

GaAs/GaAlAs 量子阱激子 能量调谐的新方法

徐仲英^{1,2} 王建农² 王玉琪² 葛惟琨² 李 晴¹ 李树深¹

(1 超晶格国家重点实验室 中国科学院半导体研究所 北京 100083)

(2 香港科技大学物理系 九龙 香港)

M. Henini

(Nottingham 大学物理系, Nottingham NG7 2RD, UK)

摘要 用分子束外延技术(MBE)在 GaAs 量子阱中嵌入 InAs 亚单层,可以有效地改变量子阱的激子能量,从而达到波长调谐的目的. 激子能量的调谐范围取决于量子阱宽度,并和 InAs 层厚度有关. 利用有效质量近似,计算给出了能量调谐曲线,结果与实验符合较好. 本文给出的结果提供了一种改变量子阱发光器件波长的新方法.

PACC: 7855, 7847

应变 InAs/GaAs 异质结结构由于其独特的物理特性和器件应用背景,已得到人们的加倍关注,其中研究得最多的是 InAs/GaAs 自组织量子点^[1-3]. 与此同时,对 InAs 亚单层、单层结构的光学性质也有过深入的研究,这种结构具有很高的发光效率^[4]、窄的光谱线宽^[5]、很强的激子振子强度^[5,6],并具有二维发光特性^[7]. 本文将报道这种结构在器件应用中的另一重要特性:即用来调谐量子阱结构的发光波长. 这一特性有可能为光电器件的波长调谐提供一种新方法.

实验所用样品由 MBE 生长,样品基本结构为:以(100)半绝缘 GaAs 作衬底,先生长 GaAs 缓冲层,然后生长一个由三个单量子阱组成的 GaAs 量子阱结构,三个量子阱的宽度分别为 3、6.2 和 12nm,由厚度为 40nm 的 Ga_{0.8}Al_{0.2}As 势垒隔开. 不同厚度的 InAs 层镶嵌在 GaAs 量子阱中央,生长温度为 480~510℃,GaAs 和 GaAlAs 的生长温度为 600℃. 参考样品具有相同的 GaAs/GaAlAs 量子阱结构,但量子阱中不镶嵌 InAs 亚单层.

稳态光谱测量采用常规的光致发光技术,而时间分辨光谱测量中,用掺钛蓝宝石激光器作光源,信号用二维条纹相机接收、分析.

* 本工作得到国家自然科学基金(批准号:19574047)和香港研究基金会的资助

徐仲英 男, 1942 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体光谱研究

李 晴 男, 1972 年出生, 硕士生, 半导体超快过程研究

1998-10-27 收到, 1998-12-23 定稿

图 1 是三个典型样品的低温光致发光(PL)光谱, 其中两个样品的中央分别嵌有 1/2、1/12 单分子层(ML)的 InAs, 而另一样品为参考样品。可以清楚地看到, 随着 InAs 厚度的增加, 发光能量向低能移动, 例如, 嵌有 (1/2)ML 的样品中, 对应 3、6.2 和 12nm 量子阱的发光能量分别为 1.593、1.533 和 1.504eV, 比参考样品分别红移了 60、46 和 35meV, 而嵌有 (1/12)ML InAs 的样品相应移动量分别为 10、7 和 4meV。值得指出的是, 上述 1.504meV 能量已经小于 GaAs 带隙(1.516eV, 12K), 这就是说, 当 GaAs 量子阱中嵌入一定厚度的 InAs 层后, 其激子发光能量可以低于 GaAs 带隙, 从而增大了波长调谐范围。对器件应用来说, 一个很重要的问题是: 在量子阱中嵌入 InAs 薄层之后, 是否会影响 GaAs/GaAlAs 量子阱激子发光的光学特性及材料的质量, 我们的实验证明: InAs 薄层的嵌入并不会影响 GaAs 量子阱激子的发光特性。

