

# GaAs/AlGaAs 短周期超晶格中的浅受主发光

罗昌平 许继宗 徐仲英

半导体超晶格国家重点实验室,中国科学院半导体所,北京 100083

(1992年7月7日收到;1992年11月3日收到修改稿)

首次研究了短周期超晶格中与浅受主有关的发光。测得的杂质束缚能与最新的理论计算结果符合很好,表明相邻阱间的强耦合对杂质束缚能具有重要影响。测量的非本征发光的寿命与本征发光的寿命基本相同,但远小于量子阱中的杂质发光寿命。短周期超晶格中杂质发光寿命变小,是由于在异质结界面存在大量的界面态,以及因材料无序而产生的局域态所致。

PACC: 7340L, 7847, 6170

有关 GaAs/AlGaAs 量子阱结构中的杂质发光,人们已经作过许多工作<sup>[1-6]</sup>。理论预计<sup>[7-9]</sup>,异质结界面引入的附加势将解除杂质态在量子阱中的简并,实验测试已证实了这一点。由于大部分实验是基于 MBE 生长的不掺杂材料,而这些材料通常呈 P 型,残留受主为碳 (C),因此观察到的与杂质有关的发光被指认为从阱中  $n = 1$  电子能级到中性碳受主能级的辐射复合。研究表明,受主束缚能是阱宽及受主在阱中位置的函数,阱中心处的受主束缚能随阱宽变小而增大,在某一不为零的阱宽值达到最大,并与势垒高度有关。但迄今为止,大部分工作局限于分立量子阱,很少工作<sup>[10]</sup>涉及超晶格特别是短周期超

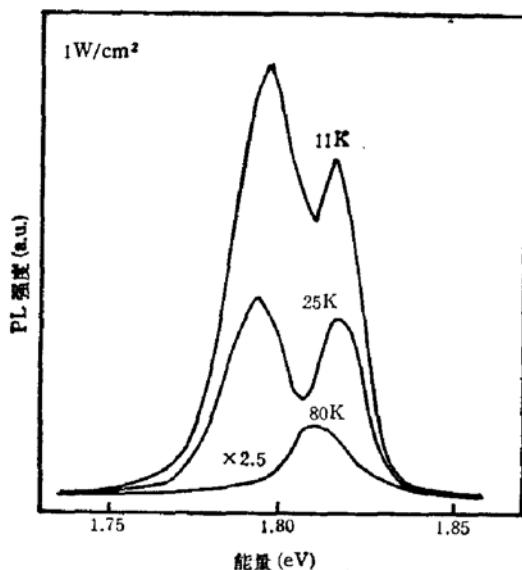


图1 不同温度下  $(\text{GaAs})_4/(\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As})_4$  短周期超晶格的光致发光谱 激发功率强度为  $1\text{W/cm}^2$  ( $5145\text{\AA}$ )

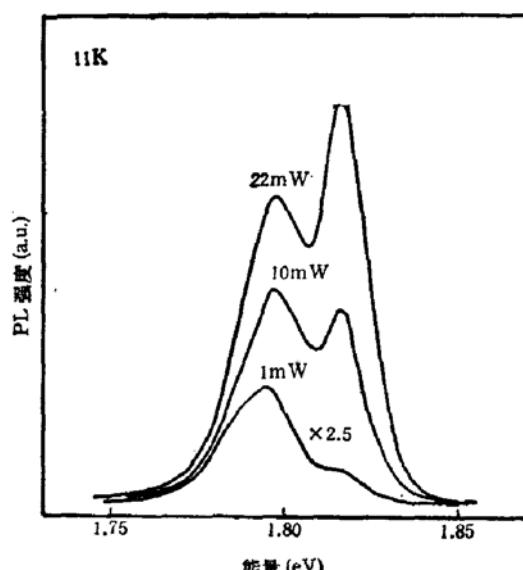


图2  $(\text{GaAs})_4/(\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As})_4$  样品在不同激发强度下的光致发光谱 激发功率如图中所示,  
样品温度为 11K

### 晶格中的杂质发光问题。

本文中我们首次报道  $(\text{GaAs})_m/(\text{AlGaAs})_n$  短周期超晶格中与受主有关的发光行为, 其中  $m, n$  表示单原子层数目。除了预期的激子发光峰外, 实验中还观察到一个低能峰, 指认为阱中束缚电子到中性受主的复合发光。我们用光荧光谱的激发强度和温度依赖关系证实了上述指认。实验得到的受主束缚能与 Einevoll 及 Chang<sup>[11]</sup> 最近的计算结果符合很好。实验样品由 MBE 生长。先在(100)半绝缘 GaAs 衬底上生长缓冲层和  $0.5 \mu$  厚的  $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$  层后, 再交替生长 50 到 130 个周期的 GaAs 和  $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$  层。所有样品都不掺杂。实验中使用了常规的发光测试方法。

