函数重叠,能量为1.496eV峰是第二激发态到重空穴态的跃迁,峰值变小是因为微带仅仅小部分被占有,能量为1.514eV的峰是带到受主的跃迁( $eA^0$ )所致.因此在 $\delta$ 掺杂结构中激发态发射强度是强于基态的发射强度,这些分析结果在理论计算中将得到了证实.

基于有效质量近似,我们计算了自洽势,电子和空穴的能量级,光跃迁矩阵元和PL谱.计算中,电子哈密顿量为

$$H_e = \frac{P^2}{2m_e^*} + V_c(\bar{Y}) + V_{ion}(\bar{Y}) + V_x(\bar{Y}).$$

式中, $V_{ion}(\bar{Y})$ 是由杂质形成的离子势, $V_c(\bar{Y})$ 是静电势,它满足Poisson方程, $V_x(\bar{Y})$ 是交换

相关势,它可取 Wigner 形式<sup>[5]</sup>.

对于样品 A067,计算的自洽势和电子、空穴的能级,基本上与图 1 一致.

在光激发情况下,求得电子和空穴的准费密能级后,我们可以计算 PL 谱. 计算公式为

$$P(E) \propto \sum_j |M_{ij}|^2 f_e(E_e) f_h(E_h) \delta(E - E_g - E_e - E_h).$$

式中,  $M_{ij}$  是电子态  $i$  和空穴态  $j$  之间光跃迁矩阵元,  $E_g$  是能隙,  $E_e$ 、 $E_h$  和  $f_e(E_e)$ 、 $f_h(E_h)$  分别是电子和空穴的能量和费密分布函数,图 2 中点线为计算结果. 计算得到的电子微带能级  $E_0$ 、 $E_1$  和  $E_2$  的能量分别是 1.455、1.489 和 1.493eV,与实验结果比较,峰值位置的误差不超过 10meV,而峰值强度关系与实验结果相一致. 由于计算中没有考虑多体效应和实验中一些因素的影响,因此,可以说两者无论在峰值的位置和形状上均符合得较好. 表明上述实验结果的解释是正确的.

值得注意的是,对于掺杂超晶格,必须考虑掺杂引起的带隙窄化<sup>[7]</sup>,对此,在计算过程中,我们考虑了重掺杂情况下能隙的重整化<sup>[8,9]</sup>. 否则会造成峰值位置的很大偏差.

对于一个掺杂的超晶格而言,另一个值得注意的问题是:势阱中的非平衡载流子增加或减少均改变了空间电荷浓度,引起空间电荷势的幅度和微带能级的改变,造成峰值位置的移动<sup>[10]</sup>. 作为一个二类超晶格,电子和空穴间的复合几率大大减少,在光照情况下,有可能在势阱中积聚非平衡载流子,引起有效带隙变化. 为此,实验中我们改变了激发强度,当入射光功率由 1mW 变到 20mW 时,除发光强度线性增加外,峰值位置几乎不变. 表明对于我们的样品,在我们的实验条件下,光照对能级位置的影响是可以忽略的.

PL 谱随温度的变化示于图 3. 图中给出样品 A067 在 11K 和 77K 的实验结果,温度增加,PL 谱的峰值变宽和红移,当温度超过 77K 时,3 个峰不能被分辨.

### 3 结论

现将本文归纳如下:使用光荧光方法,我们研究了  $\delta$  掺杂 GaAs 超晶格的辐射复合. 实验证明,对于一个二类超晶格,适当选择样品参数,除观察到基态的复合跃迁外,还可以观察到激发态的跃迁,通常电子激发态的发光强度大于基态的发光强度. 基于有效质量近似,我们计算了  $\delta$  掺杂超晶格样品的自洽势,电子和空穴能级和 PL 谱,测量结果的主要特性能够用理论模型解释,计算结果与实验结果符合得很好.

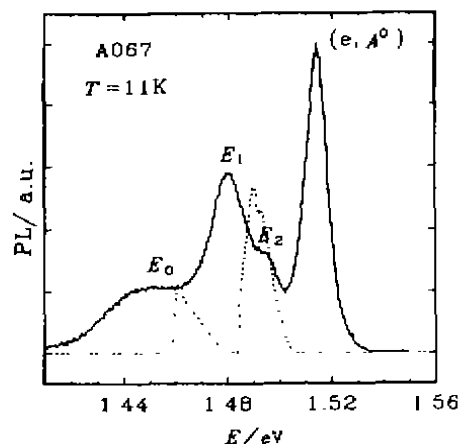


图 3 相同激发条件下样品 A067 在不同温度下测得的 PL 谱

Fig. 3 PL spectra measured of Sample A067 at different temperature under constant excitation intensity

## REFERENCES

- 1 Liu H C, Noel J P, Buchanan M, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**: 3298
- 2 Kiesel P, Guden K H, Hoffer A, *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**: 3288
- 3 KE Mao-long, Rimmer J S, Hamilton B, *et al.* *Phys. Rev.*, 1992, **B45**: 14114
- 4 Wagner J, Fischer A, Ploog K. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**: 428
- 5 Mendonca C A C, Plentz F, Oliverira J B B, *et al.* *Phys. Rev.*, 1993, **B48**: 12316
- 6 Wigner E. *Phys. Rev.*, 1934, **46**: 1002
- 7 Jain S C, Roulston D J. *S. S. E.*, 1991, **34**: 453
- 8 Sarma S, Das Jalabert R, Eric Yang S-R. *Phys. Rev.*, 1990, **B41**: 8288
- 9 Inkson J C. *J. Phys.*, 1976, **C9**: 1177
- 10 Dohler G H, Kunzel H, Olego D, *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**: 864

RADIATIVE TRANSITION IN  $\delta$ -DOPED GaAs SUPERLATTICES\*

CHENG Wen-Chao XIA Jian-Bai LI Guo-Hua

TAN Ping-Heng ZHENG Hou-Zhi

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

**Abstract** Radiative transition in  $\delta$ -doped GaAs superlattices with a weak coupling was investigated at low temperature. The experimental results show that the transitions from both electron ground state and excited state to hole state have been observed. Based on the effective mass approximation theory, the structures of energy band and photoluminescence spectra for the samples used were calculated. Comparing the experiment with theory, a good agreement was obtained.

**Key words**  $\delta$ -doping, superlattices, radiative transition.

---

\* The project supported by the National Natural Science Foundation of China  
Received 1998-2-27, revised 1998-10-12