首先我们发现, InAs 亚单层的嵌入

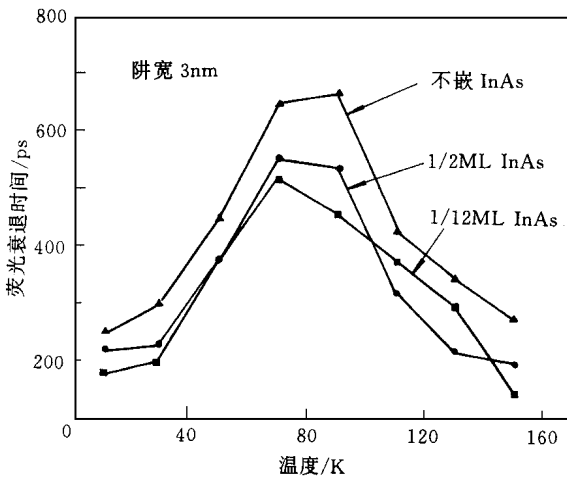


图 2 三个样品中阱宽为 3nm 的量子阱的激子荧光衰减时间与温度的关系。阱中嵌入的 InAs 层厚度如图中所示。

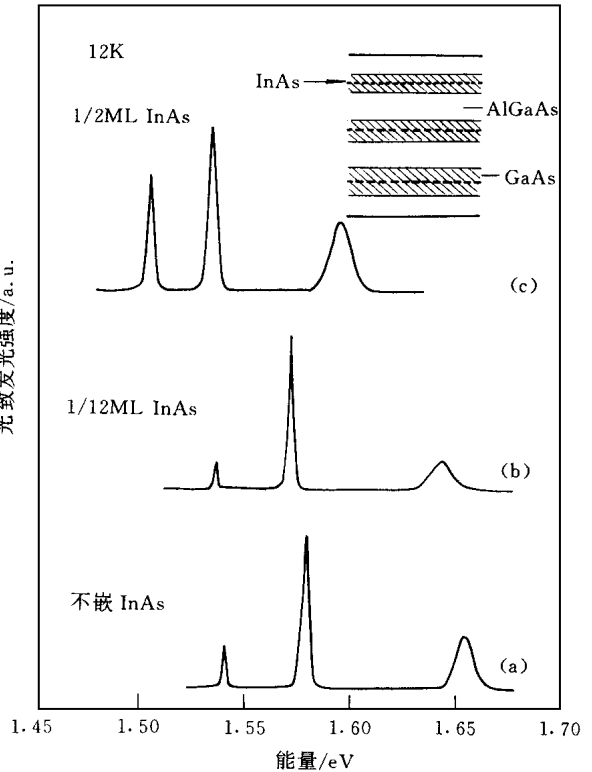


图 1 三个典型样品的低温(12K)光致发光光谱。其中两个样品的中央分别嵌有 1/2(a)、1/12(b) 单分子层(ML)的 InAs, 而另一样品为参考样品(c)。插图为样品结构示意图, InAs 层位置用箭头表示。

并没有明显改变发光光谱的宽度和强度(图 1), 这就表明 InAs 层的嵌入没有引入额外的缺陷, 不影响样品的光学质量。我们进一步用时间分辨光谱证实了这一点。众所周知, 材料的发光寿命的长短以及其随温度的变化在很大程度上取决于样品中是否存在各种非辐射复合中心。对于一个理想的二维量子阱系统, 激子发光寿命随温度的升高而增加, 是温度的线性函数^[8]。但对于一个实际量子阱结构, 测得的发光寿命往往在某一温度之后开始减小, 这一特征常常与样品中的辐射复合中心有关^[9, 10], 上述转变温度因样品而异。我们测量了图 1 中三个样品的荧光衰减时间与温度的关系, 结果如图 2 所示。由图可以看出, 三个样品具有

非常相似的特性: 低温 ($< 30\text{K}$) 时, 荧光衰退时间基本不随温度变化, 表现出激子的局域化特性; 然后, 随温度的增加线性增加, 表现为二维激子的典型特性; 当温度达到 80K 左右时, 荧光寿命达到最大值, 以后开始减小, 并发生荧光淬灭. 荧光寿命的减小起源于非辐射复合中心的热激活^[9, 10]. 样品越纯, 非辐射复合中心越少, 荧光寿命达到最大值所对应的转变温度越高; 反之, 样品中缺陷增加, 非辐射复合中心增加, 转变温度就低. 上述三个样品具有相似的温度特性, 正好说明 InAs 层的嵌入并没有引入额外的非辐射复合中心.