图 1 中给出了  $m = n = 4$  样品在不同温度下的发光谱。11K 时有两个发光峰, 能量位置分别是 1.816 和 1.794 eV。高能峰是重空穴激子发射, 而低能峰与残余受主有关。温度升高后, 两峰的相对强度发生变化。80K 时, 低能发光峰变得很弱。这是与杂质有关的跃迁的典型行为。两峰能量相差 22 meV。因此受主束缚能应是 22 meV 加上自由激子束缚能。短周期超晶格中激子具有三维激子特性, 其束缚能与分立量子阱中的二维激子相差很多。估计在我们的样品中激子束缚能为 4 meV<sup>[12]</sup>。因此  $m = n = 4$  的短周期超晶格样品中, 受主束缚能是 26 meV。

图 2 所示是不同激发强度下的发光谱。低激发情况下, 发光谱主要是宽带的非本征发射。激发强度增加时, 本征的激子发光强度近似成线性增加, 表明激子发射的单分子特征<sup>[13]</sup>。相反, 非本征发光则随激发强度逐渐增加达到饱和。

最近, Einevoll 和 Chang<sup>[11]</sup> 用有效能带-轨道模型(EBOM) 计算了  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  量子阱和超晶格中浅受主的束缚能。为了比较, 我们将我们的实验结果和他们的计算结

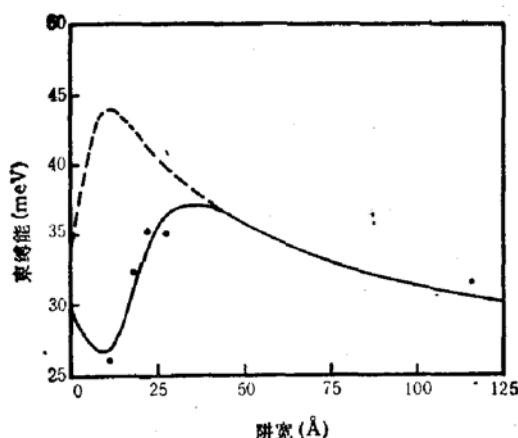


图 3  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$  超晶格中位于阱中心位置的浅受主束缚能与阱宽的关系。实心圆点为实验结果, 实线为 Einevoll 和 Chang 的计算结果(假设相同的阱宽和垒宽)。分立量子阱的结果也在图中用虚线(计算)和空心圆点(我们的实验结果)画出。

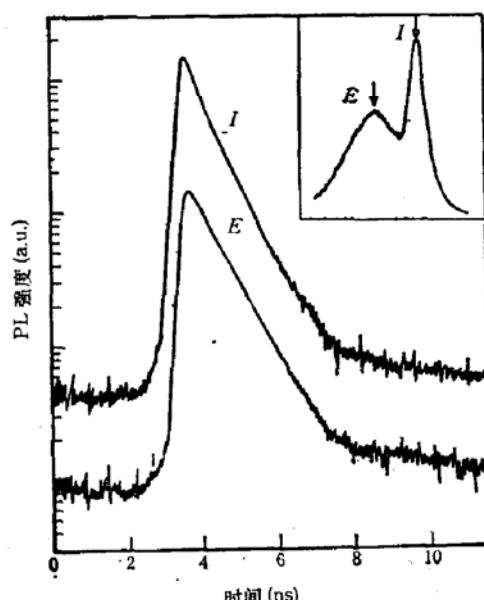


图 4  $(\text{GaAs})_m/(\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As})_n$  超晶格中本征(I)和非本征(E)发光的衰退过程。插图是样品在 6400  $\text{\AA}$  的  $p\pi$  脉冲激发下的光致发光谱。箭头表示发光衰退测量中所在的能量位置。

果均画在图3中。图3中还标出了阱宽为 $30\text{ \AA}$ 的分立量子阱的实验结果。分立量子阱中受主束缚能是 $41\text{ meV}$ ，大于 $m=n=10$ 超晶格样品中的结果 $35\text{ meV}$ ，说明了短周期超晶格中阱间耦合对受主束缚能的重要影响。