最后我们用有效质量近似计算了嵌入 InAs 薄层后 $\text{GaAs}/\text{GaAlAs}$ 量子阱的能级位置, 并与实验结果作了比较. 图 3 实线为具体计算结果, 纵坐标用激子能量相对于参考样品的红移量来表示, 横坐标为 InAs 层厚度. 可以看出, 随着所嵌入的 InAs 层厚度增加, 激子能量

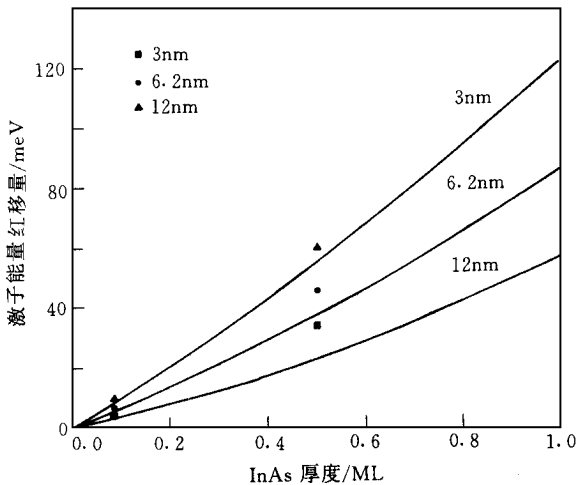


图 3 理论计算得到的调谐曲线与实验结果比较

不断增加. 量子阱宽度越小, 这种趋势越明显. 对一个 3nm GaAs 量子阱来说, 当嵌入的 InAs 厚度范围为 $0 \sim 1\text{ML}$ 时, 其调谐范围可以达到 120meV . 图 3 中, 实验测得的不同样品的发光能量位置用符号表示. 可以看出, 理论与实验虽有偏离, 但整体上符合较好. 具体数值的偏离是因为我们在理论计算中采用了二维量子阱模型, 而在实际结构中, InAs 层很薄, 包络函数模型的应用受到一定的限制. 但我们这里所关心的是整个调谐趋势, 而不是具体精度, 因此计算结果所显示的调谐特性对实际器件应用是很有意义的.

总之, 本文结果显示, 用分子束外延技术在 GaAs 量子阱中嵌入 InAs 亚单层, 可以有效地改变量子阱的激子能量, 从而达到发光器件波长调谐的目的. 嵌入 InAs 层后的量子阱光学质量依然良好, 因此, 这种方法有望成为一种改变量子阱发光器件波长的新方法.

参 考 文 献

- [1] J. M. Marzin and J. M. Gerard, *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**: 272
- [2] D. Leonard, M. Krishnamurthy, C. M. Reaves *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**: 3203
- [3] J. M. Moison, F. Houzay, F. Barthe *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**: 196
- [4] P. D. Wang, N. N. Ledentsov, C. M. Sotomayer Torres *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**: 1526
- [5] M. V. Belousov, N. N. Ledentsov, M. V. Maximov *et al.*, *Phys. Rev.*, 1995, **B51**: 1436
- [6] R. C. Iotti, L. C. Andreani and M. D. Ventra, *Phys. Rev.*, 1998, **B57**: R15072
- [7] Z. L. Yuan, Z. Y. Xu, B. Z. Zheng *et al.*, *Phys. Rev.*, 1996, **B54**: 16916
- [8] J. Feldmann, G. Peter, E. O. Gobel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**: 2337
- [9] G. Bacher, H. Schweizer, J. Kovac *et al.*, *Phys. Rev.*, 1991, **B43**: 9312
- [10] M. Gurioli, A. Vinattieri, M. Colocci *et al.*, *Phys. Rev.*, 1991, **B44**: 3115
- [11] M. G. Burt, *J. Phys.: Condens. Matter*, 1992, **4**: 6651
- [12] Li Shushen and Xia Jianbai, *Acta Physica Sinica (Overseas Edition)*, 1997, **6**: 848

New Method for Tuning Exciton Energy in GaAs/AlGaAs Quantum Wells

Xu Zhongying^{1,2}, Wang Jiannong², Wang Yuqi²,
Ge Weikun², Li Qing¹, Li Shushen¹

(1 *Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

(2 *Department of Physics, Hong Kong University of Science and Technology,
Clear Water Bay, Hong Kong, China*)

M. Henini

(*Physics Department, Nottingham University, Nottingham NG7 2RD, UK*)

Received 27 October 1998, revised manuscript received 23 December 1998

Abstract The wavelength tuning of the exciton emissions has been achieved simply by inserting InAs submonolayer at the center the GaAs QWs during the MBE growth. The PL measurements show that the emission energy can be effectively tuned from the QW-determined energy down to less than the band gap of GaAs, depending on the well width as well as the InAs layer thickness. Using the effective mass approximation, the tuning effect can be well predicted theoretically. The results reported here may provide an alternative way to tune the wavelength in optoelectronic devices.

PACC: 7855, 7847