我们用单光子计数方法对上述样品进行了时间分辨光谱测试，发现与杂质有关的发光寿命很短( $\sim 800\text{ ps}$ )，与本征发光寿命( $\sim 700\text{ ps}$ )相接近。图4给出了 $m=n=6$ 样品在 $1.776$ 及 $1.748\text{ eV}$ 处的发光衰退曲线。前者是本征发光，后者是非本征发光。从图中可以看出发光的衰退过程十分接近，说明两个发光过程中的自由载流子都处于热平衡状态。上述结果与文献报道的实验结果<sup>[11,15]</sup>明显不同。通常量子阱中测得的杂质发光寿命为 $5\text{--}10\text{ ns}$ ，远大于本征激子的发光寿命( $<1\text{ ns}$ )。我们认为发光寿命的减小可能是由于短周期超晶格样品中存在大量界面态所致。界面态的存在，给载流子的复合提供了一个新的通道，这将使载流子的发光寿命减小。通常情况下界面态都具有较大的复合速率，因此实验观测到的发光寿命将主要决定于界面复合速率，并不取决于材料本征辐射复合和非本征辐射复合特性，这可能使得本征和非本征的发光寿命之间没有显著差别。另外一个可能的因素是短周期超晶格中容易造成合金无序，引入局域态<sup>[16]</sup>，使得动量守恒规则部分被破坏，也可能减小辐射复合寿命。

综上所述，我们首次观测到短周期超晶格中与受主有关的发光。测得的受主束缚能与理论计算符合很好。时间分辨结果揭示样品中存在很多界面态，使得观测到的发光寿命大大减小。

### 参 考 文 献

- [1] R. C. Miller, A. C. Gossard, W. T. Tsang and O. Munteanu, *Phys. Rev.*, **B25**, 3871(1982).
- [2] R. C. Miller, W. T. Tsang and O. Munteanu, *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 374(1982).
- [3] Z. Y. Xu, Z. G. Chen, D. Teng, W. H. Zhuang, J. Y. Xu, J. Z. Xu, B. Z. Zhen, J. B. Liang and M. Y. Kong, *Surface Sciences*, **174**, 216(1986).
- [4] W. T. Masselink, Y. C. Chang, H. Morkoc, D. C. Reynolds, C. W. Litton, K. K. Bajaj and P. W. Yu, *Solid-State Electronics*, **29**, 205(1986).
- [5] Y. Nomura, K. Shinozaki and M. Ishii, *J. Appl. Phys.*, **58**, 1864(1985).
- [6] P. O. Holtz, M. Sundaram, R. Simes, J. L. Merz, A. C. Gossard, and J. H. English, *Phys. Rev.*, **B39**, 13293(1989).
- [7] G. Barstard, *Phys. Rev.*, **B24**, 4714(1981).
- [8] C. Mailhiot, Y. C. Chang and T. C. McGill, *Phys. Rev.*, **B26**, 4449(1982); also *J. Vac. Sci. Technol.*, **21**, 519(1982).
- [9] R. L. Greene and K. K. Bajaj, *Solid State Commun.*, **45**, 825(1983).
- [10] B. J. Skromme, R. Bhat and M. A. Koza, *Solid State Commun.*, **66**, 543(1988).
- [11] G. T. Einevoll and Y. C. Chang, *Phys. Rev.*, **B41**, 1447(1990).
- [12] A. Chomette, B. Lambert, B. Deveaud, F. Clerot, A. Regreny and G. Bastard, *Europhys. Lett.*, **4**, 461 (1987).
- [13] Xu Zhongying, Xu Jizong, Ge Weikun, Zheng Baozhen, Xu Junying and Li Yuzhang, *Solid State Commun.*, **61**, 707(1987).
- [14] M. Gurioli, A. Vinatieri, M. Colocci, A. Bosacchi and S. Franchi, *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 2150(1991).
- [15] M. Colocci, M. Gurioli, A. Vinatieri, C. Deparis, J. Massies and G. Neu, *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 783(1989).
- [16] M. Kasu, T. Yamamoto, S. Noda and A. Sasaki, *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 800(1991).

## Shallow Acceptor Levels in GaAs/AlGaAs Short Period Superlattices

Luo Changping, Xu Jizong and Xu Zhongying

National Laboratory for Superlattices & Microstructures, and Institute of Semiconductors, Academia Sinica  
Beijing 100033

(Received 7 July 1992; revised manuscript received 3 November 1992)

### Abstract

The acceptor-related luminescence of short period superlattices has been studied for the first time. The measured acceptor binding energies are in good agreement with recent theoretical calculations, showing the importance of strong coupling of adjacent wells. The luminescence lifetime of the extrinsic emission was found to be comparable to that of the intrinsic emission in our samples, and to be much shorter than that of quantum wells. The shortened lifetime of acceptor-related luminescence suggests the existence of a large number of surface states in the heterointerfaces and of localized states created by disordering in the material.

**PACC:** 7340L, 7847, 6170